

Ance Ansone

BIOMETĀNA ILGTSPĒJA CEĻĀ UZ INOVATĪVU ENERĢOSISTĒMU

Promocijas darbs



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 darbs

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

Asociētā profesore *Ph.D.*
LĪGA ROZENTĀLE

RTU Izdevniecība
Rīga 2026

Ansonē, A. Biometāna ilgtspēja ceļā uz inovatīvu energosistēmu. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība, 2026. - 159 lpp.

Publicēts saskaņā ar Promocijas padomes "RTU P-19" 2026. gada 28. maija lēmumu, protokols Nr. 243.

ANOTĀCIJA

Globālais pieprasījums pāriet uz atjaunīgās enerģijas sistēmām ir ieguvis ievērojamu motivāciju, ko veicina pieaugošie izaicinājumi, kas saistīti ar klimata pārmaiņām un nepieciešamība pēc energoapgādes drošības un neatkarības. Šajā kontekstā biometāns ir kļuvis par daudzsoļu atjaunīgo gāzveida kurināmo, kas var izmantot esošo dabasgāzes infrastruktūru, vienlaikus piedāvājot ievērojamu siltumnīcefekta gāzu emisiju samazinājumu. Neskatoties uz biometāna attīstības potenciālu, tas saskaras ar daudziem savstarpēji saistītiem izaicinājumiem, kas skar tehniskos, ekonomiskos, sociālos un politikas sektorus.

Latvijas enerģētikas nozare šobrīd atrodas sarežģītā laikā, kas saistīts ar pārkārtošanos uz atjaunīgās enerģijas izmantošanu – pārejā no fosilās enerģijas izmantošanu uz jaunu atjaunīgās enerģijas jaudu uzstādīšanu un patēriņu. Lai gan Latvijā promocijas darba izstrādes brīdī ir jau dažas sistēmai pieslēgtas biometāna ražotnes, joprojām ir svarīgi veicināt nozares attīstības līmeni sistēmiski, lai tuvotos biometāna ražošanas potenciālam. Pastāv gan neizmantotas iespējas no klimata aspektiem, gan arī nerealizēts valsts ekonomikas potenciāls un ieguvumi, ko veido biometāna nozare.

Promocijas darba mērķis ir analizēt faktorus, 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 ietvaros tiek 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 matemātiskus aprēķinus, lai nodrošinātu uz datiem balstītu lēmumu pieņemšanu gāzes nozares dekarbonizācijai, biometāna integrācijai gāzes infrastruktūrā un aprites ekonomikas veicināšanai. Mērķa sasniegšanai izvirzīti uzdevumi, lai novērtētu biometāna resursu bāzi un enerģijas potenciālu Latvijā, kā arī analizētu daudzveidīgus biometāna integrācijas infrastruktūrā risinājumus. Papildus tika analizēti reālas ražotnes darbības dati, izejvielu optimizācijas iespējas, kā arī normatīvais un politikas ietvars Latvijā un ES.

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.

Balstoties uz iegūtajiem rezultātiem, izdarīti secinājumi, kas var kalpot par pamatu ilgtermiņā pozitīvai gāzes sektora dekarbonizācijai un spēcīgākai aprites ekonomikas attīstībai.

Promocijas darbs sastāv no ievada, kur iekļauta tēmas aktualitāte, hipotēzes, mērķa un uzdevumiem, darba struktūras un informācijas par darba aprobāciju. Promocijas darba pamatdaļā aplūkota analizētā literatūra, piemērotā metodika un sekojoši atainoti būtiskākie rezultāti, kā arī iekļauti secinājumi.

ANNOTATION

The global demand for the transition to renewable energy systems has gained significant momentum, driven by increasing challenges related to climate change, rising energy prices, and the need for greater energy security and independence. In this context, biomethane has emerged as a promising gaseous renewable fuel that can be integrated into existing natural gas infrastructure while providing substantial reductions in greenhouse gas emissions. Despite its considerable development potential, the large-scale deployment of biomethane is still hindered by a complex set of interrelated technical, economic, social, and regulatory challenges.

Latvia's energy sector is currently undergoing a demanding transition from fossil-based energy systems to renewable energy technologies. Although several biomethane production plants are already connected to the gas system in Latvia, the overall development level of the biomethane sector remains limited. To fully exploit the national biomethane potential, systematic and coordinated development is required. From both a climate and economic perspective, Latvia still has significant untapped opportunities to benefit from biomethane, including reduced greenhouse gas emissions, strengthened energy independence, rural development, and support for the circular economy.

The aim of the doctoral thesis is to analyse the factors influencing the selection of biomethane as a suitable energy source, its optimal integration into the gas system, and its entry into the energy market, as well as to evaluate biomethane as a broadly applicable energy carrier across different sectors. Within the framework of this research, a scientifically justified and practically applicable decision-making assessment system for the sustainable development and integration of biomethane into Latvia's energy system is developed. The analysis integrates technical, environmental, economic, and regulatory dimensions, supported by mathematical modelling and quantitative calculations, to ensure data-driven decision-making for gas sector decarbonisation, biomethane infrastructure integration, and circular economy promotion.

To achieve the research objectives, the biomethane resource base and energy potential in Latvia are assessed, various biomethane infrastructure integration solutions are analysed, and real operational data from a full-scale biomethane plant are evaluated. Furthermore, raw material optimisation opportunities and the regulatory and policy framework in Latvia and the European Union are examined.

The doctoral thesis combines the analysis of physical processes related to biomethane production, circulation, and market integration with the application of diverse research methods and the development of practical models spanning the entire value chain from production to final consumption. The conclusions derived from the study provide a solid foundation for the long-term decarbonisation of the gas sector and the strengthened development of the circular economy.

The dissertation consists of an introduction outlining the topicality, hypothesis, objectives, structure, and approbation of the research, followed by the main part presenting the literature review, methodology, results, and conclusions.

PATEICĪBA

Man ir patiesi palaimējies satikt īstos cilvēkus – tos, kuri ir līdzās ar gaišu skatu, iedvesmojuši un iedrošinājuši darīt labāk. Laika gaitā esmu sapratusi, ka daudz no tā, kas bija nepieciešams šī ceļa veikšanai, jau bija manī pašā – vajadzēja tikai cilvēkus, kuri palīdzēja tam noticēt.

Paldies Uldim par mieru un atbalstu, kad tas bija nepieciešams, lai sāktu visu vēlreiz.

Paldies Jūlijai Guščai par atvērtību un sirsnīgumu, ko viņa nesavtīgi sniedz apkārtējiem.

Paldies Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta kolektīvam par nenovērtējamu siltumu, prieku un zināšanām, kas gadu gaitā gūtas, strādājot kopā, studējot un satiekoties arī ārpus universitātes. Īpaši pateicos Līgai Sniegai par praktisku atbalstu un atsaucību.

Visvairāk vēlos pateikties savām promocijas darba zinātniskajām vadītājām – profesorei Dagnijai Blumbergai un asociētajai profesorei Līgai Rozentālei. Paldies Līgai, kura ar savu pastāvīgo piemēru, iedvesmojošo skatu uz pasauli un aso prātu parāda, ka viss ir izdarāms un ka *“Nav tāda, ko nevar. (...)”*.

Liels paldies Dagnijai par iedrošinājumu augt un attīstīties, par sniegtajām iespējām un vērtīgiem padomiem daudzu gadu garumā! Ir īpaši skaisti apzināties kā 2012. gadā sāku bakalaura studijas RTU vides zinātnē, tā noslēdzu turpat – ar doktora līmeņa studiju pabeigšanu.

SATURS

SAĪSINĀJUMI.....	7
IEVADS	9
1. LITERATŪRAS ANALĪZE	16
1.1. Eiropas Savienības un Latvijas stratēģiskie mērķi biometāna ražošanā	16
1.2. Energoresursu patēriņa un cenu prognozes	17
1.3. Biometāna izplatība Eiropas Savienībā un Latvijā	22
1.4. Biometāna raksturojums, ražošanas izejvielas un tā priekšrocības	26
1.5. Palielināta biometāna īpatsvara radītie riski gāzes infrastruktūrai	34
1.6. Biometāna attīstības un tirgus integrācijas izaicinājumi un iespējas	40
1.7. Fokuss biometāna ražotņu savienojumam ar gāzes sistēmu un tirgus integrācijas scenārijiem	49
2. METODIKA.....	51
2.1. Kvantitatīvā kontentanalīze.....	52
2.2. Bibliometriskā analīze.....	56
2.3. Izpētošā gadījumu analīze	59
2.4. Daudzkritēriju lēmumu analīze piemērojot <i>TOPSIS</i> metodi.....	69
2.5. Regresijas analīze	74
2.6. Izmaksu un ieguvumu analīze (<i>CBA</i>).....	79
2.7. Optimizācijas modelis	88
3. REZULTĀTI.....	92
3.1. Kvantitatīvās kontentanalīzes rezultāti.....	92
3.2. Bibliometriskās analīzes rezultāti.....	96
3.3. Izpētošās gadījumu analīzes rezultāti	103
3.4. Daudzkritēriju lēmumu analīzes rezultāti, izmantojot <i>TOPSIS</i>	109
3.5. Regresijas analīzes rezultāti - biometāna ražošanas apjoma (ražīguma) efektivitātes analīze 133	
3.6. Biometāna izmaksu un ieguvumu analīzes rezultāti	135
3.7. Optimizācijas modeļa rezultāti.....	139
4. SECINĀJUMI	142
5. LITERATŪRAS SARAKSTS	144

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>	slāpekļis
<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 <i>final</i> KOMISIJAS PAZIŅOJUMS EIROPAS PARLAMENTAM, EIROPADOMEI, PADOMEI,

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

SEG / GHG siltumnīcefekta gāzes (angļu val. *greenhouse gases*)

SPRK Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisija

SVID novērtēšanas metode – stipro un vājo pušu, iespēju un draudu novērtējums

TOPSIS daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metode (angļu val. *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*)

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 tirgū 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 saspīestā 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 un izpēte 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.

Promocijas darba ietvaros 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. Pētījuma gaitā iegūtie rezultāti sniedz kvantitatīvi pamatotus pierādījumus par to, ka labvēlīgos apstākļos biometāns spēj aizstāt līdz pat aptuveni 50 % no Latvijas pašreizējā dabasgāzes patēriņa, tādējādi būtiski veicinot enerģētiskās neatkarības palielināšanu un siltumnīcefekta gāzu emisiju samazināšanu. 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 pamatoti 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, īpaši koģenerācijas un hibrīdo bioenerģijas sistēmu attīstībā, ievērojot starptautiskas atziņas.

Promocijas darba atziņas ir praktiski izmantojamas reģionālas 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.

Promocijas darbs balstīts uz faktiskajiem Latvijas normatīvās vides, enerģētikas tirgus un infrastruktūras apstākļiem, kas nodrošina augstu pētījuma rezultātu ticamību un palīdz izstrādāt praktiski lietojamus risinājumus konkrētajā nacionālajā kontekstā. Vienlaikus šāda pieeja ierobežo pētījuma rezultātu vispārināmību, jo biometāna attīstība netiek analizēta alternatīvu nākotnes normatīvā regulējuma scenāriju kontekstā.

Promocijas darbā izmantotās literatūras avotu grupas

Promocijas darba izstrādē izmantoti fundamentāli zinātniskie pētījumi un monogrāfijas, zinātniskās publikācijas, kas publicētas zinātniskajos žurnālos un konferenču rakstu krājumos, zinātniskajās datubāzēs *Scopus*, *Web of Science*, *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *EBSCOHOST*, *Google Scholar* pieejamie avoti, likumi, normatīvie dokumenti, Eiropas Savienības un Latvijas Republikas politikas plānošanas dokumenti, Eiropas Komisijas direktīvas, *Eurostat* un citi statistikas dati, uzņēmumu un citu organizāciju materiāli, interneta resursi, promocijas darba autores veiktie pētījumi.

Pētījuma ierobežojumi

Pētījumam pastāv arī vairāki ierobežojumi, jo analīze galvenokārt fokusējas uz Latvijas situācijas izpēti. Lai gan metodoloģiskais ietvars un galvenie secinājumi kopumā ir pārnesami un plaši izmantojami gan citu valstu gadījumu analīzē un novērtēšanā, gan kopumā arī citu energoresursu, piemēram, udeņraža analīzē, tā tiešā piemērojamība ir atkarīga no attiecīgās valsts infrastruktūras īpašībām, tirgus attīstības stadijas un esošā tiesiskā regulējuma elastības. Tādējādi, var secināt, ka promocijas darba rezultātu pārnese un attiecināšana uz citām valstīm ir jāveic atbilstoši pielāgojot kontekstu.

Daļa no regresijas analīzes ir balstīta tikai uz operatīvā monitoringa datiem un pastāv salīdzināšanas ierobežojumi pieejamajiem datiem, jo tie bija pieejami tikai no vienas biogāzes ražotnes noteiktam laika posmam. Arī investīciju izmaksas, gāzes cenas un CO₂ emisiju kvotu cenas ir svārstīgas un pakļautas tirgus dinamikai, kas tieši ietekmē ilgtermiņa finanšu prognozes un vispārēju plānošanu. Tā kā biometāna tirgus strauji attīstās, vienlaikus pēdējos gados pastāvot straujai inflācijai, dažādas infrastruktūras izveides un tehnoloģiju izmaksas ir grūti novērtējamas ilgākā pētījuma laikā, ņemot vērā straujo cenu pieaugumu un mainību, taču šo nenoteiktību pilnībā novērst nav iespējams.

Latvijas biometāna tiesiskais regulējums joprojām attīstās. Izmaiņas atbalsta mehānismos, kvalitātes nosacījumos, citu Eiropas valstu atbalsta vai ilgtspējas prasību nosacījumos, Eiropas direktīvu un regulu pārskatīšana, kā arī jaunu deleģēto aktu izdošana rada regulatīvo nenoteiktību, kas arī ir pētījumu ierobežojošs, vienlaikus grūti ietekmējams apstāklis.

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>.

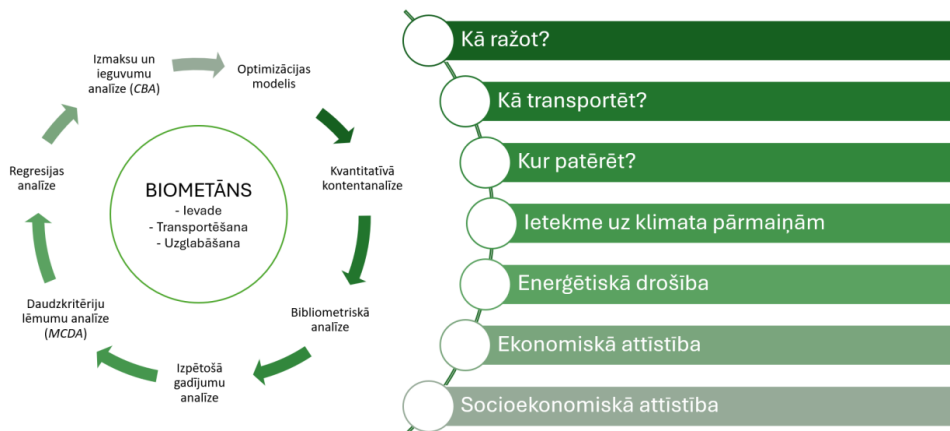
5. A. Ansone, L. Rozentale, M. Pelss, C. Rochas, D. Blumberga, "Gaseous bioresources towards climate neutrality: Case study of Latvia", *Renew Energy*, submitted for publication "Renewable Energy", 2026 – Article submitted for review.
https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=6066095.
6. Ansone, 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. Ansone, 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 (RTU CON), Riga, Latvia, 12.10.2024.
2. A. Ansone, 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. Ansone, 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. Ansone, 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. Ansone, 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

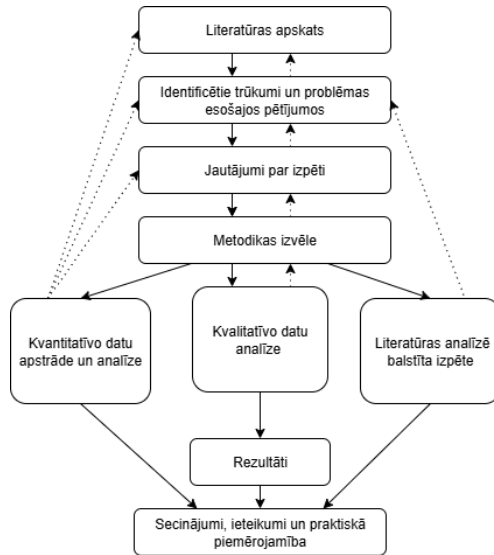
Lai sasniegtu promocijas darba mērķi un uzdevumus, promocijas darba struktūra tika veidota, fokusējoties uz biometānu, un šī promocijas darba struktūra redzama 1. attēlā. Promocijas darbs: 1) apvieno vairākus biometāna fiziskus tirgū nonākšanas un aprites aspektus un ar tiem saistīto faktoru izpēti; 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. Metodoloģiskais ietvars attēlots 2. attēlā, kurā redzama pētījuma loģiskā struktūra un galvenie analīzes posmi.

Promocijas darba ievadā ir veikta literatūras analīze, lai identificētu esošo pētījumu trūkumus un aktuālos izaicinājumus biometāna integrācijā energosistēmā. Literatūras analīze aptver gan zinātniskos rakstus, politikas plānošanas dokumentus un normatīvos aktus, kā arī nozares stratēģiskus dokumentus un pētījumus, kas aplūko tehnoloģiskos, regulatīvos, ekonomiskos un citus ieguvumus un izaicinājumus biometāna sektorā. Secīgi formulēti izpētes jautājumi un ņemot vērā to atšķirīgo dabu, darbā piemērotas sešas izpētes metodes: 1) Kvantitatīvā kontentanālizē, 2) Bibliometriskā analīzē, 3) Izpētošā gadījumu analīzē, 4) Daudzkritēriju lēmumu analīzē (MCDA), 5) Regresijas analīzē, 6) Izmaksu un ieguvumu analīzē (CBA), 7) Optimizācijas modelis.



2. att. Izmantotās metodes, autores veidots no [1]

Piecas no septiņām izmantotajām metodēm (kvantitatīvā kontentanalīze, bibliometriskā analīze, regresijas analīze, izmaksu un ieguvumu analīze, optimizācijas modelis) ir kvantitatīvā rakstura metodes. Savukārt kvalitatīvā analīze tika veikta, izmantojot vairākas savstarpēji papildinošas metodes. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metode TOPSIS tika izmantota, lai strukturēti salīdzinātu dažādus biometāna integrācijas un izmantošanas scenārijus pēc vairākiem kritērijiem. Izpētošā gadījumu analīze tika lietota, lai identificētu piemērus un attīstības modeļus citās valstīs. Regresijas analīze tika veikta, lai noteiktu kur iespējama ražošanas optimizācija un kādas izejvielas ietekmē saražotā biometāna daudzumu. Papildus veikta Latvijas un ES normatīvā ietvara analīze, lai identificētu regulatīvos ierobežojumus un novērtētu biometāna tirgus attīstības iespējas nākotnē.

Balstoties uz iegūtajiem rezultātiem, izdarīti secinājumi, kas var kalpot par pamatu ilgtermiņā pozitīvai gāzes sektora dekarbonizācijai un spēcīgākai aprites ekonomikas attīstībai.

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, metodiku, rezultātus, secinājumus, literatūras sarakstu, 51 attēlu, 27 tabulas, 28 matemātiskās formulas, kopā 159 lappuses un 222 literatūras avotus.

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 [2]–[6].

Šis process uztver metāna emisijas, kas citādi nonāktu atmosfērā, padarot biometāna ražošanu par efektīvu atkritumu apsaimniekošanas stratēģiju, kā arī līdzekli kopējo siltumnīcefekta gāzu emisiju samazināšanai. 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 [7],[8]. Salīdzinājumam, 2020. gadā biometāna ražošana ES bija ~32 TWh [9], kas nozīmē, ka relatīvi īsā laika periodā biometāna ražošana ES ir jāpalielina 11,6 reizes. Pamatojoties uz *Guidehouse* un Eiropas Biogāzes asociācijas pētījumu, ES biometāna potenciāls 2030. gadā ir 44 miljardi kubikmetru jeb ~430 TWh [10]. 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. Jāņem vērā biometāna ražošanas izmaksas, taču parasti, jo lielāka ražotne, jo zemākas ir ražošanas izmaksas. 2021. gadā vidējās biometāna ražošanas izmaksas bija 84 EUR/MWh iekārtām ar ražošanas jaudu aptuveni 540 Nm^3/h un 54 EUR/MWh iekārtām ar ražošanas jaudu, kas pārsniedz 1200 Nm^3/h . [10] Augstākas CO_2 kvotu un dabasgāzes cenas uzlabo biometāna ražošanas ekonomisko konkurētspēju.

2023. gadā vadošajās Eiropas biometāna ražošanas valstīs bija oficiāli reģistrētas vairāk nekā 1200 biometāna ražošanas iekārtas, kas nodrošināja, ka gāzes sistēmā tika ievadīti vismaz 27 TWh biometāna [11]. Atjaunīgo energoresursu izmantošana, īpaši gāzes sektorā, lai nodrošinātu pakāpenisku pāreju uz tīru enerģiju, ir ļoti aktuāla un svarīga gan Latvijā, gan arī ES kopumā, kur ir jau pieredzējušas biometāna ražotājvalstis, piemēram, Vācija, Francija, Dānija, Nīderlande, Zviedrija un Itālija, gan arī mazāk pieredzējušas valstis, piemēram, Baltijas valstis.

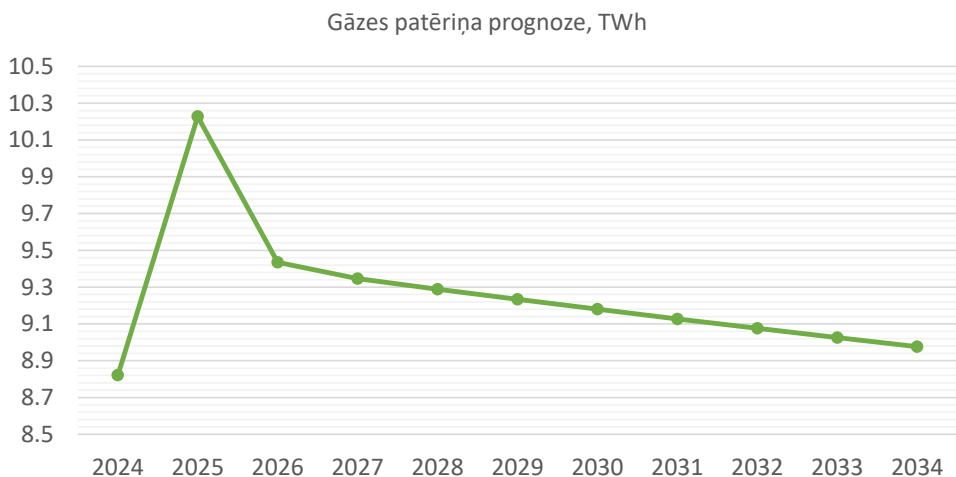
Valstis izvirza arvien ambiciozākus neto nulles emisiju mērķus, tāpēc pāreja uz atjaunīgās enerģijas sistēmām kļūst gan par vides nepieciešamību, gan ekonomisku iespēju. Problēma Latvijā ir neizmantojams biometāna ražošanas potenciāls. Līdz 2024. gadam netika veikta

biometāna ievade savstarpēji savienotajā Latvijas gāzes sistēmā. Vienlaikus, NEKP jau 2030. gadam iezīmē potenciālus pasākumus biometāna veicināšanai. Tie ietver: 1) izvērtējuma izstrādi par biometāna ieguvu lielāko Latvijas valstspilsētu komersantos, kas nodarbojas ar kanalizācijas vai notekūdeņu apsaimniekošanu, 2) vismaz viena centralizēti izmantojama biometāna ievades punkta izbūvi, 3) palielināt biometāna un biodegvielu izmantošanu lauksaimnieciskajā ražošanā, 4) veicināt biometāna ražošanu un ievadīšanu gāzes sistēmā, 5) publisko sašķidrinātā vai saspiestā metāna uzpildes punktu potenciāla attīstīšana jūras vai kravas transportam. Kopējais mērķis ir iecerēts kā biometāna ražošanas un patēriņa palielināšanās ilgākā termiņā.

1.2. Energoresursu patēriņa un cenu 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 m³ biogāzes jeb 0,42 TWh (pārveidei pieņemtā siltumspēja 6 kWh/m³), nenošķirot veidu [12]. Taču tobrīd vēl nebija biometāna ražotņu, kas būtu pieslēgtas gāzapgādes sistēmai, lai biometāns nonāktu Latvijas enerģijas tirgū. 2025. gadā Latvijas gāzapgādes sistēmā tika ievadītas 0,17 TWh Latvijā ražota biometāna, kas ir 143% pieaugums saildzinot ar pirmo biometāna ievades gadu (2024), kad sistēmā tika ievadītas 0,07 TWh.

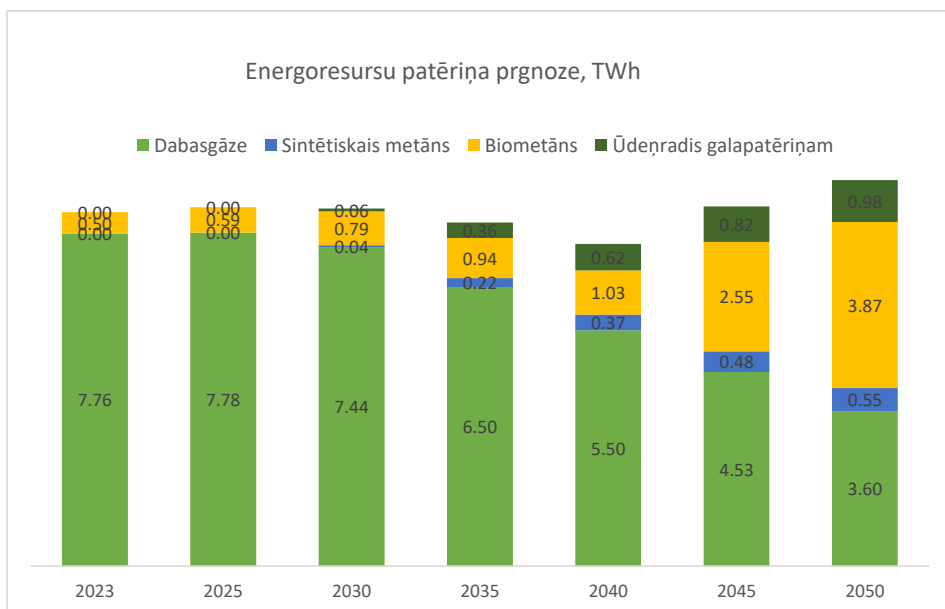
Saskaņā ar pārskatīto Nacionālo enerģētikas un klimata plānu (NEKP) 2021.–2030. gadam, izmantojot Latvijas biometāna ražošanas potenciālu, ir iespējams pilnībā aizstāt visu dabasgāzes patēriņu mājāsaimniecībās, un NEKP paredz noteikt jaunu pienākumu nodrošināt vismaz 3 % atjaunīgo gāzu, piemēram, biometāna, gāzes piegādātāja portfelī, ja tas piegādā dabasgāzi centralizētajai siltumapgādei, taču vienlaikus ir ievērojami jāpalielina biometāna ražošana [13]. Saskaņā ar oficiālo valsts statistiku, 2025. gadā dabasgāzes patēriņš gadā Latvijā bija 8,8 TWh [14]. Latvijas dabasgāzes pārvades un uzglabāšanas sistēmas operators publicē desmit gadu gāzes patēriņa prognozi, kas parādīta 1.1. attēlā.



1.1. att. Gāzes patēriņa prognoze 2024.–2034. gadam Latvijā, TWh [15].

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 nozarēm arī turpmāk būs nepieciešama gāze, kur biometāns varētu kalpot kā ideāla atjaunīga alternatīva. Līdz ar to pat prognozēs līdz 2034. gadam pastāv potenciāls aizstāt daļu dabasgāzes patēriņa ar vietēji ražotu vai potenciāli importētu biometānu, ja vien būs pietiekams valsts pieprasījums.[16]

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 kas var ietekmēt enerģētikas sektora attīstību. Latvijas energobilancē būtiska loma ir dabasgāzei (fosilajam metānam), un svarīgi, lai arī ilgtermiņā saglabātos gāzveida energoresursu loma energoapgādes drošībai un atjaunīgās elektroenerģijas jaudu balansēšanai sistēmā. 1.2. attēlā apkopota gāzveida energoresursu patēriņa struktūras prognoze, ņemot vērā stratēģijas vispārējās energoresursu patēriņa prognozes.

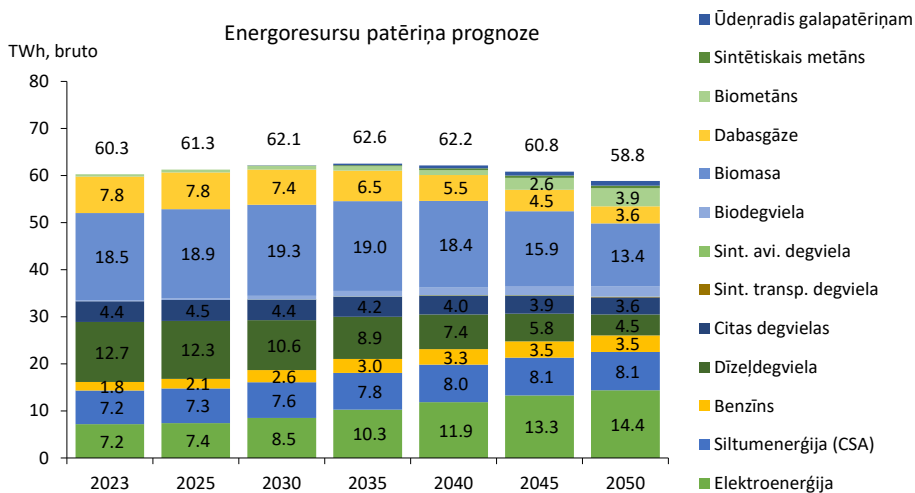


1.2. att. Gāzes patēriņa prognoze 2023. –2050. gadam Latvijā, TWh [autores veidots no[17]].

No Latvijas Enerģētikas stratēģijas bāzes scenārija gāzveida kurināmo patēriņa prognozes summārajām bruto vērtībām redzams, ka dabaszgāzes patēriņš pakāpeniski samazinās no 7,75 TWh 2023. gadā līdz tikai 3,6 TWh 2050. gadā. Savukārt atjaunīgo gāzveida energoresursu īpatsvars patēriņā pakāpeniski pieaug, it īpaši no 2035. gada, 2050. gadā kopumā pārsniedzot 2023. gadā bāzes scenārijā modelēto patēriņu. Arī biometāna patēriņa izaugsme prognozēta vairāk nekā 7 reizes no 0,5 TWh 2023. gadā līdz pat 3,87 TWh 2050. gadā, pārsniedzot dabaszgāzes patēriņu. Prognozēts, ka salīdzinoši mazākos apjomos tiks patērēti arī sintētiskais metāns un no atjaunīgiem energoresursiem ražots ūdeņradis.

Salīdzinot 1.1. attēlā prognozēto dabaszgāzes patēriņu līdz 2034. gadam, kur patēriņš krītas līdz 9 TWh un Enerģētikas stratēģijas bāzes scenārijā prognozēto, kur 2035. gadā dabaszgāzes patēriņš ir 6,5 TWh, vērojamas 2,5 TWh atšķirība. Stratēģijā 2023. gada pieņēmums par dabaszgāzes patēriņu bija 7,76 TWh, savukārt faktiskais dabaszgāzes patēriņš bija 8,2 TWh. Savukārt 2025. gadā dabaszgāzes patēriņš Latvijā bija 8,83 TWh, un ir redzams, ka faktiskais dabaszgāzes patēriņš pārsniedza 2025. gada veidoto prognozi, kas apliecina gāzes lomu energopatēriņa struktūrā.

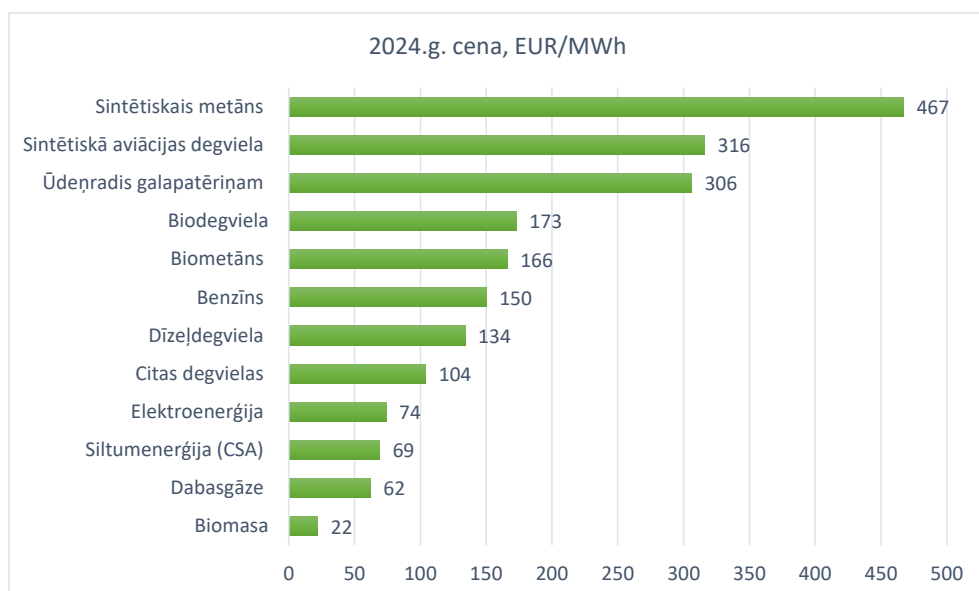
Enerģētikas stratēģija prognozē ne vien gāzveida kurināmo, bet visu energoresursu kopējo patēriņu 2023. – 2050. gadam, kur līdz ar dabaszgāzes patēriņa mazināšanos un atjaunīgo gāzveida kurināmo patēriņa pieaugumu, ievērojami palielinās arī elektroenerģijas patēriņš (1.3.att).



1.3. att. Energoresursu summārā bruto patēriņa izmaiņas Latvijas Enerģētikas stratēģijas bāzes scenārijā [17]

Atjaunīgās elektroenerģijas patēriņa potenciālais pieaugums Enerģētikas stratēģijā skaidrots ar elektroenerģijas īpatsvara pieaugumu transporta sektora vajadzībām. Ņemot vērā transporta dekarbonizācijas centienus, elektroenerģijas patēriņu veidos gan iekšdedzes dzinēju transporta līdzekļu aizvietošana ar elektromotora transportu kā privātajā, tā publiskajā sektorā, kā arī prognozēta gan datu centru un citu energointensīvu nozaru attīstība, kas nodrošinās elektroenerģijas patēriņa pieaugumu. Kopējā energoresursu summārajā patēriņā (1.3. attēlā) redzamas prognozes par elektroenerģijas, siltumenerģijas patēriņa palielināšanos, taču vienlaikus konkrētu attiecīgās enerģijas patēriņa veidu ietekmē cenas.

Energoresursu cena var būt būtisks sektoru ietekmējošs spēks, jo augstāka energoresursu cena sadārdzina gala produktu vai pakalpojumu, kuram nav iespējams tirgus apstākļos konkurēt ar lētāka energoresursa radīto produktu vai pakalpojumu. Enerģētikas stratēģijā ietvertu energoresursu cenu struktūra vizualizēta sekojoši 1.4. attēlā.



1.4. att. Energoresursu cenu prognozes un pieņēmumi [autores veidots no [17] tabulas Nr.2].

1.4. attēlā vizuālas uztveramības dēļ nav iekļauta stratēģijā ietvertā komponente – sintētiskā transporta degviela ar izmaksu aplēsēm 2024. gadā 4248 EUR/MWh. Cenu novērtējums liecina, ka faktiski zem 100 EUR/MWh robežas ir vien elektroenerģija, dabasgāze un biomasa, kamēr atjaunīgo energoresursu cenu prognozes saglabājas ievērojami augstākas. Latvijas Enerģētikas stratēģijā 2050. gadam ir identificēts, ka kopējās nepieciešamās investīcijas pie bāzes scenārija līdz 2050.gadam enerģētikas nozarē (atbilstoši 1.4. attēlā redzamajām cenām) ir 34,4 miljardi EUR. Secināms, ka Latvijai ir nepieciešami aptuveni 1,38 miljardu EUR investīcijas ik gadu, 25 gadu garumā. Pie esošās energoresursu cenu struktūras, attīstība privāto investīciju jomā ar augstu izmaksu intensitāti ir lēna un tās būtiskai paātrināšanai ir nepieciešami atbalsta mehānismi, jo dekarbonizācijas ietvaros atsakoties no lētākiem energoresursiem, ir nepieciešamas lielākas investīcijas energosistēmas stabilitātē, drošumā, atkritumu pārstrādē un citur.

Lai salāgotu klimata un ekonomiskās intereses ir lietderīgi izmantot vietēji pieejamus energoresursus, kas var nodrošināt stabilu bāzes jaudu, laikā kad palielinoties elektroenerģijas patēriņam, saules un vēja enerģija ne vienmēr var būt pieejama. Biogāze un biometāns ir energoresurss, kas var būt vietēji ražots, tāds, kas veicina energodrošību, tai skaitā nodrošinot prognozējamu un nepārtrauktu elektroenerģijas pieejamību, kā arī veicina aprītes ekonomiku, un nav atkarīgs no saules vai vēja mainīgās pieejamības. Arī valsts līmenī kā viens no rīcībpolitika virzieniem ir noteikta pakāpeniska biomasas aizstāšana ar biometānu.

Biometāna loma Latvijas enerģētikas sektorā ir svarīga gan ilgtermiņā līdz 2050. gadam, gan arī īstermiņā līdz 2030. gadam un to apliecina arī pasākumi, kas noteikti ar Ministru kabineta 2024. gada 12. jūlija rīkojumu Nr. 573 “Aktualizētais Nacionālais enerģētikas un klimata plāns 2021.-2030. gadam” jeb NEKP.

Lai arī tikai 2024. gads bija pirmais gads, kad Latvijas gāzes sistēmā nonāca biometāns, NEKP iezīmē tā attīstībai pozitīvus un veicinošus apstākļus. NEKP nosaka mērķi, ka moderno biodegvielu un biogāzes īpatsvaram transportā 2030. gadā jāsasniedz vismaz 5,5 % un vispārējam atjaunīgo energoresursu īpatsvaram transportā jāveido 29%. Lai to īstenotu NEKP noteic, ka jāsniedz atbalsts pašvaldībām, kuras attīsta metāna uzpildes stacijas, lai tās varētu iegādāties sabiedrisko transportu, kas kā degvielu var izmantot biometānu. Biometāna izmantošana varētu būt īpaši izdevīga lielas noslodzes transportlīdzekļiem un sabiedriskā transporta parkiem, kur elektrifikācija, tostarp, klimatisko apstākļu dēļ ir mazāk iespējama. Noteikts arī mērķis sniegt atbalstu publiski pieejamu sašķidrināta vai saspiesta metāna uzpildes staciju izbūvei, kur kā transporta degviela varētu kalpot biometāns, it īpaši tā izmantošana kravu transportā. NEKP arī atzīst vajadzību veicināt biometāna izmantošanu tostarp nosakot atvieglotus akcīzes nodokļa nosacījumus. No 2026. gada 1. janvāra par dabasgāzi kā degvielu piemērojamā akcīzes likme Latvijā ir noteikta 13,45 EUR/MWh, savukārt biometānam akcīzes nodoklis netiek piemērots, kas netiešā veidā, kompleksi ar citiem apstākļiem, var būt stimuls atjaunīgas nevis fosilas izcelsmes metāna izmantošanai.

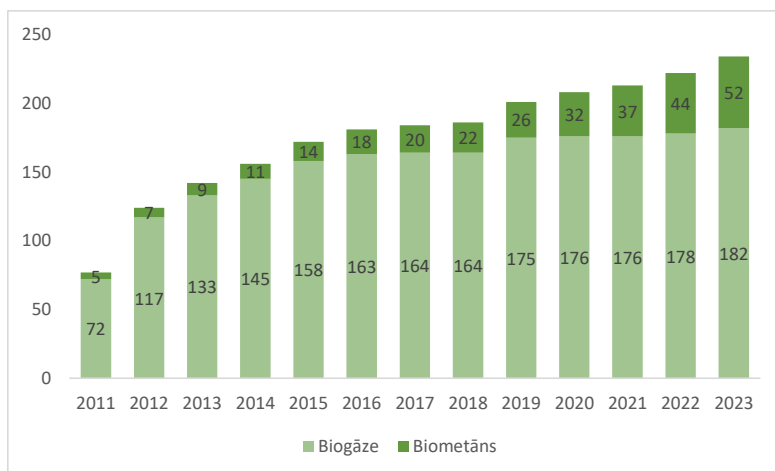
Lai sasniegtu Latvijas mērķus, kas saistīti ar SEG emisiju apjoma mazināšanu, kā arī atjaunīgās enerģijas īpatsvara palielināšanu dažādās nozarēs, tostarp, siltumapgādē un aukstumapgādē (mērķis 66,4 % 2030. gadā) noteikti pasākumi, lai veicinātu biometāna ražošanu un tā ievadīšanu gāzes sistēmā, kā arī, lai nodrošinātu biometāna ražošanu pašvaldībām, kas nodrošina pietiekama apjoma ūdenssaimniecību. Arī dabasgāzes tirgotājiem, kas nodrošina dabasgāzi siltumapgādes vai degvielas uzpildes staciju vajadzībām noteikts pienākums to tirdzniecības portfoliā iekļaut vismaz 3 % atjaunīgās enerģijas, izmantojot biometānu vai ūdeņradi. Ņemot vērā faktiskās gāzes sistēmas tehniskās iespējas un sistēmā ievadāmās kvalitātes raksturlielumus un vērtējot to kopsakarā ar 1.4. attēlā redzamajām energoresursu cenām, sagaidāms, ka šī pienākuma izpildei tehniski un ekonomiski pamatoti ir izmantot biometānu. NEKP nosaka vajadzību īstenot gan biometāna ražotņu pieslēgumus pie gāzes sistēmas, gan attīstīt biometāna ievades punktus, nodrošinot tā nonākšanu tirgū arī sistēmai nepieslēgtiem biometāna ražotājiem. Kompleksi mērķi un pasākumi to sasniegšanai ir vērtējami kā labs priekšnosacījums, lai attīstītu biometāna ražošanu un izmantošanu, tādējādi veicinot gan NEKP noteikto mērķu sasniegšanu no klimata aspektiem, gan maksimāli efektīvi izmantojot vietējo energoresursu potenciālu un attīstot aprites ekonomiku. [13]

1.3. Biometāna izplatība Eiropas Savienībā un Latvijā

ES pieaugošais pieprasījums pēc ilgtspējīgām gāzēm, kas ražotas no atjaunojamiem energoresursiem, cita starpā ir jāizmanto transporta nozarē. Eiropas zaļā kursa mērķis ir līdz 2050. gadam par 90 % samazināt ar transportu saistītās siltumnīcefekta gāzu emisijas [18]. To var izdarīt, integrējot atjaunīgos energoresursus transporta enerģijas struktūrā. 2023. gadā atjaunīgie energoresursi veidoja 10,8 % no transportā patērētās enerģijas visā ES, kas ir par 1,2 % vairāk nekā 2022. gadā reģistrētie 9,6 %. 2024. gadā redzams mērens pieaugums līdz 11,2 % Tomēr tas joprojām ir par 17,8 % mazāks nekā 2030. gada mērķis, kas paredz 29 % transporta enerģijas iegūt no atjaunīgajiem energoresursiem. 2023. gadā Zviedrijā bija vislielākais

atjaunīgo energoresursu īpatsvars transportā, savukārt Latvijā ir viens no zemākajiem atjaunīgo energoresursu īpatsvariem transportā ES - tikai 1,4 %. Savukārt 2024. gadā augstākais atjaunīgās enerģijas lietojums transportā ir Norvēģijai (33,6%), Zviedrijai nokrītoties uz otro vietu (26,4%), taču Latvija 2024. gadā ir palielinājusi atjaunīgās enerģijas izmantošanu transportā līdz 8,8 %, kas joprojām atpaliek no sektora mērķiem. [19]. Tādējādi, transporta un citu sektoru emisiju mazināšanu visā Eiropā var uzskatīt par iespēju Latvijai palielināt atjaunīgo energoresursu ražošanu, kā arī patēriņu gāzes nozarē, attīstot biometāna ražošanu un izmantošanu, tostarp, kā transporta degvielu. Biometāns ir loģiska alternatīva fosilajai dabasgāzei, jo tas ir metāns, kas tiek ražots no atjaunīgajiem energoresursiem un var tikt ievadīts esošajā savstarpēji savienotajā gāzes sistēmā, kā arī tas ir oglekļneitrāls. Tā oglekļa neitralitāte izriet no tā slēgtā oglekļa cikla, kur oglekļa dioksīdu, kas izdalās tā sadegšanas laikā, kompensē oglekļa dioksīds, kas absorbēts, augot organiskajām vielām, ko izmanto kā izejvielu biogāzes ražošanai. Vienlaikus saderība ar esošo gāzes infrastruktūru atvieglo netraucētu ieviešanu bez nepieciešamības veikt plašu infrastruktūras pārbūvi kā tas ir ūdeņraža gadījumā.

Biometāna ražošanas nozīmību apliecina ne vien teorētiskas ambīcijas, bet faktiski uzstādīto biometāna ražošanas iekārtu skaits, kas 2025. gada jūnijā sasniedz jau 1678 biometāna ražotnes visā Eiropā, kas ir gandrīz 3,5 reīžu pieaugums salīdzinot ar vien 483 biometāna ražotnē 2018. gadā.[20] Arī ražošanas apjomi pakāpeniski palielinājušies saskaņā ar 1.5. attēlā atspoguļotajiem datiem.



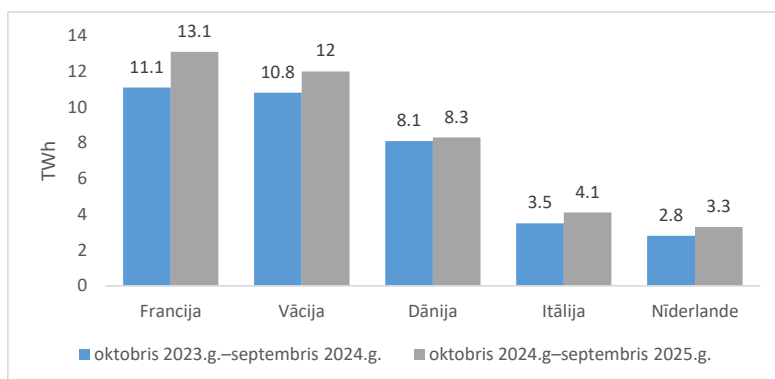
1.5. att. Biogāzes un biometāna ražošana Eiropā, TWh/gadā [21].

1.5. attēlā redzama biogāzes un biometāna ražošanas attīstība Eiropā no 2011. līdz 2023. gadam. Noteiktajā periodā kopējā biogāzes ražošana uzrāda stabilu un nepārtrauktu pieaugumu, palielinoties no aptuveni 72 TWh 2011. gadā līdz aptuveni 182 TWh 2023. gadā. Tas skaidrojams arī ar anaerobās fermentācijas tehnoloģiju ilgtermiņa paplašināšanos un biogāzes pieaugošo lomu Eiropas atjaunīgo energoresursu struktūrā. Vienlaikus biometāna ražošanas pieauguma tendence ir vēl dinamiskāka. Sākot no tikai 5 TWh 2011. gadā, biometāna ražošana strauji palielinās līdz 52 TWh 2023. gadā. Īpaši izteikta izaugsme ir pēc 2018. gada, kas

skaidrojama gan ar jaunām investīcijām, gan arvien lielāku Eiropas un nacionālā līmeņa politisko atbalstu un biometāna identificēšanu kā ilgtspējīgu enerģijas avotu.

Eiropā darbojas vairāk nekā 21 000 biogāzes staciju, kas kopā saražo aptuveni 234 TWh gadā un nodrošina apmēram 7% no ES gāzes pieprasījuma [22]. Vācijā ir lielākais skaits (aptuveni 9500 staciju), pateicoties ilgstošai atbalsta politikas sistēmai. [23],[24] Kopumā secināms, ka pakāpeniski palielinās atjaunīgās gāzes ražošana, ko var izmantot fosilā metāna aizstāšanai.

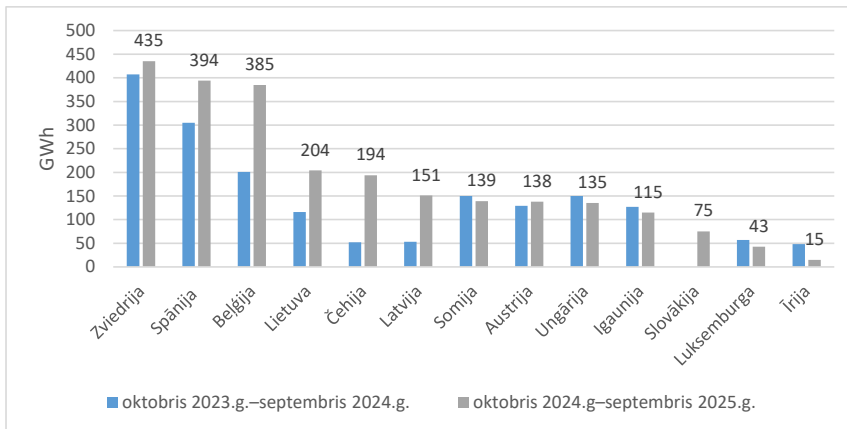
Arī Eiropas gāzes sistēmā novērojama biometāna apjomu pakāpeniska palielināšanās vairumā Eiropas valstu. Periodā no 2024. gada oktobra līdz 2025. gada septembrim lielākie biometāna apjomi ir ievadīti Francijas, Vācijas, Dānijas, Itālijas un Nīderlandes gāzes infrastruktūrā (gāzes pārvades un sadales sistēmās) (1.6. att.). Francijas un Vācijas augstie rādītāji labi saskan ar datiem par lielākajām uzstādītajām biometāna ražotņu jaudām.



1.6. att. Lielākie gāzes infrastruktūrā ievadītā biometāna apjomi, TWh [25].

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. Francijā ilgstoši darbojās *feed-in* (garantētā iepirkuma) tarifu sistēma biometānam, ko ievada gāzes sistēmā, garantējot noteiktus ieņēmumus vismaz 15 gadus, kā arī īstenojot citas subsīdijas lauksaimniecības sektoram. Vācijā sākotnēji tirgu palīdzēja attīstīt *feed-in* tarifi savukārt šobrīd attīstību un biometāna pieprasījumu veido striktas SEG emisiju mazināšanas kvotas transporta sektorā, kur biometānu plaši izmanto kā transporta degvielu sašķidrinātā veidā gan kā *bioLNG*, gan saspīestā stāvoklī kā *bioCNG*. Savukārt Dānijā attīstību virzīja valsts ambiciozie dekarbonizācijas mērķi, *feed-in* tarifu prēmijas un subsīdijas biometāna izmantošanai.

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 (1.7. att.). Zemā attīstībā, cita starpā, ir saistīta ar salīdzinoši nelielu vēsturisko valsts atbalstu mehānismu un nesenu regulatīvā ietvara detalizētu attīstību biometāna lomas stiprināšanai.



1.7. att. Pārējo valstu gāzes infrastruktūrā ievadītā biometāna apjomi, GWh [25]

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.

Atšķirībā no biogāzes, attīrīts biometāns var tikt izmantots ievadei esošajā dabasgāzes infrastruktūrā. Salīdzinājumam, atjaunīgais ūdeņradis tīrā veidā nav efektīvi transportējams esošajā infrastruktūrā, un Eiropā kopumā vērtē iespējas veidot atsevišķu ūdeņradim veltītu infrastruktūru vai atļaut nelielas (2-10%) koncentrācijas ūdeņraža ievadi sistēmā. Tas, ka biometāns brīvi var aizvietot fosilo metānu esošajā infrastruktūrā (pie nosacījuma, ja izpilda noteiktās gāzes kvalitātes prasības, it īpaši skābekļa koncentrāciju), ļauj biometānu elastīgi izmantot vairākās nozarēs, tostarp elektroenerģijas ražošanā, siltumapgādē, rūpniecībā un transportā.

Palielināta biometāna ražošana arī stiprinās enerģētisko neatkarību, vietējo ekonomiku, piegādes drošību un visbeidzot, veicinās ievērojamu siltumnīcefekta gāzu emisiju samazinājumu.

Pēdējos gados globālais pieprasījums ir guvis ievērojamu motivāciju pāriet uz atjaunīgās enerģijas sistēmām un to, cita starpā veicina pieaugošie izaicinājumi, kas saistīti ar klimata pārmaiņām un nepieciešamība pēc energoapgādes drošības un neatkarības [26][27]. Šajā kontekstā biometāns ir kļuvis par daudzsoļu atjaunīgo gāzveida kurināmo, kas var izmantot esošo dabasgāzes infrastruktūru, vienlaikus piedāvājot ievērojamu siltumnīcefekta gāzu emisiju samazinājumu [28], [29]. Neskatoties uz biometāna attīstības potenciālu, tas saskaras ar daudziem savstarpēji saistītiem izaicinājumiem, kas skar tehniskos, ekonomiskos, sociālos un politikas sektorus, īpaši augošos, jaunattīstības biometāna tirgos, kāds ir arī Latvijā [30], [31].

Latvijas enerģētikas nozare atrodas sarežģītā laikā, kas saistīta 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

norīšu kontekstā. Lai gan Latvijā ir gan biogāzes stacijas un dažas biometāna ražotnes, ir svarīgi veicināt nozares attīstības līmeni sistēmiski, lai tuvotos biometāna ražošanas potenciālam [9]. Pastāv neizmantotas iespējas no vides un klimata tvēruma, kā samazināt SEG emisijas un palielināt atjaunīgo energoresursu ražošanu un patēriņu, kā arī nerealizēts valsts ekonomikas potenciāls un ieguvumi, ko veido biometāna nozare [32], [33]. Pašreizējā ražošanas potenciāla pilnvērtīga neapgūšana izriet no dažādiem faktoriem, tai skaitā ierobežotas tehnoloģiskās integrācijas [34], [35].

Būtiska plaisa ir integrētu tehnoloģisko-sociālo vides novērtējumu sistēmu izstrādē un ieviešanā biometāna politikas izstrādē Latvijā [36][37]. Pašreizējās pieejas parasti darbojas izolēti, vides novērtējumus veicot atsevišķi no tehniskās priekšizpētes un sociālekonomiskās analīzes [38]. Šīs sadrumstalotības rezultātā tiek izstrādāti politikas ieteikumi, kuros nav atspoguļota sarežģītā saikne starp dažādām sistēmas komponentēm un ieinteresēto personu vajadzībām [39], [40]. Tāpēc biometāna politikai bieži vien trūkst pamata, kas nepieciešams efektīvai īstenošanai un ieinteresēto personu vēlmei pieņemt biometānu [41].

Biometāna nozarē trūkst arī sarežģītu modelēšanas un prognozēšanas rīku, kas spēj optimizēt ražošanas apjomus mainīgos scenārijos [42], [43]. Pašreizējās pieejas sniedz ierobežotu ieskatu par to, kā izejvielu sastāva, tehnoloģiskās konfigurācijas vai politikas stimulu izmaiņas var ietekmēt biometāna izlaidi, kvalitāti un ekoloģiskās pēdas nospiedumu [44], [45]. Šis zināšanu trūkums ievērojami kavē uz pierādījumiem balstītu lēmumu pieņemšanu starp ražotājiem, investoriem un politikas veidotājiem, kā rezultātā resursu sadalījums ir neoptimāls un netiek izmantotas sistēmas optimizācijas iespējas [46], [47].

Tehniskie risinājumi ir jāpielāgo vietējiem apstākļiem, vienlaikus saglabājot ekonomisko izdevīgumu dažāda mēroga operatoriem [48].

Iespējams, vissvarīgākais ir tas, ka trūkst visaptverošu lēmumu pieņemšanas atbalsta instrumentu, kas īpaši izstrādāti jaunajiem biometāna tirgiem, piemēram, Latvijai [9], [49]. Ieinteresētajām pusēm visā vērtību ķēdē trūkst integrētu platformu, kas vienlaikus varētu risināt tehniskās iespējas, ekonomiskās dzīvotspējas, ietekmes uz vidi un sociālās pieņemšanas faktorus [50], [51]. Plašu lēmumu atbalsta mehānismu trūkums noved pie neoptimāliem ieguldījumiem, politikas nekonsekvencēm un neveiksmīgas sinerģijas starp dažādām sistēmas komponentēm [52], [53].

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. No dažādiem bioenerģijas veidiem biogāze tiek uzskatīta par komerciāli visattīstītāko bioloģisko kurināmo. Pēdējos gados visā pasaulē, īpaši attīstības valstīs, ir novērojama atjaunota interese par biogāzes ražošanu no atkritumos bāzētām izejvielām, jo šī pieeja nodrošina gan vides, klimata, gan socioekonomiskos ieguvumus. 1.1. tabulā apkopots biogāzes sastāvs un koncentrācija.

Biogāzes būtiskākie sastāvā esošie elementi

Biogāzes sastāvs	Koncentrācija
Metāns (CH ₄)	50–80%
Oglekļa dioksīds (CO ₂)	20–50%
Amonjaks (NH ₃)	0–300 ppm
Sērūdeņradis (H ₂ S)	50–5000 ppm
Slāpeklis (N ₂)	1–4%
Skābeklis (O ₂)	<1%

Neattīrīta biogāze pārsvarā var tikt izmantota koģenerācijā – siltumenerģijas un elektroenerģijas ražošanā, siltumenerģijai (boileros), kā arī to attīrot līdz sistēmā ievadāmas gāzes kvalitātei, var ražot biometānu. Biometāns var aizvietot fosilas izcelsmes gāzes izmantošanu, tādējādi nodrošinot ilgtspējīgu un sabalansētu enerģētikas sistēmu darbību.

Latvijā sistēmā ievadāmās gāzes kvalitātes raksturlielumus, līdz kādiem biogāze ir jāattīra, lai iegūtu biometānu, kuru var plaši izmantot dabasgāzes aizstāšanai nosaka Ministru kabineta 2025. gada 21. janvāra noteikumi Nr. 50 “Noteikumi par prasībām gāzveida stāvoklī pārvērstas sašķidrīnātās dabasgāzes, no atjaunīgajiem energoresursiem saražota vai iegūta gāzveida kurināmā un mazoglekļa gāzveida kurināmā ievadīšanai dabasgāzes pārvades un sadales sistēmā”. Šo noteikumu mērķis ir noteikt tehniski pieļaujamos un sistēmas drošai darbībai atbilstošos parametru raksturlielumus, ilgtspējīgai un salāgotai gāzes sistēmas ekspluatācijai. Atbilstoši noteikumiem, lai sistēmā ievadītu atjaunīgo gāzi, tai jāatbilst noteiktiem kvalitātes raksturlielumiem, no kuriem būtiska daļa apkopota 1.2. tabulā.

Sistēmā ievadāmās gāzes kvalitātes raksturlielumu vērtības atbilstoši Latvijā spēkā esošajam tiesiskajam regulējumam

Gāzes sastāvs	Koncentrācija
Metāns (CH ₄)	vismaz 90 % (atbilstoši Enerģētikas likuma 1. panta pirmās daļas j. punktā noteiktajam)
Oglekļa dioksīds (CO ₂)	≤ 2,5%
Amonjaks (NH ₃)	≤ 10,5 mg/m ³
Sērūdeņradis (H ₂ S) + karbonilsulfīds	≤ 7mg/m ³
Slāpeklis (N ₂)	≤ 3 mol%
Skābeklis (O ₂)	≤ 0,5, ja gāzi ievada sadales sistēmā vai pārvades sistēmas daļā, kas nav tieši saistīta ar Inčukalna pazemes gāzes krātuvi ≤ 0,02, ja gāzi ievada pārvades sistēmas daļā, kas ir tieši saistīta ar Inčukalna pazemes gāzes krātuvi

Salīdzinot biogāzes un Latvijā gāzes sistēmā pieļaujamās gāzes komponentu koncentrācijas, redzams, ka biogāzi nepieciešams būtiski attīrīt, lai sasniegtu vismaz 90% metāna koncentrāciju, kā to nosaka Enerģētikas likums. Salīdzinot ar biogāzē esošo CO₂ daudzumu, sistēmā atļauts ievadīt tikai 8-20 reizes mazāku koncentrāciju – līdz 2,5%.

Pārveidojot amonjaka koncentrāciju, kur 300 ppm ir aptuveni 210 mg/m³, secināms, ka arī amonjaka koncentrācija neattīrītā biogāzē aptuveni 20 reizes pārsniedz pieļaujamo. Līdzīgi arī ar sērūdeņradi, slāpekli un skābekli, kas, lai arī ir salīdzinoši nelielās koncentrācijās, ir uzskatāmi par bīstamiem elementiem Latvijas gāzes sistēmai, ņemot vērā to reakciju iespējamību kā virszemes infrastruktūrā, tā arī negatīvo ietekmi uz Inčukalna pazemes gāzes krātuves elementiem, radot koroziju un efektivitātes mazināšanos.

H₂S primārais avots ir mikrobiālā sulfātu/sulfītu reducēšana un organiskā sēra degradācija anaerobās fermentācijas laikā. Arī sēru saturošās aminoskābes (cisteīns, metionīns) no organiskajās izejvielās esošajām olbaltumvielām piedalās H₂S rašanās procesos. Apjoms ir atkarīgs no izejvielu sastāva.[54] N₂ jeb slāpeklis nonāk gāzē no gaisa iekļūšanas sistēmā. Biometāna ražošanai ideālos apstākļos būtu jānotiek bez skābekļa jeb anaerobi, taču tomēr skābeklis biogāzē un biometānā nonāk teorētiski ar izejvielām, gan speciāli to pievadot nelielos daudzumos ražošanas procesos, gan no vaļīgiem savienojumiem, piemēram, blīvēm vai vārstiem kā arī iekārtu apkopju laikā.[55], [56]

Kad biogāzi attīra līdz sistēmā ievadāmās gāzes kvalitātes robežlielumiem, biometāns ķīmiskā sastāva un enerģijas satura ziņā būtiski neatšķiras no fosilās dabasgāzes, līdz ar to, biometānu var ievadīt gan gāzes sadales, gan pārvades sistēmā. Tomēr biometāna oglekļa neitralitāte izriet no tā slēgtā oglekļa cikla, tā sadegšanas laikā emitēto oglekļa dioksīdu kompensē oglekļa dioksīds, kas absorbēts kā izejviela izmantoto organisko materiālu augšanas laikā.

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. Piemēram, kopējās cietvielas (%*TS*) attiecas uz kopējo cietvielu daudzumu, savukārt gaistošās cietvielas (%*VS*) attiecas uz %*TS* organisko frakciju, kas pieejama biogāzes ražošanai, ko laboratorijas apstākļos raksturo pārzāvētu paraugu sadedzināšana diennakts garumā 550 °C temperatūrā. Arī svaigvielu daudzums (*FM*) ir būtisks, jo tas parāda faktisko materiālu daudzumu, ko biogāzes ražošanas operatori ievieto bioreaktoros biogāzes ražošanai.

Gāzes ražību jeb saražotā metāna apjomu tajā parasti izsaka kā saražotās biogāzes vai tīra metāna (CH₄) tilpumu uz vienu gaistošo cietvielu (*VS*), kopējo cietvielu (*TS*) vai svaigvielu (*FM*) vienību. 1.3. tabulā ir apkopotas metāna ražības rādītāji dažādiem biomasas atlikumu veidiem.

Vispārinot 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).
- [57]

1.3. tabula

Biogāzes ražošanas izejvielu izplatītākās vidējās metāna koncentrācijas [58]

Izejviela	m ³ CH ₄ / t VS
Asinis	650

Cukurbiešu atliekas – astes	400 - 1000
Vistu kūtsmēsli	309
Zāles skābbarība	344 - 383
Piena govju kūtsmēsli	236
Salmi	282
Kukurūzas skābbarība	296
Sēnālas (Drabiņas)	259
Dūņas no pārtikas eļļu atlikumiem	1100
Cietie sadzīves atkritumi	386
Spirta rūpnīcu dūņas	400-470
Dārzeņu atlikumi	190-400

Tabulā redzamās vērtības atspoguļo to cik atšķirīga un ietekmēta metāna koncentrācija var būt atkarībā no izejvielām. Un papildu to ietekmē mitrums, temperatūra u.c. kritēriji, kuru analīze ir ārpus šī pētījuma tvēruma. 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. [58]

Politikas konteksts un loma energosistēmā

Pēdējo desmit gadu laikā ES enerģētikas politika ir būtiski mainījusies. Pirms Eiropas zaļā kursa ieviešanas 2019. gadā enerģētikas politika lielā mērā bija vērsta uz konkurētspējīga un labi funkcionējoša ES enerģijas tirgus izveidi. Tolaik atjaunīgā enerģija jau labu laiku bija iekļauta kopējā enerģētikas politikā [59], bet tā vēl nebija tās neatņemama sastāvdaļa. Regulatīvajā līmenī pieeja 2023. gadā pilnībā mainījās, pārskatot Atjaunojamo energoresursu direktīvu [60]. Šajā laikā enerģētikas un klimata politika kļuva pilnībā savstarpēji saistīta un arī sarežģītais ģeopolitiskais konteksts ļāvis noteikt prioritāti enerģētiskajai neatkarībai. Tādējādi uz enerģētikas un klimata politiku raugāties no pavisam citas perspektīvas, un zinātniskie pētījumi aplūko viedus enerģētikas risinājumus, kas var dot labumu gan energoapgādes drošībai, gan klimata un vides mērķiem.

Vienu no šādiem viediem enerģijas risinājumiem var uzskatīt par biometāna izmantošanu. 1.8. attēls ilustrē šī enerģijas avota sarežģīto raksturu, kas var nodrošināt vietējās enerģētiskās drošības vajadzības. Vienlaikus, joprojām pastāv problēmas, tostarp mainīgās ražošanas izmaksas, metāna noplūdes riski un konkurence ar dabasgāzes tirgus cenām [61].

Enerģētikas pārkārtošana Eiropā un visā pasaulē veicina pāreju no fosilā kurināmā izmantošanas uz mazoglekļa un atjaunīgajiem enerģijas avotiem. Daudzas valstis, tostarp Latvija, ir izvirzījušas klimatneitralitātes mērķus 2050. gadam, un atjaunīgo energoresursu un mazoglekļa gāzu ieviešana ir viens no instrumentiem to sasniegšanai. Šajā kontekstā biogāze un biometāns kalpo kā elastīgi un pieejami enerģijas nesēji, kas var papildināt laikā mainīgo atjaunīgo resursu pieejamību.

Biometāns ir nepieciešams, lai palīdzētu efektīvi sasniegt ES klimatneitralitātes un enerģētiskās neatkarības mērķus, vienlaikus aizstājot fosilo dabasgāzi [7], [8], [9], [10], [62].

Viena no biometāna priekšrocībām ir tā, ka to jau var izmantot esošajā dabasgāzes infrastruktūrā, aizstājot dabasgāzi bez papildu vai ar salīdzinoši nelielām investīcijām, un, kā secinājuši *Solferini de Carvalho et al.*, biometāns var ievērojami veicināt enerģijas piegādes stabilitāti [63]. Biometāns sniedz ieguvumus atšķirīgām nozarēm, piemēram, vides ieguvumus (siltumnīcefekta gāzu emisiju samazināšana; samazināts augsnes un ūdens piesārņojums organisko atkritumu izmantošanas dēļ ražošanā) un izmaksu efektivitātes ieguvumus (augstāka energoefektivitāte no biomasas; aprites ekonomika, izmantojot atkritumus enerģijas ražošanai un efektīvi izmantojot resursus) [10]. Vienlaikus biometāns nodrošina ekonomiskās attīstības potenciālu un jaunas darbavietas ārpus pilsētām, uzlabo piegādes drošību un enerģētisko neatkarību, nodrošinot vietēji ražotu enerģiju. Biometāns netieši arī palīdz paplašināt saules un vēja enerģijas nozari, nodrošinot sistēmas stabilitāti un balansēšanu, kad tas nepieciešams, jo biometāns ir bioloģiskas izcelsmes metāns, ko var izmantot atjaunīgās enerģijas balansēšanai un teorētiski var uzglabāt, piemēram, gāzes krātuvēs, ja tas ir attīrīts no skābekļa piemaisījumiem līdz stingri noteiktām gāzes sistēmas kvalitātes prasībām.

Latvijas dabasgāzes patēriņš gadā ir aptuveni 9 TWh. Kā minēts iepriekš, saskaņā ar Latvijas Enerģētikas stratēģiju 2050. gadam, mērķis ir samazināt dabasgāzes patēriņu līdz 3,3 TWh 2050. gadā, vienlaikus palielinot biometāna patēriņu līdz 3,7 TWh gadā. Tas ir īpaši svarīgi saistībā ar elektroenerģijas ražošanas un patēriņa mērķiem 2050. gadam. Pašreizējais elektroenerģijas patēriņš Latvijā ir aptuveni 7,4 TWh/gadā. Aptuveni 35% no tā saražo koģenerācijas stacijas, kas izmanto dabasgāzi. Rūpnieciskās elektrifikācijas rezultātā Latvija 2050. gadā plāno palielināt elektroenerģijas patēriņu līdz 19 TWh. Lai gan šo patēriņu plānots galvenokārt segt ar jauniem sauszemes vēja parkiem (līdz 13,8 TWh/gadā), stratēģijā ir paredzēta pastāvīga nepieciešamība pēc stabilas bāzes slodzes, ko nodrošina koģenerācija. Lai nodrošinātu pāreju uz zaļo enerģiju, biometāns var daļēji aizstāt koģenerācijā izmantoto dabasgāzi [17].

Latvija ir pilntiesīga dabasgāzes importētāja. Kopš 2023. gada likums aizliedz importēt dabasgāzi no Krievijas. Tā kā Latvija neiegūst dabasgāzi, tā turpina importu no citām trešajām valstīm. Tādējādi, kā uzsvērts 1.8. attēlā, vietējā biometāna ražošana palielinātu Latvijas enerģētikas nozares pašpietiekamību un vestu valsti uz enerģētisko neatkarību.

Tehniskās īpašības un integrācija

Viena no būtiskākajām biometāna priekšrocībām ir tā savietojamība ar esošo dabasgāzes infrastruktūru, kas ļauj to integrēt energosistēmā bez būtiskām papildu investīcijām. Ievērojams biometāna ražošanas aspekts ir tā izkliegtā ražošana – tas nav piesaistīts noteiktam gāzapgādes sistēmas izvietojumam un to var ražot gandrīz visur, ja vien tas atbilst ietekmes uz vidi novērtējumam. Biometāna ražošanas iekārtu atrašanās vieta bieži ir atkarīga no pieejamo izejvielu avotu, piemēram, lauksaimniecību vai agrorūpniecības objektu tuvuma, taču tas nav stingri tā ierobežojums. Līdzīgi kā izkliegtai ražošanai, patēriņam var būt līdzīgs modelis, kas ļauj gan tiešas piegādes patērētājiem (piemēram, degvielas uzpildes stacijas transporta patēriņam), gan ievadīšanu gāzes pārvades sistēmā norādītajos ievades punktos vai tiešajos pieslēgumos. Šāda veida

izkliedēta patēriņa iespējas ne tikai palielina enerģētisko drošību [64], bet var potenciāli samazināt izmaksas biometāna ražotājiem, kuriem nav jāizveido pieslēguma cauruļvads gāzes sistēmai. Biometāna savietojamība ar esošo gāzes infrastruktūru atvieglo iespēju to izmantot jau esošajā infrastruktūrā bez nepieciešamības veikt plašu modernizāciju.

Biometāna lietojums

Centralizētās siltumapgādes sistēmu dekarbonizācija ir būtisks izaicinājums ES 2050. gada klimatneitralitātes mērķu sasniegšanā. Biogāze, kas iegūta, organisko atkritumu, lauksaimniecības atlieku un notekūdeņu dūņu anaerobā fermentācijā, piedāvā atjaunīgu alternatīvu fosilajam kurināmajam gan elektroenerģijas, gan siltuma ražošanā [65], [66]. Savukārt centralizētās siltumapgādes sistēmām ir nozīmīga loma siltumapgādes nozares dekarbonizācijā, nodrošinot efektīvu siltuma sadali un atbalstot atjaunīgo un atlikumsiltuma avotu integrāciju.

Neraugoties uz pieaugošo interesi par bioenerģijas integrēšanu centralizētās siltumapgādes sistēmās, pētījumi joprojām ir sadrumstaloti un bieži koncentrējas uz vienu gadījuma izpēti vai konkrētu aspektu. Liela daļa esošā darba aplūko konkrētas tehnoloģiskās vai reģionālās dimensijas, savukārt integrētie salīdzinošie novērtējumi, kas apvieno darbības, ekonomikas un vides perspektīvas dažādos kontekstos, ir retāk sastopami un parasti nepietiekami izpēti.

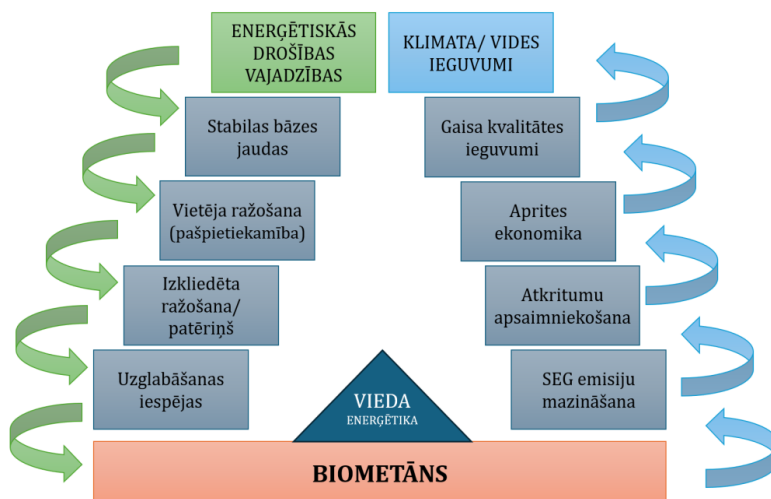
Viens no pētījuma mērķiem ir analizēt divus reprezentatīvu gadījumu piemērus - izpētes rezultātus - analizēt Somijā izmantoto Backbone modeli un *Leeuwen* izstrādātā centralizētās siltumapgādes koncepciju Nīderlandes pilsētai Meppel, lai identificētu kopīgas metodoloģiskās pieejas, rezultatīvos rādītājus un galvenās atziņas par biogāzes un biometāna lomu ilgtspējīgās centralizētās siltumapgādes sistēmās.[67]

Biometānu var izmantot arī elektroenerģijas ražošanai koģenerācijas stacijās. Plašais lietojums nodrošina gan atjaunīgo elektroenerģijas avotu, gan palielina efektivitāti, izmantojot procesa laikā radīto siltumu.

Enerģētikas nozarē biometāns var kalpot kā elastīgi pieejams atjaunīgais kurināmais, nodrošinot tīkla stabilitāti un sezonālu enerģijas uzkrāšanu, kad nav pieejami mainīgi atjaunīgie energoresursi, piemēram, vējš un saule. To var uzglabāt pazemes gāzes krātuvēs, transportēt pa esošajiem cauruļvadiem vai izmantot uz vietas elektroenerģijas un siltumenerģijas ražošanai koģenerācijā (CHP). [68] Siltumapgādē un rūpnieciskajos procesos biometāns var aizstāt fosilo dabasgāzi katlos, centralizētās siltumapgādes tīklos un industriālajā ražošanā, kur tiek izmantotas augstas temperatūras, piemēram, cementa vai stikla ražošanā, tādējādi samazinot CO₂ un NO_x emisijas.[69]

Biometāns kā tīra degviela transportlīdzekļiem piedāvā ilgtspējīgu alternatīvu dīzeļdegvielai un benzīnam. Tas ir īpaši izdevīgi lielas noslodzes transportlīdzekļiem un sabiedriskā transporta parkiem, kur elektrifikācija ir apgrūtināta un grūtāk piemērojams variants. Transporta nozarē saspīests vai sašķidrināts biometāns (bio-CNG/LNG) ir viena no nobriedušākajām alternatīvām lielas noslodzes transportlīdzekļu un jūras transporta dekarbonizācijai, jo īpaši reģionos ar ierobežotu elektrifikācijas potenciālu. Pētījumi

liecina, ka biometāna izmantošana transportā var samazināt aprites cikla SEG emisijas par 80 - 90 % salīdzinājumā ar dīzeļdegvielu.[70], [71]



1.8. att. Biometāna kā vieda energoresursa loma enerģētiskajai drošībai un klimata / vides ieguvumiem, ko izstrādājusi autore.

Līdzīgi kā enerģētiskās drošības vajadzības, ko sedz biometāna integrācija energosistēmā, kā parādīts 1.8. attēlā, biometāns savukārt var sniegt ļoti pozitīvus ieguvumus klimata un vides nozarei, parādot, kā biometāns var kalpot gan kā atjaunīgs enerģijas avots, gan arī kā vieds enerģijas instruments.

1.8. attēla labajā pusē redzams, ka, lai gan biometāns darbojas energoapgādes drošības pamatprincipu sasniegšanā, tas vienlaikus nodrošina, ka enerģētikas nozare veicina globālo klimata un vides mērķu sasniegšanu.

Vides un klimata ieguvumi

Biometāna dzīves cikla emisijas ir ievērojami zemākas nekā fosilā kurināmā emisijas, veicinot vispārējo dekarbonizāciju. Pārvēršot organiskos atkritumus enerģijā, biometāna ražošana atbalsta aprites ekonomikas principus.[6]

[72]Atkritumu apjomu statistika ES nav ikgadēja, jo īpaši sadalījumā pa nozarēm. Jaunākie pieejamie dati liecina, ka 2020. gadā ES kopumā radīja 2,2 miljardus tonnu atkritumu, no kuriem 21,4 milj. tonnu izcelsme ir lauksaimniecības nozarē, kas veido aptuveni 1 % no kopējā radīto atkritumu daudzuma.[72]

Tā kā biometāns tiek ražots no dažāda veida atliekām, jo īpaši bieži no lauksaimniecības atkritumiem, tas nepārprotami samazina atkritumu daudzumu un veicina aprites ekonomiku, dodot iespēju efektīvi izmantot lauksaimniecības atkritumus, pārtikas pārstrādes atkritumus, dūņas un citus organiskos atkritumus. Pašlaik Eiropas aprites līmenis ir aptuveni

12 %, un saskaņā ar ES Tīras rūpniecības vienošanos mērķis ir līdz 2030. gadam to divkāršot līdz 24 %. Pārvēršot lauksaimniecības atliekas, organiskos atkritumus un citus blakusproduktus atjaunīgā enerģijā, tas palīdz īstenot resursu apriti. Tas arī tieši risina vienu no bioloģiskās daudzveidības zuduma pamatcēloņiem – resursu ieguvu un pārstrādi, kas veido aptuveni 90 % no bioloģiskās daudzveidības samazināšanās visā pasaulē.[73]

Biometāna ražošana kā risinājums savukārt nodrošina arī mazāku emisiju daudzumu gaisā. Pētnieki lēš, ka biometāna ražošana varētu samazināt siltumnīcefekta gāzu emisijas līdz pat 60-95%.[74] Biometāns palīdz ES samazināt emisijas vairākos veidos. Pirmkārt, tas uztver metānu, kas izdalās no organiskajiem atkritumiem, kūsmēsliem vai notekūdeņiem, kas citādi izplūst atmosfērā. Otrkārt, biometāns aizstāj fosilo kurināmo siltumapgādē, elektroenerģijas ražošanā, transportā un rūpniecībā, samazinot CO₂ emisijas no fosilās enerģijas izmantošanas. Dažos gadījumos process var pat radīt neto negatīvas emisijas, kad tiek uztverts vai atkārtoti izmantots CO₂, kas rodas biogāzes attīrīšanas procesā. Treškārt, biometāna ražošanas blakusprodukti, piemēram, digestāts, var aizstāt sintētiskos mēslošanas līdzekļus, samazinot mēslošanas līdzekļu ražošanas emisijas. Attīrītu biogēno CO₂ plūsmu var izmantot arī rūpniecībā fosilā CO₂ vietā.[75]

Inovātīva biometāna izmantošana

Papildu tradicionālajiem biometāna izmantošanas mērķiem, tostarp siltumenerģijas un elektroenerģijas ražošanai, rūpnieciskajiem procesiem, to var izmantot inovatīvos biotehnoloģiskos procesos, piemēram, proteīna (olbaltumvielu) sintēzei. Tā daudzpusība izriet no ķīmiskās līdzības ar dabasgāzi, kas ļauj to tieši ievadīt esošajā gāzes sistēmā vai izmantot ārpus sistēmas ar minimālu infrastruktūras pielāgošanu. [76]

Papildus tradicionālajiem enerģijas lietojumiem biometāns sniedz arī rūpniecisko izejvielu aizstāšanas un bioproduktu sintēzes iespējas. Piemēram, metāns var kalpot kā substrāts mikrobu proteīna ražošanai, izmantojot metanotrofu fermentāciju, kur biotehnoloģiskā procesā baktērijas izmanto metānu kā enerģijas avotu viensūnas proteīna ražošanai.[77], [78] Metanotrofās fermentācijas process pārvērš metānu biomasā ar augstu olbaltumvielu saturu, kas piemērota akvakultūrai vai lopbarībai, kas ir aprites bioekonomikas risinājums, kas atjaunīgo gāzi pārvērš pārtikas un barības resursos, vienlaikus samazinot atkarību no zemes ietilpīgas sojas pupu audzēšanas [79]. Metāna pārveidošanas efektivitāte proteīnā var pārsniegt 60%, un process var iegūt līdz 1,5 tonnām olbaltumvielu uz tonnu patērētā metāna.[78], [80] Pretstatā tam, viensūnu proteīns piedāvā ilgtspējīgu alternatīvu, jo tā ražošanai nepieciešams daudz mazāk zemes, un tā rada mazāku ietekmi uz vidi. Viensūnu proteīns satur 30 - 70% olbaltumvielu, atkarībā no izmantotā mikroorganisma, un ir bagāts ar lietderīgām aminoskābēm, piemēram, arginīnu un glutamīnskābi, padarot to par ļoti uzturvielām bagātu produktu. Tās ražošana var mazināt pasaules pārtikas un olbaltumvielu krīzi, vienlaikus uzlabojot vides un cilvēku veselību. [81]

Viensūnu proteīns var tikt ražots no metāna, tostarp, biometāna, izmantojot metanotrofās baktērijas, piemēram, *Methylococcus capsulatus* un *Methylomonas*, kas pārvērš metānu ar proteīnu bagātā biomasā. Atšķirībā no organiskajiem atkritumiem, piemēram, ēdināšanas

uzņēmumu pārtikas atlikumiem, kuru izmantošana kukaiņu olbaltumvielu ražošanā nav atļauta, no biogāzes iegūts metāns ir atļauts substrāts viensūnu olbaltumvielu (*single cell protein*) ražošanai [82].

Šis iegūtais viensūnu proteīns ir daudzsološs un ilgtspējīgs barības avots akvakultūrai un lopkopībai, turklāt tām ir papildu veselības ieguvumi, piemēram, aizsardzība pret sojas miltu izraisītām slimībām. Vienlaikus, šāda proteīna ražošana, nav plaši izplatīta. [83], [84]

Proteīna ražošanas no metāna process sniedz vairākas priekšrocības, piemēram, nodrošina augstu gāzes pārveides efektivitāti, kur potenciāli iespējams pārvērst 142 miljardus m³ metāna vairāk nekā 60 miljonus tonnu proteīna gadā un tas neaizņem lauksaimniecības zemi. [83]

Kopumā viensūnu proteīna ražošana no metāna ir alternatīva pārtikas ražošanai ar samazinātu ietekmi uz vidi, kas mazina metāna emisijas.

Šādi inovatīvi lietojumi parāda, ka biometāns ir gan enerģijas nesējs, gan daudzfunkcionāls bioresurss, kas savieno enerģētikas, rūpniecības un lauksaimniecības nozares. Nodrošinot atkritumu valorizāciju, fosilā kurināmā aizvietošanu un bioproduktu ar pievienoto vērtību ražošanu, biometāns atbalsta pāreju uz integrētām aprites bioekonomikas sistēmām, kas vienlaikus veicina energoapgādes drošību, klimata pārmaiņu mazināšanu un ilgtspējīgu lauku attīstību. Tādējādi biometāns arī atbalsta grūti elektrificējamu nozaru dekarbonizāciju, un, tā kā tas tiek ražots vietējā līmenī, tas stiprina energoapgādes drošību, vienlaikus izvairoties no emisijām, kas saistītas ar importēto fosilo kurināmo.

1.5. Palielināta biometāna īpatsvara radītie riski gāzes infrastruktūrai

Eiropas enerģētikas sektors patlaban ievērojami mainās – atjaunīgā enerģija un tās avoti nostiprina savu lomu. Lai arī enerģētikas politikā nenoliedzami dominē elektroenerģija, metāns un it īpaši gāzes krātuves ir vērtīga energosistēmas daļa, kas sniedz savu ieguldījumu vairākos aspektos. Latvijā viena no lielākajām enerģētikas infrastruktūras vērtībām ir Inčukalna pazemes gāzes krātuve (PGK) ar aptuveni 24 TWh aktīvās gāzes ietilpību. Šī sezonālā enerģijas krātuve ir ekonomikas stūrakmens, nodrošinot efektīvu un relatīvi lētu liela apjoma enerģijas uzglabāšanu kā nacionālā mērogā, tā visam reģionam. Krātuvei piemīt darbības režīmu elastība, lai veidotu enerģijas uzkrājumu periodiem ar augstu pieprasījumu, un pēc modernizācijas tā spēj strauji mainīt dabasgāzes izņemšanas vai iesūkņēšanas apjomu vienas dienas laikā. Inčukalna PGK ir būtiska loma apgādes drošībā, garantējot minimālo izņemšanas jaudu 80 – 100 GWh/dienā.

Iepriekš minētie iemesli apliecina Inčukalna krātuves svarīgo lomu un nozīmi Latvijas un reģiona energostabilitātes nodrošinājumā, taču, sistēmā ienākot atjaunīgajām gāzēm, pazemes gāzes krātuves, it īpaši ūdens nesējslāņa tipa krātuves, kāda ir Inčukalna PGK, saskaras ar draudiem to drošai un ilgtspējīgai darbībai.

ES vērienīgie dekarbonizācijas centieni ir paātrinājuši atjaunīgo gāzu integrāciju esošajā dabasgāzes infrastruktūrā. Biometāns, kas iegūts, attīrot biogāzi, kas savukārt iegūta no organiskajiem atkritumiem, lauksaimniecības atlikumiem un citām bioloģiskām enerģijas kultūrām, ir uzskatāms par fosilās gāzes aizstājēju ar plašu lietojumu. Latvija, kuras tautsaimniecībā loma ir lauksaimniecības un mežsaimniecības nozarēm, ir noteikusi biometāna

ražošanu kā svarīgu Nacionālā enerģētikas un klimata plāna 2021.-2030. gadam sastāvdaļu. [13] [8]

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 īpatsvara palielinājums sistēmā.

Biometānam pirms ievadīšanas gāzes sistēmā ir jāatbilst stingrām sistēmā ievadāmās gāzes kvalitātes prasībām, ko nosaka Noteikumi Nr. 50. [85]

Noteikumu Nr. 50 pielikumi, kas nosaka kvalitātes prasības gan sistēmā ievadāmajai dabasgāzei, gan biometānam, nosaka, ka pieļaujamā skābekļa jeb O_2 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. [86] Šie procesi var izraisīt finansiāli ietilpīgus infrastruktūras bojājumus, samazinātu uzglabāšanas efektivitāti un attiecīgi radīt arī gāzapgāzes drošības apdraudējumus.

Tātad ir jāmeklē veidi, kā nepieciešamību izmantot atjaunīgo enerģiju līdzsvarot ar Latvijas un reģiona energoapgādes drošuma un ilgmūžības nodrošinājumu.

Skābekļa nonākšana gāzes sistēmā

Biometāns ir augstas tīrības pakāpes metānu saturoša gāze, kas tiek iegūta, attīrot biogāzi, kura ražota organisko vielu anaerobās fermentācijas vai termokīmiskās pārveidošanas rezultātā. No biogāzes tiek atdalīti tādi piemaisījumi kā oglekļa dioksīds (CO_2), sērūdeņradis (H_2S), ūdens tvaiki, silīcija savienojumi un citi gāzes piemaisījumi, lai tā atbilstu sistēmā ievadāmās gāzes kvalitātes standartiem. Biometāns var kalpot kā aizvietotājs fosilajam metānam jeb dabasgāzei, taču izaicinājumus var radīt biometāna ķīmiskais sastāvs, kur to galvenokārt veido metāns, taču izaicinājumus rada tajā esošais skābekļa daudzums. Katrai biogāzes attīrīšanas tehnoloģijai ir atšķirīgas priekšrocības un trūkumi attiecībā uz efektivitāti un jo īpaši skābekļa atdalīšanas iespējām:

- Ūdens skruberis efektīvi attīra CO_2 un H_2S , bet tam ir ierobežota ietekme uz skābekļa atdalīšanu.
- Spiediena svārstību adsorbcija (*PSA*) var daļēji samazināt skābekļa saturu, bet bieži vien ir nepieciešami papildu attīrīšanas posmi.
- Ķīmiskā adsorbcija galvenokārt koncentrējas uz CO_2 atdalīšanu ar minimālu skābekļa atdalīšanu.
- Ar membrānu tehnoloģiju var sasniegt augstu biometāna tīrības pakāpi, bet atkarībā no membrānas materiāla īpašībām var notikt skābekļa caurlaidība.
- Kriogēnā atdalīšana var nodrošināt efektīvu skābekļa atdalīšanu, bet ar lielākām enerģijas un kapitāla izmaksām. [87]

Neraugoties uz biogāzes ražošanas anaerobo dabu, līdz ar biometāna ievadi sistēmā nonāk arī biometānā esošais skābeklis, un, lai arī tā koncentrācija ir salīdzinoši neliela, gāzē esošais skābeklis rada būtiskus izaicinājumus un riskus gāzes infrastruktūrai.

Kāpēc skābeklis rada riskus un izaicinājumus pazemes gāzes krātuvēm?

PGK ir būtiska enerģētikas infrastruktūras sastāvdaļa, kas kalpo kā ievērojams enerģijas akumulators, nodrošinot sistēmas stabilitāti laikā, kad mainīgie atjaunīgie energoresursi to nespēj palielināta pieprasījuma dēļ. Vēsturiski gan gāzes cauruļvadu, gan krātuvju sistēmas ir transportējušas un uzglabājušas fosilas izcelsmes metānu jeb dabasgāzi, kuras sastāvā jebkāda skābekļa klātbūtne praktiski nebija iespējama tās izcelsmes dēļ. Mūsdienās, palielinoties atjaunīgo resursu īpatsvaram, tostarp biometānam iegūstot lomu enerģētikas sektorā, sistēmu operatori saskaras arī ar palielinātu koncentrāciju noteiktiem līdz šim nebijušiem (fosilajā metānā skābekļa nav) gāzes kvalitātes parametriem sistēmā. 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. Risku shematisks atainojums apkopots 1.9. att.



1.9. att. Skābekļa radīto risku iedalījums.

Infrastruktūras korozija

Skābeklis ir galvenais korozijas izraisītājs PGK. Skābeklim nonākot pārvades cauruļvados, krātuves urbumos un saskarē ar saistīto tehnoloģisko aprīkojumu, tas reaģē ar mitrumu un metāla virsmām, kuras plaši izmanto gāzes infrastruktūrā. Ķīmiskās reakcijas rezultātā veidojas dzelzs oksīds (rūsas), kas izraisa virsmu bojājumus un, ja netiek kontrolēts, turpina attīstīt tālākus sistēmas bojājumus.[88]

Korozija apdraud uzglabāšanas sistēmas nedalāmību un darbības stabilitāti, tā arī paaugstina ekspluatācijas izmaksas. Biežākas pārbaudes, katodiskā aizsardzība un bieža aprīkojuma detaļu nomaiņa palielina sistēmas ekspluatācijas izmaksas.[89] Turklāt slēpta iekārtu vai cauruļvadu korozija var izraisīt gāzes noplūdes, kas apdraud drošību un vidi. Vienlaikus, Latvijā vienotais dabasgāzes pārvades un uzglabāšanas sistēmas operators veic regulāru uzraudzību un atbilstošu ekspluatāciju gan pārvades, gan krātuves sistēmai, lai novērstu šādus riskus atbilstoši starptautiskiem standartiem un nacionāli noteiktai kārtībai.

Mikrobu augšana un bioloģiskais apaugums

Ūdensnesēja slāņa pazemes gāzes krātuvju pētījumi apliecina: šāda veida krātuves ir zināmas kā anaerobas jeb tādas, kurās nav brīvā skābekļa, bet var būt citi komponenti, un tās kalpo kā ekosistēmas, kurās mīt dažādi anaerobie mikrobi.

Pat šķietami neliela skābekļa daudzuma nonākšana vidē, kurā nav skābekļa, veicina aerobo mikroorganismu vairošanos un anaerobo mikroorganismu mazināšanos, izjaucot ģeoloģiskajās struktūrās esošo mikrobioloģiju. Aerobs ir tāds, kura attīstībai, augšanai nepieciešams gaiss, skābeklis savukārt tā pretstats ir anaerobs. Tas rada risku, ka aerobie mikrobi var sākt vairoties gāzes krātuves sistēmas mitrās vietās un veidot bioplēves, kas aizsprosto filtrus un cauruļvadus, pasliktinot gāzes plūsmas efektivitāti.[90]

Pastāv arī risks, ka mikrobi var sākt radīt sekundārās gāzes, piemēram, oglekļa dioksīdu (CO₂), kas pasliktina uzglabātās dabasgāzes kvalitāti un rada papildu korozijas risku. Daži pētījumi liecina, ka mikrobu aktivitāte, īpaši krātuvēs vai augsta spiediena apstākļos, var ietekmēt gāzes sastāvu un sistēmas stabilitāti.[91], [92]

Drošības apdraudējumi

Skābeklis palielina nekontrolētu oksidācijas reakciju iespējamību, jo īpaši kompresijas, ievades vai izņemšanas sezonas laikā, ja kādu iemeslu dēļ PGK nonākusi gāze ar tās sastāvā esošu skābekli. Retos gadījumos augsta spiediena un temperatūras apstākļos var notikt spontāna degšana, ko izraisa skābekļa eksotermiska reakcija ar oglekļaūdeņražiem vai materiāliem sistēmā.[93]

Pat mazāk ekstrēmos gadījumos skābekļa klātbūtne palielina gāzes maisījuma uzliesmošanas risku, kā arī riskus saistībā ar noplūdēm vai nevēlamu sistēmas ekspluatāciju.

Piesardzība Inčukalna PGK darbības ilgtermiņa nodrošināšanai

Inčukalna PGK ir būtiska nozīme reģionālajā energoapgādes drošībā. Tomēr krātuves ģeoloģiskā struktūra rada nepieciešamību attiekties pret to ar īpašu rūpību un piesardzību, it īpaši saistībā ar skābekli un citiem gāzes piemaisījumiem, kas ar plūsmām nonāk Inčukalna PGK tuvumā.

Inčukalna PGK atrodas zemes dziļēs, porainā smilšakmens slānī, kas būtiski atšķiras no sāls kavernām vai cieto iežu veidojumiem, ko izmanto kā gāzes uzglabāšanas sistēmas citviet. Smilšakmens ir ķīmiski reaģētspējīgāks un satur dabiskus minerālvielu komponentus, kas var mijiedarboties ar skābekli. Ilgstoša skābekļa iedarbība var izraisīt minerālu oksidāciju, mainot tā porainību. Šīs izmaiņas var ietekmēt gāzes plūsmas dinamiku un samazināt krātuves ilgtermiņa efektivitāti.[94]

Ņemot vērā Inčukalna PGK stratēģisko lomu sezonālā gāzes pieprasījuma līdzsvarošanā un gāzapgādes drošībā, gāze krātuvē parasti tiek uzglabāta ilgāku laiku – vairākus mēnešus, gadus vai pat piecgadi, atkarībā no izvēlēta krātuves uzglabāšanas produkta veida. Šāds uzglabāšanas termiņš palielina varbūtību, ka, skābeklim klātesot, tas krātuves infrastruktūrā uzsāks un uzturēs nevēlamas ķīmiskās un mikrobioloģiskās reakcijas, kas ilgākā laikā var to būtiski bojāt.

Faktiski krātuves iekārtas darbojas pēc sezonāla iesūkņēšanas (vasarā) un izņēšanas (ziemā) grafika. Šie cikli dabiski ietekmē krātuves ķīmisko un spiediena līdzsvaru. Ja iesūkņēšanas laikā tiktu ievadīts skābeklis, katrs cikls var pastiprināt tā izplatību visā ģeoloģiskajā struktūrā. Laika gaitā kumulatīvā skābekļa iedarbība palielinās korozijas, mikrobu aktivitātes un ģeoloģiskās struktūras vispārējā stāvokļa pasliktināšanās risku.

Ņemot vērā šos faktorus, stingra skābekļa līmeņa kontrole gāzē, kas tiek transportēta gāzesvados, it īpaši tajos, kas ir savienoti ar Inčukalna PGK, ir būtiska, lai saglabātu Inčukalna PGK iekārtu drošību, darbības efektivitāti un ilgmūžību.

Monitorings un ietekmes mazināšanas stratēģijas

Latvijā un citviet Eiropā pakāpeniski veidojas biometāna tirgus, pieaug tā ražošana un arī patēriņš. Latvijā biometāna ievade sistēmā sākusies salīdzinoši neseno: pirmā biometāna ražotne, kura tika pieslēgta dabasgāzes sadales sistēmai, atklāta 2024. gada jūlijā. Tā kā Latvijas gāzes sistēma ir tieši starpsavienota ar Lietuvi un Igauniju, kā arī netieši ar Somiju un Rietumeiropas gāzes sistēmu, tajā no kaimiņvalstīm nonāk gāzes plūsmas, kuru sastāvā var būt paaugstināta skābekļa koncentrācija citviet ievadītā biometāna dēļ. Turklāt citās valstīs ievadāmās gāzes kvalitātes kritēriji var atbilst zemākām prasībām, jo tajās nav pazemes gāzes krātuvju un ar tām saistīto izaicinājumu.

Lai veiksmīgi turpinātu biometāna integrāciju esošajā gāzes infrastruktūrā, svarīga loma ir gāzes uzskaitē un kvalitātes kontrolei. Atbilstoši Enerģētikas likuma 112. panta deviņpadsmitajai daļai vienotajam dabasgāzes pārvades un uzglabāšanas sistēmas operatoram ir pienākums veikt nacionālajā dabasgāzes ieejas-izejas sistēmā ievadāmās dabasgāzes uzskaiti un kvalitātes kontroli, tostarp nodrošināt tam nepieciešamo iekārtu kopuma ierīkošanu. Sistēmā ievadītās gāzes kvalitātes kontrole ir daļa no kompleksiem pasākumiem, kas kalpo kā skābekļa un citu komponentu ietekmes mazināšanas stratēģija, lai nodrošinātu gāzes sistēmas drošību, efektīvu un ekonomiski pamatotu darbību.

Skābekļa, sēra un citu gāzes kvalitātes parametru monitorings tiek veikts noteiktos gāzes sistēmas punktos. Monitorings ir svarīgs, jo, kā jau minēts, šo vielu klātbūtne rada būtiskas sistēmas darbības problēmas. Sēra klātbūtni Latvijas gāzes pārvades un krātuves sistēmā nosaka hromatogrāfiski, spektroskopiski vai elektroķīmiski. Sēra savienojumi, piemēram, sērūdeņradis (H_2S) rada koroziju, skābeklis var oksidēt sēru, tādējādi radot cietu vielu, kura mitrā vidē arī ierosina koroziju, aizsprosto PGK iežu poras un izraisa dažādu mērīšanas, kā arī gāzes regulēšanas iekārtu darbību traucējumus. Skābekli Latvijas dabasgāzes pārvades un krātuves sistēmā nosaka dažādos veidos - hromatogrāfiski, elektroķīmiski vai optiski. Tas ir spēcīgs oksidētājs ar primāri korozīvu iedarbību mitrā vidē un kopā ar sēra savienojumiem rada piroforo dzelzi jeb "melno pulveri". Tas var izraisīt cauruļvadu un urbumu bojājumus, kā arī sabojāt sūkņu blīves, vārstus un kompresorus. Visu šo komponentu regulāra uzraudzība, apkope un nomaiņa prasa būtiskus resursus un, palielinoties sistēmā ievadītajam biometāna daudzumam (attiecīgi arī skābekļa, sēra un citiem savienojumiem), ir jārēķinās ar arvien pieaugošām gāzes pārvades un krātuves sistēmas ekspluatācijas izmaksām.

Tehniskās prasības biometāna ievadei esošajās gāzes sistēmās Eiropas valstīs galvenokārt nav harmonizētas, taču skābekļa saturs parasti noteikts robežās no 0,001 - 1 mol % atkarībā no sistēmas, kurā gāzi ievada (sadales sistēmās pieļaujama salīdzinoši augsta O₂ koncentrācija, vidēji 0,5 - 1 mol%, savukārt pārvades sistēmās 0,001 - 0,5 mol %), nacionālā regulējuma un gāzes cauruļvadu parametriem. Galvenais paņēmieni, kā pasargāt gāzes infrastruktūru no skābekļa nonākšanas tajā, ir nodrošināt atbilstošu ievadītās gāzes kvalitāti. Tas savukārt paredz pienācīgu biogāzes attīrīšanu, pārveidojot biometānu līdz sistēmā ievadāmās gāzes kvalitātei.[95], [96] Vienlaikus izaicinājums ir visā Eiropā saskaņotu gāzes kvalitātes standartu trūkums. Katra valsts nosaka savai sistēmai piemērotus gāzes kvalitātes raksturlielumus, taču savstarpēji savienotā sistēmā gāze Eiropā brīvi plūst pāri robežām, bieži vien radot galvassāpes gāzi saņemošajiem sistēmu operatoriem atšķirīgo parametru dēļ. Šīs atšķirības var kavēt vai ierobežot biometāna pārrobežu tirdzniecību. Harmonizēts gāzes kvalitātes standarts atvieglotu efektīvu pārrobežu gāzes transportēšanu, nodrošinātu sistēmas drošību un veicinātu arī tirgus attīstību. Eiropas Standartizācijas komitejas (CEN) izstrādātais gāzes kvalitātes standarts *EN 16726* ir piemērs kopīgajiem centieniem regulējuma saskaņošanā un tirgus integrācijā. Standarta mērķis ir uzlabot gāzes sistēmu vienotu darbību visās ES dalībvalstīs. Tomēr standarta pieņemšana ir brīvprātīga, tāpēc šajā ziņā joprojām pastāv problēmas. Standarts ir spēkā esošs un tā 2025. gadā atjaunotā versija ietver jaunu novērtēšanas procesu, kas saistīts ar skābekļa satura izvērtēšanu gāzes sistēmā. Ja ar izvērtēšanas procesa palīdzību var pierādīt, ka gāze ar paaugstinātu skābekļa koncentrāciju var sasniegt jūtīgos klientus un infrastruktūru, nacionāli var lemt skābekļa limitus padarīt striktākus un samazināt līdz 0,001 % (vidējā 24-stundu mainīgā vērtība). Standarts noteic, ka vairums infrastruktūras objektu var pieņemt skābekļa līmeni 0,01 % vai pat lielāku, taču pazemes gāzes krātuves, balstoties uz novērtējumu var pieņemt gāzi ar skābekļa koncentrāciju līdz 0,001 %. Ierobežojošu lēmumu pieņemšana ir jābalsta uz tehnisko un ekonomisko analīzi, kā arī sadarbojoties sistēmu operatoriem, biometāna ražotājiem un sistēmas lietotājiem. Šādi ierobežojumi nodrošina iekārtu aizsardzību un sistēmas drošu ekspluatāciju. Taču bez vienošanās ar citiem pārrobežu operatoriem un biometāna ražotājiem par harmonizētām, zemām skābekļa robežvērtībām, infrastruktūra joprojām nebūs pasargāta un sistēmu operatoru darbība kļūs arvien sarežģītāka, ņemot vērā pieaugošo biometāna daudzumu sistēmā un radot riskus brīvām gāzes plūsmām.

Atbildība par infrastruktūras darbības stabilitāti, nepārtrauktību un ilgmūžību

Latvijā vienotajam dabasgāzes pārvades un uzglabāšanas sistēmas operatoram, ir atbildība par gāzes pārvades sistēmas un Inčukalna PGK integrētas darbības un elastības nodrošinājumu, tostarp pieaugot gan gāzapgādes drošības vajadzībām, gan atjaunīgo gāzu nozīmei. Stratēģisko aktīvu, kāda ir Inčukalna PGK, aizsargāšana, vienlaikus nodrošinot pāreju uz atjaunīgās enerģijas izmantošanu, liek rast līdzsvaru starp tehniskajām iespējām, atbilstību normatīvajiem aktiem un uz nākotni orientētiem ieguldījumiem.

Vienotajam dabasgāzes pārvades un uzglabāšanas sistēmas operatoram ir pienākums aizsargāt sistēmu no potenciālajiem piesārņotājiem, piemēram, skābekļa, sēra savienojumiem

vai ūdens, kas var nodarīt būtiskus bojājumus gan gāzes pārvades sistēmas cauruļvados, gan Inčukalna PGK virszemes tehnoloģiskajās iekārtās un pazemes struktūrās.

Sistēmas uzraudzība un aizsardzība tiek īstenota, veicot regulāras sistēmas pārbaudes, plānotus remontdarbus, modernizāciju, apkopes, kā arī gāzes kvalitātes kontroli un vispārējo sistēmas monitoringu atbilstoši izveidotām procedūrām. Tas ļauj vienotajam dabasgāzes pārvades un uzglabāšanas sistēmas operatoram droši un ilgtspējīgi īstenot tam uzticētos pienākumus, sistēmā ienākot arvien vairāk jaunām – atjaunīgas izcelsmes gāzēm. Lai uzturētu sistēmu, nepieciešama papildu kontrole un nepārtraukta zināšanu pilnveide. Vienaļķus svarīga loma ir vienotā dabasgāzes pārvades un uzglabāšanas sistēmas operatora sadarbībai ar biometāna ražotājiem, kas ietver biometāna ievades testēšanu, regulāru gāzes kvalitātes uzraudzību un sadarbību tehnisko prasību noteikšanā.

Pastāv teorētiski risinājumi kvalitātes mainības problēmai, piemēram, filtrēšanas un attīrīšanas iekārtas cieto daļiņu un gaistošo savienojumu atdalīšanai; gāzes sajaukšanas iekārtas, kas atšķaida biometāna plūsmas ar sistēmai atbilstošas kvalitātes dabasgāzi, lai nodrošinātu vienmērīgu sastāvu; vai skābekļa atdalītāji, lai samazinātu skābekļa koncentrāciju līdz līmenim, kas zemāks par 0,02 mol%. Fosilas gāzes piejaukšana biometānam šobrīd nav atbilstošs risinājums, ņemot vērā dažādus regulatīvos aspektus. Līdz ar to ir kritiski svarīgi, lai skābekļa koncentrācija sistēmā ievadāmajai gāzei, kas tiek ievadīta cauruļvados, kuri savienoti ar Inčukalna PGK, būtu tuvu nullei, bet ne augstāka par 0,02 % mol. Ir svarīgi turpināt arī krātuvju pētījumus, jo skābekļa parādīšanās sistēmā nav izteikti plaši pētīta parādība. Dažādas izmaiņas krātuvju struktūrās var notikt arī ilgākā laikā, līdz ar to pastāv vēl daudz nezināmā un atklājamā par reakcijām un veidojumiem, kas attīstās gāzes krātuves dzīlēs pie noteiktas apstākļu un gāzes struktūras maiņas.

Pāreja uz atjaunīgās gāzes izmantošanu ir svarīga gan ES kopumā, gan arī nacionālā līmenī, taču tā jāīsteno drošā un ilgtermiņā pārdomātā veidā. Gāzes PSO, kā arī uzglabāšanas sistēmu operatoriem jāturpina veikt pētījumus, jāattīsta sistēmas, kā arī jāveicina sadarbība tehniskajos jautājumos, uzturot augstus gāzes kvalitātes standartus, jo gāzes kvalitātei ir svarīga loma gāzes sistēmas un pazemes gāzes krātuvju ilgtspējīgai, ekonomiski pamatotai un efektīvai darbībai.

1.6. Biometāna attīstības un tirgus integrācijas izaicinājumi un iespējas

Biometāns ir svarīgs, lai dekarbonizētu esošo gāzes infrastruktūru, nodrošinātu aprites ekonomiku, stiprinātu energoapgādes drošību un enerģētisko neatkarību, īpaši no fosilā kurināmā, taču nenoteiktības dēļ valsts līmenī būtu efektīvi veikt kompleksu biometāna izaicinājumu analīzi visaptverošā veidā, bet ir iespējams veikt arī individuālu problēmu risināšanu.

Daudzpusīgai biometāna analīzei un pētījumiem valsts līmenī ir potenciālas iespējas. Par vienu no svarīgākajiem nacionālajiem tiesību aktiem Latvijas enerģētikas un arī gāzes sektoram ir Enerģētikas likums. Cita starpā, tas nosaka dabasgāzes pārvades, uzglabāšanas un sadales sistēmu operatoru pienākumus, dabasgāzes ražotāju un citu tirgus dalībnieku uzdevumus un principus, lai nodrošinātu efektīvu dabasgāzes, kā arī atjaunīgo gāzu, tostarp biometāna, tirgus

attīstību un darbību. Svarīgi ir arī no Enerģētikas likuma izrietošie noteikumi, īpaši sistēmā ievadītās gāzes kvalitātes standarti.

Biogāzes staciju ģeogrāfiskā izvietojuma (1.11.att.) novērtējums Latvijas teritorijā liecina, ka biogāzes stacijas ir relatīvi vienmērīgi izvietotas pa Latvijas dabasgāzes sistēmu. Kartē ir attēlotas Latvijas biogāzes staciju elektriskās jaudas MW, un pētījumā tiek pieņemts, ka biogāzes staciju operatori būtu ieinteresēti tālāk attīstīt stacijas par biometāna stacijām.

Pāreju no biogāzes izmantošanas elektroenerģijas un siltumenerģijas ražošanai uz biometāna ražošanu var panākt, ieguldot līdzekļus biogāzes attīrīšanas iekārtās, kā arī pieslēdzoties savstarpēji savienotajai dabasgāzes sistēmai, kur biometānu var ievadīt un eksportēt uz citām Eiropas valstīm ar lielu biometāna pieprasījumu vai izmantot vietēji, lai sasniegtu nacionālos atjaunīgās enerģijas mērķus, īpaši nozarēs, kuras ir grūti dekarbonizēt, vai transporta sektorā, kur biometāns tiek atzīts par efektīvu un ilgtspējīgu alternatīvu fosilajam kurināmajam.

Neatkarīgi no tā, vai biometāns ir jāpatērē siltuma ražošanai vai kā ilgtspējīga transporta degviela, ir nepieciešama atbilstoša infrastruktūra un loģistiski jānodrošina iespēja transportēt biometānu uz gāzes sistēmu, lai nodrošinātu tā tālāku transportēšanu patērētājiem vietējā vai starptautiski ES teritorijā.

Biometānu ražo, attīrot biogāzi, ko savukārt iegūst, pārstādot dažādus organiskos atkritumus anaerobā fermentācijā. Eiropā izejvielu pieejamība bieži tiek minēta kā šķērslis biometāna attīstībai, jo izejvielas nav pieejamas vai ražotājiem tās ir jāiegādājas pieaugošā tirgus pieprasījuma apstākļos. Latvijā lauksaimniecības nozares kūtsmēsli kā izejviela tiek uzskatīti ar augstu biometāna ražošanas potenciālu, ņemot vērā gana plašu fermu pieejamību.

Saskaņā ar 1.11. attēlu, Latvijā ir aptuveni 50 biogāzes stacijas, kuru vidējā elektriskā jauda ir 0,3 - 6,3 MWe un kopējā elektriskā jauda ir 60,5 MW. Taču jāņem vērā, ka to darbība un nākotnes attīstības perspektīvas ir atšķirīgas un skaits ir tikai aptuvens. Biogāzes staciju darbu ietekmē esošā un nākotnes enerģētikas politika, tai skaitā iespējas ekonomiski pamatoti īstenot koģenerāciju, kā arī ne visām ir iespēja veikt apjomīgas investīcijas attīstībā, lai pārprofilētos uz biometāna ražošanu, kā arī vēl daļu ietekmē to īpašnieku lēmumu pieņemšana, investīciju vide, kā arī politiskie lēmumi un prognozes ne vien Latvijā, bet visā Eiropā.

Atkarībā no biogāzes ražošanā izmantoto izejvielu veidiem 2022. gadā, galvenās četras grupas ir:

- I. 41 biogāzes stacija, kas izmanto lauksaimniecības atkritumus
- II. 5 biogāzes stacijas, kas izmanto cietos sadzīves atkritumus, poligonus;
- III. 1 sadzīves notekūdeņu attīrīšanas stacija;
- IV. 3 stacijas, kas pārstrādā pārtikas rūpniecības notekūdeņus un ražošanas atlikumus.

[97]

Daži no turpmākās attīstības izaicinājumiem ir ražošanas izmaksas, izejvielu pieejamība un loģistika, kā arī regulatīvā nenoteiktība, kas negatīvi ietekmē dažus biogāzes ražotājus, pieņemot investīciju lēmumus biometāna ražošanā.

Valsts līmenī trūkst skaidru mērķu un stratēģijas biometāna attīstībai. Dažādu valstu (Dānijas, Itālijas, Nīderlandes, Francijas, Īrijas) pieredze rāda piemērus tam, kā konkrēti valsts pieprasījuma mērķi kopā ar valsts atbalstu palielina gan biometāna ražošanu, gan patēriņu [98].

a) Gāzes kvalitātes prasības biometāna ievadīšanai savstarpēji savienotajā gāzes sistēmā

Lai biometānu varētu droši ievadīt dabasgāzes sistēmā, tā kvalitātei jāatbilst Ministru kabineta 2025. gada 21. janvāra noteikumiem Nr. 50 "Noteikumi par prasībām gāzveida stāvoklī pārvērstas sašķidrinātās dabasgāzes, no atjaunīgajiem energoresursiem saražota vai iegūta gāzveida kurināmā un mazoglekļa gāzveida kurināmā ievadīšanai dabasgāzes pārvades un sadales sistēmā" (Noteikumi Nr. 50). Noteikumi Nr. 50 gadu gaitā ir attīstījušies, izveidojot normatīvo regulējumu, kas pieprasa sistēmu operatoriem īstenot drošu un nepārtrauktu sistēmas darbību, vienlaikus veicinot biometāna iesūkņēšanu sistēmā. Šie noteikumi paredz, ka biometānam, ievadot to sistēmā, jāatbilst noteiktiem kvalitātes kritērijiem, pēc līdzīga principa kā dabasgāzei. Viens no svarīgākajiem kvalitātes parametriem ir skābeklis (O_2), kas saskaņā ar Noteikumiem Nr. 50 var būt 0,02 mol% (pārvades sistēmas daļā, kas nodrošina pārrobežu plūsmas vai ir savienota ar Inčukalna pazemes gāzes krātuvi) līdz 0,5 mol% (sadales sistēmā un pārvades sistēmas reģionālajos gāzesvados). Ja atjaunīgo gāzi, piemēram, biometānu ievada pārvades sistēmas daļā, kas ir tieši saistīta ar Inčukalna pazemes gāzes krātuvi, tad pieļaujamā skābekļa robežvērtība ir būtiski zemāka vien 0,02 mol%. Tomēr ir paredzēts papildu nosacījums, ja gāze tiek iesūkņēta dabasgāzes pārvades sistēmas posmā, kas tieši nodrošina dabasgāzes pārrobežu pārvadi – šādos apstākļos gāzei ir jāatbilst kvalitātes prasībām, kas noteiktas starpsavienojuma līgumā starp pārvades sistēmu operatoriem, kas noslēgts saskaņā ar Komisijas 2015. gada 30. aprīļa Regulu (ES) 2015/703, ar ko izveido tīkla kodeksu par sadarbības un datu apmaiņas noteikumiem un pārvades sistēmu operatori tās ir publicējuši savā tīmekļvietnē. Taču, ja operatori nublicē atsevišķi noteiktas, elastīgākas kvalitātes prasības, tad biometāna ražotājiem ir pienākums ievērot Noteikumus Nr. 50 ietvertos gāzes kvalitātes parametru robežlielumus. [85]

Augsts skābekļa saturs gāzes sistēmai nav vēlams, jo tas veicina iekārtu paātrinātu koroziju gan gāzes pārvades, gan krātuves sistēmās, mikrobu un bioloģiskā apauguma veidošanos pazemes struktūrās, kā arī drošības apdraudējumus. Skābekļa paaugstinātais saturs rada citus riskus, kas var būtiski negatīvi ietekmēt pazemes gāzes krātuves ilgtermiņa darbību, tāpēc biometāna ievadīšana sistēmā ir apsveicama, taču vienmēr jānovērtē un jāņem vērā ietekme uz infrastruktūru kopumā. Lai gāzes sistēmā būtu iespējams ievadīt biometānu, ne mazāk svarīgi ir rast ekonomiski pamatotāko veidu, kā risināt skābekļa problēmātiku. To iespējams panākt, samazinot skābekļa koncentrāciju biometānā izmantojot efektīvas biogāzes attīrīšanas tehnoloģijas pirms biometāna ievades gāzes sistēmā. [99]

b) Ārpussistēmas ražota biometāna statuss tiešai piegādei patērētājam

Viens no alternatīviem risinājumiem biometāna rūpnīcu tiešajiem pieslēgumiem savstarpēji savienotajai gāzes sistēmai (sadales vai pārvades sistēmai), ir ārpussistēmas biometāna tieša piegāde patērētājam, piemēram, degvielas uzpildes stacijām. Vairākās ES valstīs pieeja gāzes sistēmai nepieslēgtām ražotnēm jeb ārpus sistēmas ražotam biometānam atšķiras no ļoti piesardzīgas, nepieļaujot un neuzskaitot ārpussistēmas ražota biometāna apriti, līdz pilnībā attīstītai ārpussistēmas biometāna izsekošanas sistēmai valstī.

Latvijā, saskaņā ar Enerģētikas likuma 117.⁴ pantu Ministru kabinets nosaka biometāna, kas netiek ievadīts nacionālajā dabasgāzes ieejas-izejas sistēmā, aprites uzraudzības un uzskaites kārtību, kā arī komercdarbības atbalsta kārtību no atjaunīgajiem energoresursiem iegūtai gāzei. Tādējādi valsts tiesiskais regulējums atzīst ārpussistēmas ražotu biometānu, taču pagaidām Ministru kabinets nav izstrādājis atbilstošus noteikumus. Līdz ar to, kamēr Latvijā nav detalizēti noteikti nosacījumi ārpussistēmas ražotā biometāna uzskaitē un aprites kontrolei, tikmēr to oficiāli patērēt kā biometānu nav iespējams, jo cita starpā, tam nav iespējams saņemt gāzes izcelsmes apliecinājumus. Bez izcelsmes apliecinājumiem, eksports ārpus Latvijas bieži vien ir ierobežots, taču nav neiespējams, jo lielā mērā ir atkarīgs no biometānu importējošās valsts regulatīvā ietvara nosacījumiem. Viens no jautājumiem, kas jāatrisina, izstrādājot noteikumus, ir jautājums par to, kas ir ārpussistēmas ražotā biometāna (vai citas atjaunīgās gāzes) atbildīgā mērinstitūcija gāzes uzskaitē un kvalitātes kontrolei, kā arī kurā brīdī tā veicama, piemēram, izejā no ražotnes, vai saņemot to patērētāja pusē.

Atbilstoši Enerģētikas likuma 119. pantā ietvertajam pienākumam, vienotais dabasgāzes pārvades un uzglabāšanas sistēmas operatoram jāveic nacionālajā dabasgāzes ieejas-izejas sistēmā, tostarp pieslēgumā ar dabasgāzes ražotāja un sašķidrinātās dabasgāzes termināļa operatora sistēmu, ievadāmās dabasgāzes uzskaitē, kvalitātes kontroli un odorizāciju, ja dabasgāzi paredzēts piegādāt galalietotājiem, un jānodrošina tam nepieciešamo iekārtu kopuma ierīkošanu. Latvijā, biometāna ražotāji, kuri veido pieslēgumu pie dabasgāzes sistēmā ir uzskatāms, ka atrodas labvēlīgā situācijā, ņemot vērā, ka pārvades sistēmas operators nodrošina salīdzinoši izmaksu ziņā ietilpīga gāzes uzskaites un kvalitātes kontroles mezgla ierīkošanu, noņemot šīs investīcijas no biometāna ražotāju atbildības.

Lai gan Latvijā pagaidām nav izstrādāti noteikumi par ārpussistēmas ražotas atjaunīgās gāzes apriti, Baltijas valstīs un Somijā ir ieviesta nacionāla kārtība ārpussistēmas ražota biometāna apritei. Igaunijā, Lietuvā un Somijā ir iespējams saņemt izcelsmes apliecinājumus arī ārpussistēmas ražotam biometānam, taču vienlaikus šāda biometāna importam vai eksportam trūkst saskaņota regulējuma, tāpēc biometāna ražošana un patēriņš ārpus gāzes sistēmas vērtējams kā valsts mēroga nacionāls risinājums valsts patēriņa vai ražošanas veicināšanai, kur parasti ir ieviests noteikts valsts atbalsta mehānisms, vai citi stimuli biometāna ražotājiem. Piemēram, Igaunijā laikā no 2018. līdz 2023. gadam bija plaša nacionālā biometāna atbalsta shēma (38,4 miljoni EUR apmērā) biometāna izmantošanai transporta nozarē, kuras galvenais mērķis bija sasniegt 2030. gada transporta nozares mērķi – 14% atjaunīgo energoresursu transporta nozarē [100]. Saskaņā ar Eiropas Komisijas datiem Igaunija saražo 0,02 miljardus kubikmetru (bcm) biogāzes, no kuriem 23% tiek saražoti 12 biogāzes stacijās un 77% – 6 biometāna stacijās. Igaunijā saražotais biometāns tiek izmantots transporta nozarē kā bio CNG. [101]

c) Biometāna ievadīšana savstarpēji savienotajā gāzes sistēmā, izmantojot tiešo pieslēgumu

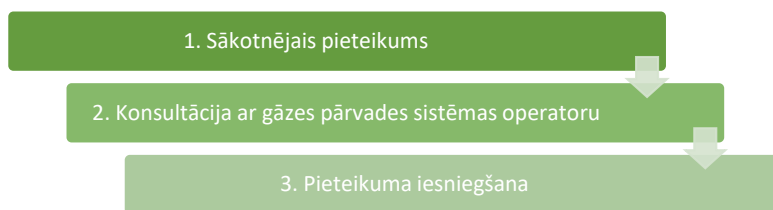
Viena no iespējām, kā biometāns var nonākt gāzes tirgū, ir ievadīšana savstarpēji savienotajā gāzes sistēmā. Latvijā ir vairāki procesuālie soļi un noteikumi, kā to var izdarīt, tai skaitā ir jāievēro valsts regulatīvās iestādes - Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijas

jeb SPRK noteikumus, kā arī gāzes sadales vai pārvades sistēmas operatora noteikumus atkarībā no tā, vai biometāna ražošanas iekārta ir pieslēgta gāzes sadales vai pārvades sistēmai.

Vienotajam dabasgāzes pārvades un uzglabāšanas sistēmas operatoram Latvijā ir jānodrošina biometāna ražotājiem, sašķidrinātās dabasgāzes jeb *SDG* termināļa operatoriem, sadales sistēmas operatoriem un dabasgāzes lietotājiem nepieciešamie un tehniski iespējamie pieslēgumi dabasgāzes pārvades sistēmai vai jāveic nepieciešamās izmaiņas esošo pieslēgumu atļautajā slodzē saskaņā ar SPRK apstiprināto kārtību "Dabasgāzes pārvades sistēmas pieslēguma noteikumi dabasgāzes sadales sistēmas operatoriem, biometāna ražotājiem, sašķidrinātās dabasgāzes termināļa operatoriem un dabasgāzes lietotājiem". [102], [103]

Saskaņā ar Latvijas gāzes pārvades sistēmas operatora datiem, biometāna ražošanas iekārtas pieslēgšanai savstarpēji savienotajai sistēmai ir septiņi galvenie posmi. Konsultācijas un pieteikuma iesniegšana, tehnisko noteikumu saņemšana, vienošanās noslēgšana, būvniecības procesa uzsākšana pieslēguma izbūvei, pieslēguma līguma slēgšana, pieslēguma būvniecības projekta dokumentācijas sagatavošana un būvniecības veikšana, kā arī pieslēguma darbības uzsākšana un sistēmas pakalpojuma līguma noslēgšana.

Pirmo soli var iedalīt apakškategorijās, kā parādīts 1.9. attēlā, ņemot vērā plānošanas fāzes būtisko lomu veiksmīgai un savlaicīgai projekta īstenošanai.



1.10. att. Biometāna ražotnes pieslēguma gāzes pārvades sistēmai izveides pirmais solis – apakšprocesī.

Biometāna ražotnes pieslēguma izveides pie gāzes pārvades sistēmas pirmais posms “Konsultācijas un pieteikuma iesniegšana” ietver sekojošos apakšprocesus (sk. 1.10. attēlu). Sākotnējā jeb pirms-pieteikuma izvērtēšana ietver prasību, ka pirms pieteikuma sagatavošanas biometāna ražotājiem jānovērtē pieslēguma vieta, ņemot vērā pieslēguma prognozēto ilgtermiņa jaudu un ar pieslēguma izveidi saistītās izmaksas. Ja nepieciešamā jauda ir līdz 250 MW/gadā un darba spiediens zem 16 bar parasti par lietderīgāku uzskatāms pieslēgums dabasgāzes sadales sistēmai, savukārt jauda ir lielāka un darba spiediens ir virs 16 bar, efektīvāks ir pieslēgums gāzes pārvades sistēmai. Ja novērtēts, ka nepieciešams veidot pieslēgumu pie gāzes pārvades sistēmas ar spiedienu virs 16 bar, būtiska loma ir konsultācijai ar gāzes PSO. Šāda konsultācija ar gāzes PSO speciālistiem vēl pirms pieslēguma pieteikuma iesniegšanas ir nepieciešama, lai precīzi novērtētu un pienācīgi izpētītu iespējamus pieslēguma risinājumus. Pēc konsultācijas potenciālais biometāna ražotājs vai cits sistēmas lietotājs var iesniegt PSO pieteikumu pieslēguma ierīkošanai. PSO balstoties uz lietotāja iesniegumu un sistēmu tehnisko parametru novērtējumu izsniedz tehniskās prasības un tehniskos noteikumus pieslēgumam dabasgāzes pārvades sistēmai.

Starp PSO un sistēmas lietotāju, kurš vēlas pieslēgt biometāna ražošanas iekārtu, ir jābūt oficiāli noformētai rakstveida vienošanās, kurā izklāstīts būvniecības projekta dokumentācijas izstrādes un apstiprināšanas process, darbuuzņēmēja izvēles procedūra pieslēguma ierīkošanai un abu pušu attiecīgās tiesības un pienākumi pirms pieslēguma līguma noslēgšanas. Tāpat visas nepieciešamās iepirkuma procedūras tiek veiktas saskaņā ar vienošanos, kura paredz arī tiešā pieslēguma pie sistēmas nepieciešamo iekārtu iegādi un termiņus.

Pieslēguma projektēšana, būvniecība vai rekonstrukcija tiek veikta saskaņā ar vienošanās noteiktu kārtību. Pēc būvniecības pabeigšanas tiek veiktas pārbaudes un biometāna ievades testi. Pēc veiksmīgas pārbaudes pieslēguma savienojums tiek nodots ekspluatācijā. Ražošanas iekārtas uzstādīšana tiek uzskatīta par pabeigtu, kad PSO rakstiski paziņo biometāna ražotājam. Biometāna ražotājam vai to pārstāvošajam sistēmas lietotājam, jānoslēdz arī pārvades sistēmas pakalpojuma un balansēšanas līgums, kas nodrošina, nepieciešamo juridisko ietvaru, lai biometāns pēc tā saražošanas, veiksmīgi varētu nonākt gāzes tirgū vietējiem patērētājiem vai eksportam uz valstīm ar lielu pieprasījumu pēc atjaunīgajām gāzēm.

Kopumā process vērtējams kā diezgan sarežģīts, ņemot vērā plašas tehniskās, drošības un regulatīvās prasības, taču vienlaikus tas šie jautājumi ir skaidri noteikti valsts regulējumā, un tie ir veicami soli pa solim, tādējādi sasniedzot veiksmīgu rezultātu – biometāna ražotnes pieslēgumu gāzes sistēmai.

d) Biometāna ievadīšana savienotajā gāzes sistēmā, izmantojot biometāna ievades punktu

2024. gada grozījumi Latvijas Enerģētikas likumā radīja jaunu pienākumu vienotajam dabasgāzes pārvades un uzglabāšanas sistēmas operatoram. Vienotajam dabasgāzes pārvades un uzglabāšanas sistēmas operatoram ir jāplāno un jāattīsta ievades punkti gāzveida kurināmajam un mazoglekļa gāzveida kurināmajam, kas ražots vai iegūts no atjaunīgajiem energoresursiem, ievadei dabasgāzes pārvades sistēmā. Saprātīgās izmaksas, kas saistītas ar šajā punktā minētajām darbībām un ko sedz vienotais dabasgāzes pārvades un uzglabāšanas sistēmas operators, ir iekļautas dabasgāzes pārvades sistēmas pakalpojumu tarifiņos. Tas nozīmē, ka PSO ir pienākums attīstīt biometāna ievades punktus, lai nodrošinātu iespēju biometāna ražotājiem, kuru ražotnes atrodas salīdzinoši tālu no pārvades sistēmas vai, kuri saskaras ar kādiem tehniskiem ierobežojumiem, ievadīt biometānu publiskajos biometāna ievades punktos.

Tiešie pieslēgumi dabasgāzes pārvades sistēmai ne vienmēr ir iespējami, jo tie var būt ekonomiski dārgi relatīvi mazas jaudas ražotājiem, ņemot vērā, ka savienojuma cauruļvada būvniecību sedz ražotājs, un tie var būt arī juridiski sarežģīti zemes īpašumtiesību jautājumu dēļ. Līdz ar to pozitīva alternatīva individuālu pieslēgumu izbūvei katram ražotājam ir publisko biometāna ievades punktu jeb BIP izveide dabasgāzes sistēmā. Šāds gāzes infrastruktūras punkts nozīmē, ka biometānu var transportēt uz BIP no biometāna ražošanas vietas saspīestā veidā kā *bioCNG* (angļu val. *compressed natural gas*) ar sauszemes transportu un piegādāt ievadei BIP dabasgāzes sistēmā. BIP izveide un attīstība ietver piebraucamo ceļu un visas nepieciešamās infrastruktūras, tostarp videonovērošanas, gāzes noplūdes noteikšanas ierīču, ugunsdrošības ierīču, automātiskās ieejas kontroles sistēmas utt., izbūvi drošai un autonomai biometāna ievadīšanai gāzes pārvades sistēmas cauruļvados.

Ar SPRK 2023. gada 21. decembra lēmumu Nr. 158 ir apstiprināts dabasgāzes pārvades sistēmas 10 gadu attīstības plāns periodam no 2024. - 2033. gadam, kas cita starpā noteic, ka PSO šajā laikā potenciāli var attīstīt 4 BIP. Pamatojoties uz Enerģētikas likuma prasībām un SPRK apstiprināto desmit gadu attīstības plānu, Latvijas gāzes PSO ir izveidojis unikālu, pirmo publiski pieejamo BIP. Pirmais BIP atrodas Latvijā, Džūkstes pagastā un tas tika atklāts 2025. gada jūlijā.

BIP "Džūkste" projekta ietvaros biometāna ražotājiem ir iespēja piegādāt biometānu, kas saspiegts 250-300 bar, no savas biometāna ražotnes uz ieejas punktu Latvijas dabasgāzes ieejas-izejas sistēmā, izmantojot konteineru pārvadājumus, kā *bioCNG*. Atbilstoši Eiropas Komisijas izvirzītam prasībām ar mērķi veicināt ilgtspējīgu biometāna ražošanu, pirmo publisko BIP Latvijā var izmantot tikai ražotāji ar ilgtspējīgu biometānu, kas atbilst ES brīvprātīgo shēmu un valsts normatīvo aktu par ilgtspēju prasībām. Attiecīgi sistēmas lietotājam ir iespēja izmantot piekļuvi gāzes tirgum un brīvi pārvietot biometānu uz paredzēto galamērķi Latvijā un citviet Eiropā. Prasība par ilgtspējīgu biometānu saskaņā ar Eiropas Parlamenta un Padomes 2023. gada 18. oktobra Direktīvu (ES) 2023/2413, ar ko groza Direktīvu (ES) 2018/2001, Regulu (ES) 2018/1999 un Direktīvu 98/70/EK attiecībā uz atjaunojamo energoresursu izmantošanas veicināšanu un atceļ Padomes Direktīvu (ES) 2015/652 (*RED III*), ir izstrādāta, pamatojoties uz EK *REPowerEU* programmas vajadzībām. [104]

BIP "Džūkste" projekta ievades jauda dabasgāzes pārvades sistēmā ir līdz 10 miljoniem normālkubikmetru jeb aptuveni 100 GWh gadā. Projekts ietvēra būvniecības projektēšanu, iekārtu projektēšanu, ražošanu, testēšanu, piegādi un uzstādīšanu, ievades punkta būvniecības darbus, montāžu, ekspertīzes veikšanu, autoruzraudzības veikšanu, regulēšanu, reģistrāciju valsts bīstamo iekārtu reģistrā un pieņemšanu ekspluatācijā. Līdz 2026. gada vidum PSO ir pienākums nodrošināt informācijas tehnoloģiju risinājuma ieviešanu, kas sniegs tādus pakalpojumus kā BIP jaudu piekļuves pārvaldība, BIP uzskaitīto datu attēlošana dabasgāzes PSO pārvaldītājā sistēmas lietotāju platformā, savienojuma uzturēšana starp biometāna ražotāju un dabasgāzes pārvades sistēmas lietotājiem attiecībā uz vienotas dabasgāzes pārvades piešķirumiem ieejas-izejas sistēmas ieejas punktā no biometāna ražošanas iekārtas, tostarp minēto ieejas punktu jaudu, nomināciju un piešķirumu pārvaldība, automātiska datu integrācija starp biometāna ievades uzskaites punktiem un gāzes izcelsmes apliecinājumu reģistru. BIP tehnoloģiskais risinājums nodrošina arī metāna un biometāna noplūdes atklāšanas un novēršanas risinājumu. Līdz ar to šāds publiski lietojams BIP kopumā uzskatāms par kompleksu risinājumu, kas veidoti ar mērķi mazināt slogu biometāna ražotājiem un palielināt biometāna ražošanas attīstību Latvijā.

e) Biometāna loma pārskatītajā Nacionālajā enerģētikas un klimata plānā jeb NEKP 2030. gadam

2024. gada 12. jūlijā Latvijas Ministru kabinets apstiprināja pārskatīto NEKP līdz 2030. gadam. NEKP nosaka atjaunīgās enerģijas galapatēriņa mērķi 61% apmērā, ko daļēji varētu segt arī ar biometānu, ja tā potenciāls tiks izmantots turpmākajos gados. [13]

NEKP ietver vairākas stratēģijas biometāna integrācijai, jo īpaši transportā, elektroenerģijas un siltumenerģijas ražošanā.

Transporta nozarē pārskatītais plāns ierosina publiski pieejamu sašķidrinātā vai saspiestā metāna degvielas uzpildes staciju būvniecību. Turklāt tas ietver ieceri atvieglot akcīzes nodokļa nosacījumus biodegvielai un biometānam, lai veicinātu to izmantošanu. Ierosinātās nodokļu struktūras mērķis ir piemērot zemākas nodokļu likmes biodegvielai un biometānam, potenciāli palielinot tos tirgus daļu, vienlaikus neradot negatīvu ietekmi uz valsts budžetu.

NEKP nosaka, ka tirgotājiem, kuri piegādā dabasgāzi elektroenerģijas un siltumenerģijas ražošanai, savos tirdzniecības portfeļos jāiekļauj 3% atjaunīgās enerģijas no dabasgāzes apjoma. Turklāt tas atbalsta biometāna ražošanu un ievadīšanu gāzes sistēmā, nodrošinot stimulus ražošanas iekārtu un *bioCNG* transporta infrastruktūras uzstādīšanai. Biometāna izmantošana varētu palīdzēt samazināt siltumnīcefekta gāzu emisijas enerģētikas sektorā. Lai gan no NEKP noteiktā, nav secināms, ka biometāns tiek nacionāli uztverts kā svarīgs risinājums jaudas balansēšanā, biometāns (un metāns kopumā) ir avots mainīgās atjaunīgās elektroenerģijas balansēšanai un jaudas pietiekamības nodrošināšanai. Biometānu var izmantot, kad ir liels pieprasījums pēc siltuma un elektroenerģijas, un kad saules vai vēja enerģija nespēj nodrošināt nepieciešamo atjaunīgās enerģijas jaudu.

NEKP mudina palielināt biodegvielas un biometāna izmantošanu lauksaimnieciskajā ražošanā un biogāzes un biometāna ražošanu komerciālos ūdens apsaimniekošanas pakalpojumos lielajās pilsētās. Šīs iniciatīvas varētu veicināt aprites ekonomiku, izmantojot lauksaimniecības un organiskos atkritumus enerģijas ražošanā.

Attiecībā uz enerģijas pārvades un sadales infrastruktūru NEKP prioritāti piešķir Latvijas iekšējās enerģijas infrastruktūras modernizācijai, lai atbalstītu atjaunīgo energoresursu integrāciju. Viedo integrētu risinājumu ieviešana pārvades sistēmā ir izšķiroša, lai pielāgotos biometāna un citu atjaunīgo gāzu, pieaugošajam īpatsvaram. Šie uzlabojumi ir būtiski, lai uzlabotu energosistēmas noturību un efektivitāti.

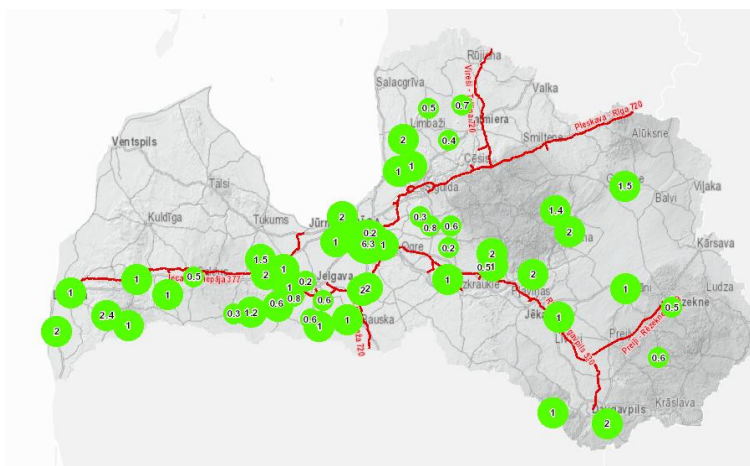
Latvija plāno arī palielināt atjaunīgās enerģijas īpatsvaru transporta sektorā, nosakot degvielas piegādātājiem saistības sasniegt konkrētus siltumnīcefekta gāzu emisiju samazinājumus. Tas, visticamāk, novedīs pie ievērojama modernu biodegvielu, biometāna un elektroenerģijas izmantošanas pieauguma transportā. NEKP atbalsta arī paātrinātu elektromobilitātes attīstību, salāgojot un sasaistot to ar plašākiem ES mērķiem mobilitātes, energoefektivitātes un atjaunīgo energoresursu jomā.

Latvijas NEKP mērķu tvērumš ir atbilstīgs ES prasībām un būtiski uzlabots salīdzinoši ar vēsturisko plāna redakciju, īpaši attiecībā uz atjaunīgo enerģiju un biometānu. 2024. gadā tika panākts progress vispārējā juridiskā pamata izveidē, taču joprojām pastāv izaicinājumi, lai biometāns faktiski tiktu izmantots, piemēram, normatīvā skaidrība, tostarp tarifu prognoze gāzes sistēmas izmantošanai ilgākā laika periodā, informācija par valsts biometāna statistikas uzskaites pieeju un skaidrs ilgtermiņa plāns, piemēram, biometāna attīstības stratēģija, kas pašlaik Latvijā nav noteikta.

Izaicinājumi biometāna nonākšanai tirgū

Lai nodrošinātu, ka biometāns ir labi integrēts esošajās gāzes sistēmās un gāzes tirgū, joprojām pastāv dažādi finanšu, tehniskie un loģistikas šķēršļi.

Izejvielu savākšana un transportēšana, kas bieži ir izkliedēta plašos ģeogrāfiskos apgabalos, rada loģistikas šķēršļus, kas var palielināt izmaksas un sarežģīt darbību. Vēl viens loģistikas jautājums var rasties, jo biogāzes stacijas atrodas nepietiekami tuvu gāzes pārvades sistēmai, kas tehniski, juridiski un finansiāli apgrūtina tiešā ražotnes pieslēguma izbūvi pie gāzes sistēmas. Tas ietver lielus attālumus un līdz ar to augstas būvniecības izmaksas, kā arī izaicinājumus noslēgt līgumus ar visiem zemju īpašniekiem, kuru zemi šķērso cauruļvada savienojums.



1.11. att. Biogāzes staciju izvietojums un esošā nacionālā dabasgāzes pārvades infrastruktūra [no gāzes PSO].

Latvijas gadījumā daudzas biogāzes stacijas ir izvietotas vienmērīgi ap gāzes pārvades sistēmu (sk. 1.11. attēlu), bet tajā pašā laikā ne visas no tām ir pietiekami tuvu, lai būtu ekonomiski izdevīgi izbūvēt tiešo pieslēgumu. Līdz ar to, lai ražotnes varētu turpināt ražošanu un ienākt biometāna tirgū, ir nepieciešams izvērtēt un rast citas alternatīvas.

Kā finansiāls izaicinājums biometāna ražotņu projektu attīstītājiem uzskatāmi lieli sākotnējie ieguldījumi, kas nepieciešami anaerobās fermentācijas iekārtu būvniecībai un esošo biogāzes staciju modernizācijai, lai attīrītu biogāzi līdz biometāna līmenim.[6] Turklāt tehniskie jautājumi, piemēram, biometāna konsekventas kvalitātes un attīrīšanas nodrošināšana, lai atbilstu sistēmā ievadāmās gāzes standartiem, prasa tehnoloģiju briedumu, investīcijas un zināšanas, lai nodrošinātu pareizu skābekļa un citu komponentu saturu. Papildu, ir jāveic ieguldījumi, lai izbūvētu iekārtu, kas savieno cauruļvadu ar gāzes sistēmu.

Regulatīvā vide un tirgus apstākļi dažādās Eiropas valstīs atšķiras, radot problēmas biometāna ražošanas pieaugumam vai brīvām tā pārrobežu plūsmām. Nekonsekvents vai neskaidrs tiesiskais regulējums var atturēt no investīcijām, radot nenoteiktību par ilgtermiņa politikas atbalstu. [6] Dažās jomās subsīdijas un stimuli dod priekšroku citiem atjaunīgajiem energoresursiem, galvenokārt elektroenerģijas ražošanai no saules vai vēja, atstājot biometānu neizdevīgā konkurences situācijā. Biometāna izcelsmes apliecinājumu vai citu atjaunīgo

energoresursu tirdzniecības platformu trūkums, sadrumstaloti tirgi un saskaņotu principu trūkums, jo īpaši ES līmenī, ievērojami palēnina biometāna attīstību.

Biometāns tiek identificēts kā vērtīgs fosilās gāzes aizstājējs, kam ir noteikta loma dažādās nozarēs un atjaunīgo energoresursu portfelī. Tās savietojamība ar esošo gāzes pārvades un sadales infrastruktūru kopā ar tās ilgtspēju un piegādes drošību sniedz ieguvumus visiem tās lietotājiem visās nozarēs.

Ir jāpievēršas vides, ekonomiskajiem un tehniskajiem aspektiem, lai izvērtētu labākās iespējas biometāna integrācijai tirgū un atraisītu tā potenciālu kā atjaunīgu, ilgtspējīgu un ekonomiski pamatotu gāzi.

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

Ir trīs galvenie scenāriji vai veidi, kā biometāns var nonākt enerģijas (gāzes) tirgū – 1) tiešs pieslēgums, kur biometāna ražotne ir tieši savienota izmantojot cauruļvadu pieslēgumu ar gāzes pārvades vai sadales sistēmu; 2) izmantojot biometāna ievades punktus (BIP), kas pazīstami arī kā virtuālais cauruļvads, kur biometāns tiek transportēts uz biometāna ievadi gāzes sistēmā ar transportlīdzekļiem; 3) ārpussistēmas risinājumi, kur biometāns tiek transportēts tieši no ražotnes līdz gala patērētājam, neizmantojot gāzes sistēmu. Katrs no šiem scenārijiem ir svarīgs, jo no dažādiem vides, ekonomiskiem un tehniskiem faktoriem ir atkarīgs tas, kurš no veidiem kā biometāns nonāk tirgū ir vispiemērotākais. Katrs scenārijs ietver atšķirīgas izmaksas, ieguvumus un riskus, kas ietekmē biometāna ieviešanas un attīstības vispārējo ekonomisko iespējamību un ilgtspēju. Tiešie pieslēgumi sistēmai var sniegt jaudu pieejamības priekšrocības konkrētiem biometāna ražotājiem, bet prasa ievērojamus sākotnējus ieguldījumus infrastruktūrā. Ievadīšana biometāna ievades punktos (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 pietiekamu ceļu infrastruktūru un bez pārāk liela pieprasījuma pēc BIP izmantošanas. Pretējā gadījumā var rasties sastrēgumi biometāna ievadei sistēmā un samazināties efektīva tā ienākšana tirgū. BIP ir lieliska 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 utt. Risinājumi, kas pilnībā izlaiž esošās gāzes infrastruktūras izmantošanu jeb ārpussistēmas risinājumi, nodrošina elastību un pieejamību, bet ir saistīti ar papildu loģistikas sarežģījumiem, kā arī pastāv juridiski izaicinājumi saistībā ar biometāna izsekošanu to transportējot ārpus gāzes sistēmas, jo vairākās ES valstīs tas netiek pilnībā atbalstīts, un trūkst detalizētu atbildīgo pušu un procedūru ārpussistēmas biometāna pareizai 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 biometāna ražošanu, jo piemērota ražotņu atrašanās vieta samazina gan siltumnīcefekta gāzu emisijas, gan ražotnes ekspluatācijas izmaksas [74], [105], [106].

Izvēle starp šīm stratēģijām ietekmē biometāna kā atjaunīgā energoresursa izmantošanu, attīstību un ilgtermiņa lietojumu.

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 (tiešais pieslēgums gāzes sistēmai, biometāna ievades punkti (virtuālais cauruļvads) vai ārpussistēmas piegāde) 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. Kā arī, kurš no risinājumiem varētu tikt uzskatīts par labāko, lai veicinātu biometāna integrāciju energosistēmā. Šī pētījuma mērķis ir salīdzināt trīs biometāna integrācijas scenāriju (tiešais pieslēgums, BIP, ārpussistēmas izmantošana) iespējamību un veikspēju, apkopojot Latvijas zinātnieku, politikas veidotāju un gāzes infrastruktūras ekspertu novērtējumu.

2. METODIKA

Viens no pētījuma mērķiem ir izveidot konceptuālu ietvaru, lai veicinātu biometāna attīstību un viedu enerģētikas pārkārtošanu, integrējot dažādus svarīgus aspektus starpdisciplinārai pieejai. Noderīgi ir identificēt esošās nepilnības biometāna nozarē un izveidot pamatu visaptverošai biometāna izpētei un analīzei, lai veicinātu tā attīstību valsts līmenī no vides, klimata, tehnoloģiskajiem, ekonomiskajiem un politiskajiem aspektiem.

Visaptverošajā biometāna attīstības projektā izstrādātās un lietotās metodes, un soļus varētu lietot un izmantot citās enerģētikas nozarēs, piemēram, elektroenerģijas, ūdeņraža, oglekļa uztveršanas un uzglabāšanas projektos. Sekojot autores izstrādātajam pētniecības plānam, ir iespējams veikt plašu energosistēmas nepilnību analīzi un nodrošināt nākotnes attīstības idejas un plānus, pamatojoties uz datiem un modelēšanu.

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 pērti?	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 metode</i>)	Ar nozares ekspertu iesaisti un matemātiskiem aprēķiniem iegūti rezultāti optimālai biometāna integrācijai sistēmā, novērtēšana kā energoresursam un aprēķināta 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 paskaidro, kura metode šī promocijas darba ietvaros 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

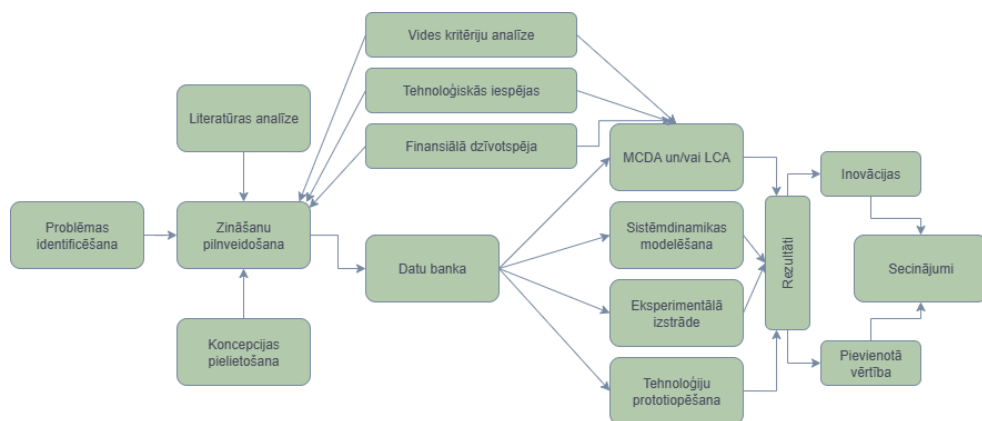
Viena no darbā izmantotajām metodēm ir kvantitatīvā kontentanalīze, kas zināma arī kā satura analīze. Kontentanalīze ir tekstuālu datu analīzes metode, kas ļauj sistemātiski analizēt literatūras avotus, identificēt galvenās tēmas, pieejas un metodoloģiskos virzienus, kā arī strukturēti kategorizēt informāciju. Šī metode tiek izmantota, lai interpretētu dažādos avotos pieejamo informāciju, identificējot galvenās pieejas, piemēram, biometāna sistēmu analīzei un novērtēšanai. [107]

Kontentanalīzes ietvaros tika analizētas zinātniskajā literatūrā izmantotās metodoloģiskās pieejas biometāna sistēmu analīzei, īpašu uzmanību pievēršot tādām metodēm kā sistēmdinamika, aprites cikla analīze (*LCA*) un daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīze (*MCDA*). Šāda pieeja ļauj strukturēti apkopot dažādus analītiskos, tostarp, modelēšanas rīkus un novērtēt to piemēroftību biometāna sistēmu izpētei.

Šajā pētījumā kvantitatīvo kontentanalīzi piemēro literatūras un teorētiskai galveno zinātnisko metožu sistemātiskai analīzei. Literatūras analīze tika veikta izmantojot *Scopus* un *Science Direct* zinātniskās datubāze, 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.

Sekojoši vērtētas un analizētas dažādas metodes un principi, ko var izmantot biometāna attīstības pētniecībā, vienlaikus šis darbs analizē un sistematizē, nevis veic visu aplūkoto metožu faktisku piemērošanu.

Sekojoši izstrādāts starpdisciplinārs pētījuma ceļvedis un tas integrē vides zinātni, inženierzinātnes un sociālās zinātnes, izmantojot daudzpakāpju metodoloģiju, kas redzama 2.1. attēlā.



2.1. att. Autores izstrādātais pētniecības ceļvedis.

2.1. attēlā atspoguļots autores izstrādāts teorētisks pētījuma dizains un koncepts, kuru var izmantot energosistēmu analīzē un zinātniskajā izpētē. To var piemērot gan biometāna jautājumu analīzē, taču vienlaikus tas izstrādāts universāls un piemērots replicēšanai arī citu energoresuru un sistēmu pētniecībā.

Datu iegūšanai ir galvenā loma uz datiem balstītā pētījumā un lēmumu pieņemšanā pēc tam. Pareizi dati var nodrošināt efektivitāti un uz datiem balstītu lēmumu pieņemšanas procesu, vienlaikus ilgtermiņā radot tirgus attīstību, konkurētspēju un efektīvu finanšu izmantošanu.

Pētījuma metodoloģija izmanto plašu datu vākšanas pieeju, lai uztvertu sarežģītās savstarpējās attiecības biometāna attīstības ekosistēmā. Tehniskie, ekonomiskie, vides un sociālie dati ir jāapkopo no biogāzes ražotājiem, biometāna stacijām, infrastruktūras operatoriem un sabiedrības, apvienojot strukturētu informācijas ieguvu, daļēji strukturētas intervijas un tiešus lauka mērījumus. Tehniskie parametri, tostarp substrāta sastāvs, digestora veikspējas mērīšanas un efektivitātes uzlabošana, ir jāapkopo no dažādām ekspluatācijā esošām biogāzes iekārtām, izmantojot standartizētus protokolus, kurus var pielāgot no *Kougiās et al.* [108]. Ekonomiskos datus, tostarp kapitāla izdevumus, darbības izmaksas un ieņēmumu plūsmas, var iegūt, izmantojot konfidenciālas anketas, kas tiek izplatītas staciju operatoriem, literatūras pārskatu, un tos var papildināt ar biometāna vērtības ķēžu tirgus analīzi, kā izklāstīts Horschig et al. [109]. Ietekmes uz vidi rādītājus, piemēram, siltumnīcefekta gāzu emisijas, zemes izmantošanas izmaiņas un ūdens patēriņu, var kvantitatīvi noteikt, izmantojot aprites cikla novērtējuma metodoloģiju saskaņā ar *ISO 14040/14044* standartiem [110], un sistēmas robežas sniedzas no izejvielu ražošanas līdz biometāna ievadīšanai sistēmā. Sociālās uztveres datus var iegūt, izmantojot stratificētu nejaušu respondentu izlasi lauku un pilsētu kopienās, kā instrumentu izmantojot aptauju, kas novērtē informētību, bažas un pieņemšanas faktorus attiecībā uz biometāna ražošanas iekārtām, pielāgojot metodoloģiskās pieejas [111]. Šī daudzpusīgā datu iegūšanas sistēma var būt būtiska, lai izveidotu integrētu pierādījumu bāzi, kas pārsniedz tradicionālās disciplinārās robežas, ļaujot izstrādāt holistiskus lēmumu atbalsta instrumentus ieinteresētajām personām visā biometāna vērtības ķēdē [111]. Datu avotu navigācija uzlabo atklājumu stabilitāti, vienlaikus aptverot tehniskos ierobežojumus,

ekonomiskos aspektus, ietekmi uz vidi un sociālo dinamiku, kas kopīgi veido biometāna attīstību salīdzinoši jaunos tirgos [112].

Viena no bieži izmantotajām pieejām sarežģītu un laikā mainīgu enerģētikas sistēmu analizē ir sistēmdinamika. [115] Sistēmdinamika ir zinātniska pieeja, kurā datorizēta modelēšana un simulācija tiek izmantota, lai pārsniegtu sistēmu struktūru un izpētītu, kā un kāpēc sarežģītas sistēmas attīstās laika gaitā [113]. Sistēmdinamikas modelēšana tika izstrādāta, lai simulētu un izprastu sarežģītas sistēmas un to, kā katrs no parametriem un sistēmu daļām ietekmē viens otru. Šī metodika izmanto plūsmas, atgriezeniskās saites jeb cilpas (pozitīvas un negatīvas) un, kas ir ne mazāk svarīgi, laika kavējumus, lai atspoguļotu mijiedarbību tādās sistēmās kā ekonomika, organizatoriskās struktūras vai pat veselas ekosistēmas [114]. Sistēmdinamika palīdz saprast, izpētīt un simulēt, kā viena lielāka vai mazāka sistēmas daļa maina un ietekmē visu sistēmu. Tā ir noderīgs instruments uzņēmējdarbības stratēģijas izstrādei, politikas veidošanai un pētniecībai [115]. Kā arī tā var parādīt nelineāru atgriezenisko saiti biometāna piegādes ķēdēs.

Eksperimentālajai izstrādei ir dažādas iespējas. Modelēšanas pieeja atbilst eksperimentālajai izstrādei un rūpnieciskajiem pētījumiem, jo tā koncentrējas uz praktisku, izmērāmu risinājumu izstrādi un testēšanu. Eksperimentālās izstrādes ietvaros modelēšanu var izmantot, lai optimizētu biometāna savienojumu veidus vai tehnoloģijas, kas pēc tam tiks pārbaudītas praksē.

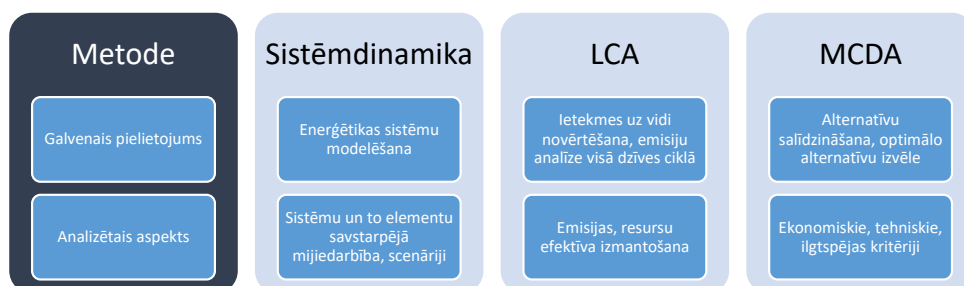
Aprites cikla analīze (angļu val. *Life Cycle Assessment - LCA*) jeb dzīves cikla analīze ir metode, lai novērtētu biometāna ražošanas un izmantošanas ietekmi uz vidi visā dzīves ciklā – no resursu ieguves līdz gala produkta izmantošanai. Šī metode ļauj kvantitatīvi noteikt gan tiešās, gan netiešās emisijas, kā arī novērtēt resursu efektivitāti. *LCA* ir īpaši svarīga ilgtspējas analīzē, jo tā sniedz sistēmisku priekšstatu par ietekmi visā ciklā un palīdz identificēt iespējas samazināt emisijas vai uzlabot resursu efektivitāti, kvantificējot unikālus procesus no vides aspektiem, kā piemēram, atkritumu apsaimniekošanu. *LCA* atbilst fundamentālajiem pētījumiem un rūpnieciskajiem pētījumiem, jo šīs analīzes rezultāti var palīdzēt likt pamatus jaunu tehnoloģiju attīstībai, uzlabojot zinātnisko izpratni par biometāna sistēmas ietekmi. *LCA* dati var būt nepieciešami arī eksperimentālās izstrādes procesā, lai salīdzinātu dažādu tehnoloģiju ilgtspēju un optimizētu to veikspēju.

Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīze (*MCDA*) ļauj salīdzināt dažādas alternatīvas, ņemot vērā vairākus faktorus vienlaikus, piemēram, tehnoloģiskās izmaksas, ietekmi uz vidi, energoefektivitāti un sabiedrības pieņemšanu. Biometāna sistēmu gadījumā *MCDA* var palīdzēt izvēlēties optimālus tehniskos risinājumus vai investīciju modeļus, pamatojoties uz ilgtspējas, ekonomiskajiem un vides kritērijiem. *MCDA* bieži izmanto rūpnieciskajos pētījumos un eksperimentālajā izstrādē, jo šī pieeja ir orientēta uz lēmumu pieņemšanu reālos apstākļos, ņemot vērā vairākus kritērijus, kas ir svarīgi risinājumu praktiskai īstenošanai. Tās izmantošana palīdz integrēt dažādu informāciju, kas var būt noderīga, lai novērtētu tehnoloģiju vai procesu attīstību pirms reālas ieviešanas. Pētnieciskā darbība aptver vairākus pētniecības un attīstības posmus. Izvēlētais metode norāda uz pāreju no rūpnieciskajiem pētījumiem uz eksperimentālo izstrādi, jo var veikt gan fundamentālo analīzi (*LCA*), gan praktisko risinājumu testēšanu (modelēšana un *MCDA*).

Var veikt arī laboratorijas biometanizācijas eksperimentus, lai analizētu un uzlabotu metāna iegūvi, lai uzlabotu gāzes kvalitāti, kas būtiski ietekmē gāzes infrastruktūru.

Lai nodrošinātu praktisko vērtību pētījumiem, to iespējams ar prototipa attīstību. Rezultāts var būt jauns tehnoloģijas prototips, kas risinās skābekļa koncentrācijas un plūsmas pārvaldību dabasgāzes sistēmā no biometāna stacijām. Jāpievērš uzmanība tam, ka ir jāizvērtē un jānosaka optimālākais modelis biometāna ražošanas iekārtu pieslēgšanai vai pieejai galalietotājiem, ņemot vērā problēmas, kas saistītas gan ar infrastruktūras attīstību, izmantošanu un biometāna kvalitāti, kā arī uzsverot biometāna potenciālu salīdzinājumā ar pašreizējo situāciju. Sistēmas modelēšana pie noteikta veida savienojumiem, jaudām un daudzumiem ievērojami uzlabos šo kvalitātes problēmu ietekmes novērtējumu un ļaus prognozēt ietekmi uz infrastruktūru, lai optimizētu biometāna transportēšanu un ievadīšanu sistēmā, vienlaikus samazinot tehniskos šķēršļus biometāna ieviešanai.

Precīzi un visaptveroši datu avoti ir būtiski sistēmdinamikas modelēšanā, lai nodrošinātu modeļa rezultātu derīgumu, uzticamību un piemērojamību. Augstas kvalitātes dati ļauj modelētājiem kvantitatīvi noteikt sistēmas uzvedību, kalibrēt mainīgos un validēt simulācijas rezultātus. Biogāzes sistēmu kontekstā var izvēlēties četras galvenās datu kategorijas - biogāzes staciju operatīvos datus, infrastruktūras raksturlielumus, vides rādītājus un sociālekonomiskos rādītājus. Biogāzes staciju ekspluatācijas dati (piemēram, izejvielu ievade, izlaide un citi attiecīgi ieraksti) būtu jāvāc tieši no iekārtu uzraudzības sistēmām un jāanalizē, izmantojot laika rindu analīzi, lai noteiktu darbības tendences un sistēmas vājās vietas. Infrastruktūras raksturlielumus, tostarp transporta loģistiku un metāna noplūdes rādītājus, var iegūt, veicot tehniskos apsekojumus un citus novērtējumus. Vides rādītājiem, piemēram, CO₂ samazināšanas potenciālam, ir nepieciešama aprites cikla novērtējuma metodika, integrējot emisiju datus no izejvielu iegūšanas, rūpnīcas darbības un enerģijas aizstāšanas scenārijiem. Sociālekonomiskie rādītāji, tostarp darba vietu radīšana, piekļuve enerģijai un aprites ekonomika, būtu jāapkopo, izmantojot jauktu metožu pieejas, piemēram, strukturētus apsekojumus un intervijas ar ieinteresētajām personām, kam seko pieejamo datu statistiskā analīze. Šo daudzveidīgo datu avotu integrācija atbalsta stabilu modeļu izstrādi, kas atspoguļo gan tehniskos procesus, gan plašāku sistēmas ietekmi.



2.2. att. Kvantitatīvās kontentanalīzes ietvaros analizētās metodes

2.2. att. attēlā strukturēti apkopota autore kvantitatīvās kontentanalīzes metodes un to lietojumi.

Šo integrēto pieeju var efektīvi piemērot arī elektroenerģijas vai ūdeņraža pētniecībai. Piemēram, ūdeņraža infrastruktūras plānošanā līdzīgi var vākt un analizēt elektrolīzeru un kurināmā elementu darbības datus, infrastruktūras rādītājus, piemēram, cauruļvadu jaudu vai cauruļvadu izmaksas, vides rādītājus, tostarp aprites cikla emisijas no ūdeņraža ražošanas ceļiem, un sociālekonomiskos aspektus, piemēram, piegādes drošību.

Izmantojot sistēmdinamikas modelēšanu, kas papildināta ar datiem no dažādām nozarēm, pētnieki nākotnē varētu simulēt integrētus scenārijus tehnoloģiju mērogošanai, politikas ieviešanai un tirgus attīstībai. Tas ļauj pieņemt uz datiem balstītus lēmumus, kas atbalsta ilgtspējīgu pārkārtošanos energosistēmās, nodrošinot, ka tiek pievērsta uzmanība tehniskajai, vides un sociālajai dimensijai.

Ir svarīgi apzināties, kas nozarē trūkst un izstrādāt atbilstošas inovatīvas pieejas, kas risina identificētos trūkumus. Pievienotās vērtības koncepcijas ir nepieciešamas, lai atjaunīgo energoresursu projektus pieņemtu finansētāji, sabiedrība, kā arī tas ir nepieciešams, lai nodrošinātu projekta vērtību ilgtermiņā pēc tā īstenošanas. Inovatīvai koncepcijai enerģētikas nozarē jābūt rentablai, ar jaunām funkcijām vai uzlabotiem vides un klimata raksturlielumiem. Biometāna projektu inovācijas var pārbaudīt, izmantojot sistēmdinamikas modelēšanu, kā arī ekoinovatīvas biometanizācijas tehnoloģijas.

Lai izveidotu pētniecības ceļvedi valsts mēroga biometāna paplašināšanai vai jebkuram citam atjaunīgo energoresursu enerģijas projektam, ir ieteicama strukturēta, integrēta pieeja, lai nodrošinātu visaptverošu sistēmisko domāšanu, ieinteresēto personu iesaisti un scenāriju plānošanu. Integrējot vairākas pētniecības metodes, ir iespējams nodrošināt gudru enerģijas plānošanu biometāna vai citu energoresursu attīstībai. 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

Lai izvērtētu promocijas darba aktualitāti, līdzšinējās pētniecības tendences un visbūtiskāk – esošajos pētījumos trūkstošos elementus, promocijas darba ietvaros kā viena no metodēm lietota bibliometriskā analīze. Bibliometriskā analīze izmantota kā noderīga pētniecības metode, 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. Neatkarīgi no konkrētās analīzes formas, jebkurai bibliometriskajai analīzei ir trīs galvenie soļi: datu vākšana no atbilstošām datubāzēm, datu pārskatīšana un standartizācija, kā arī šo datu pakļaušana dažādām bibliometriskās analīzes metodēm. Veicot bibliometrisko analīzi, kas kopumā ir statistiskās analīzes veids, vispirms nepieciešams ievākt datus no datubāzēm, balstoties uz attiecīgās analīzes izstrādātāja iepriekš identificētiem datu apstrādes nosacījumiem (ierobežojumiem).[116], [117] 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. iespējamās apsvērumos, taču rezultātu interpretācija bieži vien ietver gan

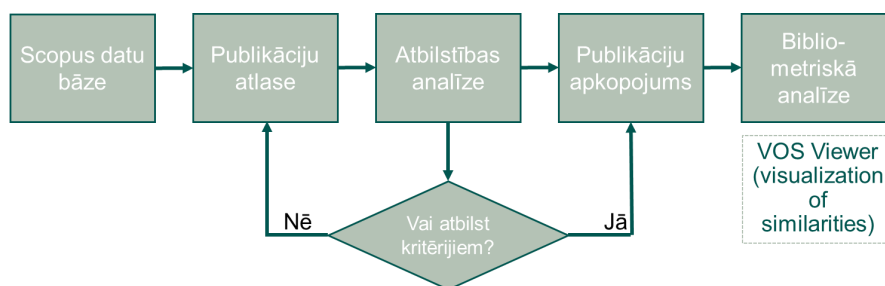
kvantitatīvas, gan kvalitatīvas pieejas. Bibliometriskā analīze palīdz pētniekiem kartēt attiecīgās nozares līdzšinējās zinātniskās izpētes un identificēt nepilnības, kas savukārt sniedz iespēju definēt jaunas pētījumu idejas un tās stratēģiski pozicionēt kopējā zinātniskajā laukā [118], [119].

Pēc atlasīto datu apkopošanas (t.sk. iepriekš minētās pārskatīšanas un standartizācijas), analīzes ietvaros parasti izšķir piecus virzienus:

- **Izpildījuma analīze** – novērtē autoru, institūciju, žurnālu, publikāciju u.tml. faktoru skaitu, izdarot secinājumus par to, kuri rādītāji ir kvantitatīvi lielāki, piemēram, kuri autori, institūcijas, valstis attiecīgo jautājumu visvairāk pētījuši;
- **Zinātniskā kartēšana** – novērtē to kā publikāciju tēmas savstarpēji ir saistītas, veidojot tēmu kopas;
- **Līdz-citēšana** – novērtē kā dažādas publikācijas tiek kopīgi citētas citā publikācijā;
- **Bibliogrāfiskā sasaiste** – novērtē to kā divas dažādas publikācijas atsaucas uz vienu un to pašu trešo publikāciju;
- **Līdz-sastopamība** – novērtē to, kādi atslēgas vārdi kopā biežāk sastopami attiecīgās jomas publikācijās. [120], [121]

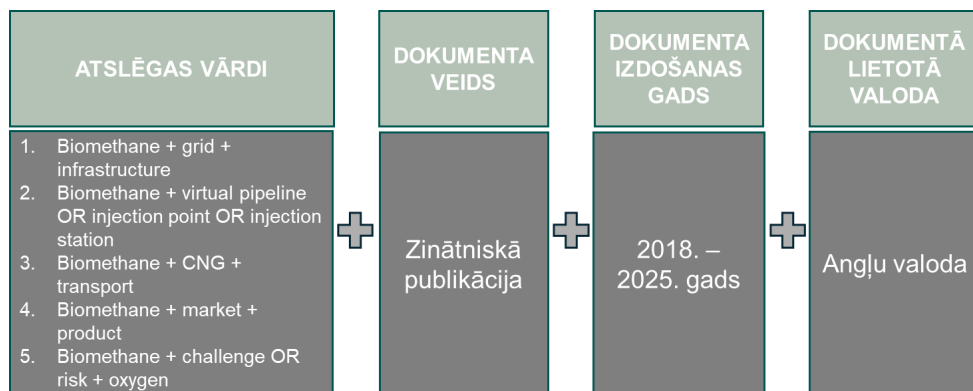
Bibliometriskās analīzes ietvaros tiek izmantota dažāda programatūra, kas ļauj uzskatāmi grafiski vizualizēt rezultātus, piemēram, *VOS Viewer*, *CiteSpace* un *Bibliometrix*. Promocijas darba ietvaros izvēlēts pielietot tieši *VOS Viewer* (angļu val. *visualization of similarities*) programmatūru, ko izstrādāja Leidenes Universitātes Zinātnes un tehnoloģiju pētījumu centrs (*CWTS*) Nīderlandē un, kas izceļas ar vizualizācijas kvalitāti un datu apstrādes efektivitāti. *VOS Viewer* plaši izmanto bibliometriskajā analīzē un citējamības izvērtējumos, lai veidotu un vizualizētu tā saucamos bibliometriskos tīklus.[122]

Kā atspoguļots 2.2. attēlā, bibliometriskā analīze tika veikta *Elsevier Scopus* un *Web of Science* datubāzēs, promocijas darba ietvaros izpēte tika veikta 2025. gadā septembrī. Minētās datubāzes tika izvēlētas kā piemērotākās ievērojot tajās pieejamo plaša tvēruma un apjoma kvalitatīvu rakstu klāstu. Tāpat minētās datubāzes nodrošina efektīvus informācijas meklēšanas rīkus, kas ļauj dažādās detalizācijas pakāpēs pēc atslēgvārdiem un atslēgvārdu kopām atlasīt publikācijas.



2.3. att. Autore izstrādātā bibliogrāfiskās analīzes izmantošanas metodika.

Publikāciju atbilstības analīze balstījās šādos autores identificētos noteicošajos kritērijos: atslēgvārdi; dokumenta veids; dokumenta izdošanas laika periods; dokumentā lietotā valoda. 2.3. attēlā attēlotas šo kritēriju vērtības.



2.4. att. Autores izstrādātie bibliometriskās analīzes kritēriji.

Publikāciju atlasē tika izmantoti atslēgvārdu salikumi piecās grupās, kas balstās promocijas darbā detalizēti vērtētajos izaicinājumos, kas turpmāk izmantotajās metodikās ir apskatīti tieši no Latvijas perspektīvas, proti:

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.

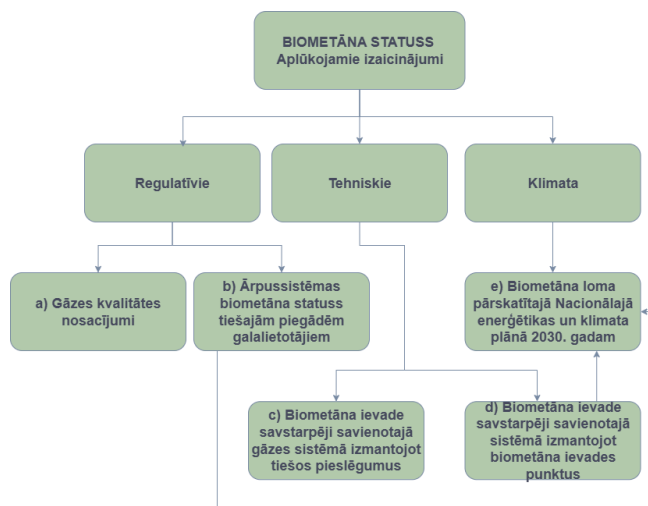
Lai izveidotu zinātniski pamatotu analītisko bāzi, publikāciju atlasē tika ņemtas vērā tikai zinātniskās publikācijas angļu valodā, kas izdotas laika periodā no 2018. gada līdz šim brīdim. Lai arī biometāna nozares pakāpeniska attīstība ir notikusi vairāk kā 20 gadus un jau 2003. gadā stājās spēkā Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīva Nr. 2003/30/EK par biodegvielas un citu atjaunojamo veidu degvielas izmantošanas veicināšanu transportā [123] [124], 2018. gads autores skatījumā būtu vērtējams kā pagrieziena punkts biometāna nozares attīstībā ES. 2018. gadā spēkā stājās Direktīva Nr. 2018/2001 par no atjaunojamajiem energoresursiem iegūtas enerģijas izmantošanas veicināšanu, kurā pirmo reizi detalizēti ietverti nosacījumi, kas skar gāzveida biomasas degvielu (biogāze/biometāns), t.sk. ilgtspējas un siltumnīcefekta gāzu kritērijus, izcelsmes apliecinājumus u.c. būtiskus, sistēmiskus aspektus biometāna nozares attīstībai [124]. Tādējādi 2018. gads izvēlēts kā sākuma periods publikāciju atļasei

bibliometriskās analīzes veikšanā. Datu analīzes grafiskam attēlojumam tie izmantota *VOS Viewer* programmatūra.

Bibliometriskajai analīzei ir loma, lai novērtētu vai kopumā nacionālie biometāna attīstības izaicinājumi saskan ar citviet pasaulē esošajiem izaicinājumiem un pētījumiem. Šī ir svarīga sākotnējās izpētes metode, jo tā palīdz strukturēti redzēt kādus izaicinājumus un tēmas pēta zinātnieki citviet noteiktajā laikā un palīdz noteikt arī kādi faktori un biometāna sistēmas aspekti ir analizējami tālākā promocijas darbā, jau piemērojot citas – matemātiskos aprēķinus balstītas metodes, kuras tālāk arī izvēlētas un piemērotas promocijas darbā.

2.3. Izpētošā gadījumu analīze

Pētījumā atsevišķi veikta tieši Latvijas situācijas izpēte, analizējot un salīdzinot ES praksi ar atbilstošajiem likumdošanas priekšlikumiem Latvijā, kā arī izvērtējot biometāna attīstībai nepieciešamo potenciālu un infrastruktūru. Tas ļauj novērtēt, vai pastāv kādi juridiskie šķēršļi vai nepieciešami uzlabojumi valsts regulatīvajā ietvarā – noteikumos un likumos, lai mazinātu šķēršļus biometāna attīstībai Latvijā. Tāpat šajā pētījumā tiek izvērtēta esošā gāzes infrastruktūra un potenciālās attīstības iespējas, lai nodrošinātu biometāna attīstību. Izstrādātā metodoloģiskā pieeja ir parādīta 2.5. attēlā, un tā ir strukturēta, nosakot galvenos ietvarus, no kuriem var novērtēt un analizēt biometāna stāvokli un izaicinājumus.



2.5. att. Metodoloģiskā pieeja biometāna izaicinājumiem (pētījuma ietvars).

2.5. attēlā ir sniegts strukturēts pārskats par izaicinājumiem, kas saistīti ar biometāna attīstību. Tie ir iedalīti trīs galvenajās grupās - likumdošanas, tehniskie un klimata izaicinājumi, kur katra no kategorijām ir saistīta ar konkrētiem aspektiem, kas tiek pētīti šajā pētījumā. Bultas norāda uz saistību starp šiem izaicinājumiem, parādot skaidru saikni un integrāciju starp likumdošanas, tehniskajiem un klimata apsvērumiem biometāna integrācijas energosistēmā kontekstā. Daži no likumdošanas šķēršļiem biometāna attīstībai ir a) gāzes kvalitāte un b) ārpus

sistēmas esošās gāzes izsekojamības izaicinājumi, savukārt c) un d) apkopo dažādu sistēmā ievadīšanas veidu tehniskos aspektus, kas rada tiešu un netiešu ietekmi uz klimatu. Lai izpētītu šīs problēmas un meklētu risinājumus, tika izmantota literatūras apskats.

Izpētošā gadījumu analīze (*exploratory case study*) ir viens no kvalitatīvajiem pētījumu veidiem, un tā mērķis ir iegūt padziļinātu izpratni par kādu jautājumu. [125]No tā šajā pētījumā par izmantoto metodi ir izvēlēta naratīvā apskata metode. Saskaņā ar *Sovacool et. al.* naratīvais apskats sniedz literatūras vai literatūras apakškopas izpēti noteiktā jomā [126]. Izpētošā gadījumu analīze parasti ir ietverti plaši pētījuma mērķi ar mazāk sistemātisku pieeju rakstu izvēlei, veicinot dziļāku kvalitatīvu izpratni par tēmu. Naratīvā apskata pieeja ir īpaši vērtīga izpētes apskatiem, kuru mērķis ir integrēt ieskatus no dažādām perspektīvām un disciplīnām, vai jomās, kurās nav pietiekamu datu sistemātiskai apskatei vai metaanalīzei. [126]

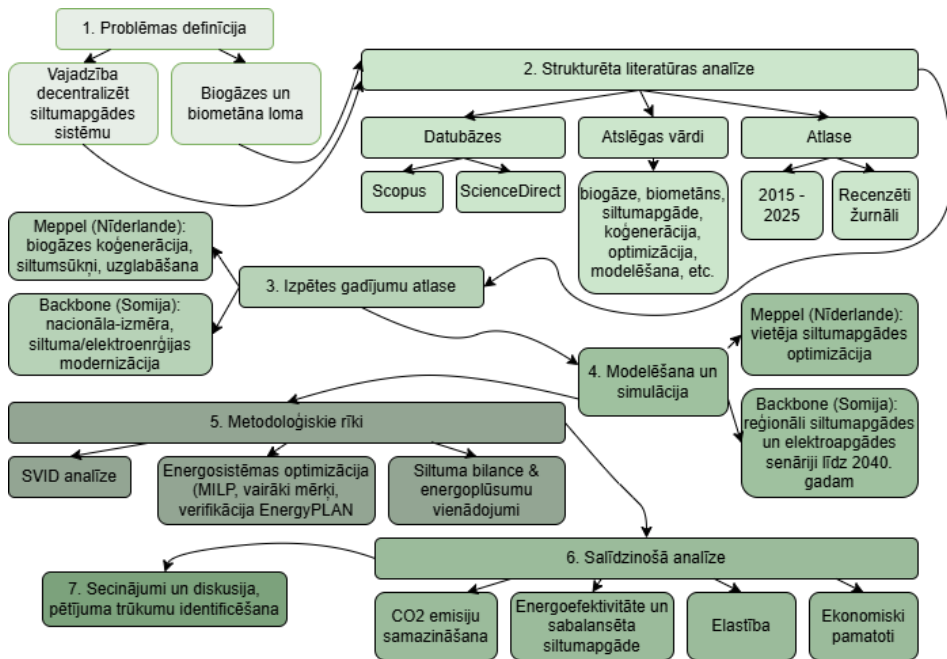
Lai veiktu tālāku Latvijas tiesiskā regulējuma analīzi, izmantoti valsts tiesību akti, tostarp Nacionālo klimata un enerģētikas plānu 2030. gadam, dažādi ar gāzes pārvades sistēmas lietošanu saistīti noteikumi, kā arī Latvijas nozares ekspertu viedokļi, kas pausti valsts un starptautiskās enerģētikas nozares konferencēs, semināros un konsultācijās Latvijā par biometāna attīstības nākotni. Tiek izvēlēti konkrēti noteikumi, jo tajos ir ietvertas būtiskas lomas un regulējums, kam ir vislielākā ietekme uz biometāna nozares attīstību Latvijā.

Papildu pētījums analīzē arī ievērojama citu valstu pieredzi tam kā biogāzi un biometānu iespējams izmantot siltumapgādes vajadzībām. Šajā izpētē izmantotās metodes un metodoloģija balstās uz strukturētu literatūras pārskata veidošanu, kas paredzēts, lai sistemātiski apkopotu un novērtētu esošo zinātnisko literatūru par biogāzes un biometāna izmantošanu centralizētās siltumapgādes sistēmās. Balstoties uz iegūto analīzi un atziņām, ir iespējams izveidot pārskatu par šo atjaunīgo gāzu nozīmīgo potenciālu un praktisko pielietojumu.

Centralizētās siltumapgādes sistēmas piedāvā praktisku un efektīvu veidu, kā izmantot biogāzi un biometānu plašākā mērogā. Kad siltumenerģijas ražošana no atjaunīgajiem energosursiem tiek kombinēta ar siltumenerģijas koģenerācijas stacijām, siltumenerģijas akumulāciju un arvien vairāk siltumsūkņiem, centralizētās siltumapgādes tīkli var sasniegt augstāku efektivitāti, lielāku darbības elastību un būtisku emisiju samazinājumu. Tomēr pētījumi par bioenerģijas integrēšanu centralizētās siltumapgādes sistēmās joprojām ir diezgan sadrumstaloti. Lielākā daļa pētījumu koncentrējas uz konkrētām tehnoloģijām vai atsevišķiem gadījumiem pētījumi, bet plašāka izpētoša analīze, kas vienlaicīgi pievēršas tehniskajiem, ekoloģiskajiem nomas un vides raksturlielumi dažādos sistēmas mērgos ir salīdzinoši ierobežoti [127]. Līdz ar to ar šo analīzi tiek mazināti esošo pētījumu trūkumi, veicot strukturētu salīdzinošo analīzi par diviem reprezentatīviem Eiropas gadījumu pētījumiem: Meppes centralizētās siltumapgādes sistēmu Nīderlandē un *Backbone* enerģētikas sistēmas modelēšanas ietvaru Somijā. *Meppel* pilsētas 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.

Analizējot šīs sistēmas, pētījums izceļ tehnoloģiskās sinerģijas, darbības rezultātus un secinājumus par to, kā biogāze un biometāns var veicināt gan īstermiņa, gan ilgtermiņa centralizētās siltumapgādes dekarbonizāciju.

Šī darba pienesums nav primāra modelēšana, bet gan strukturēta dažādu mērogu sistēmu modelēšanas pieeju salīdzināšana un interpretācija un piemērotā metodika atspoguļota 2.6. attēlā.



2.6. att. Izmantoto pētījumu metožu un loģikas algoritms.

2.6. attēls shematiski ilustrē darbplūsmu šī literatūras analīzes par siltumapgādes sistēmās izmantotajiem energoresursiem. Pirmais solis ir problēmas definēšana, kam seko strukturēts literatūras pārskats, pamatojoties uz kuriem tika atlasīti attiecīgie gadījumu pētījumi. Pēc tam tika identificētas modelēšanas metodes un metodoloģiskie rīki. Pēc tam tika veikta izpētoša analīze, kam sekoja secinājumu izdarīšana un diskusiju punktu un pētījumu trūkumu identificēšana.

Stipro pušu, vājo pušu, iespēju un draudu (SVID) analīze ir strukturēta sistēma, kas apvieno galvenos faktorus, lai atbalstītu stratēģisko novērtējumu. Lai gan tas ir salīdzinoši vienkāršs, tas var sniegt visaptverošu un pieejamu pārskatu ieinteresētajām personām. SVID metodes trūkumi ir tās subjektivitāte, statistiskais raksturs un ierobežota spēja noteikt prioritātes faktorus. Šie trūkumi bieži prasa plašākus pētījumus vai hibrīdpieeju izstrādi, piemēram, daudzkritēriju analīzes metožu integrēšanu, lai uzlabotu objektivitāti. Tomēr tās galvenās priekšrocības, piemēram, lietošanas ērtums un spēja izveidot integrētu pārskatu par konstatējumiem, padara to par vērtīgu instrumentu, lai veidotu sākotnējo izpratni par tēmu [128], [129].

Zinātniskos pētījumos ir analizēta enerģosistēmas optimizācija, izmantojot matemātiskās optimizācijas metodes. Šīs pieejas parasti ir sadalītas viena mērķa un vairāku mērķu optimizācijā. Viena mērķa metodes galvenokārt koncentrējas uz gada izmaksu samazināšanu, savukārt daudz mērķu optimizācija ietver arī papildu faktorus, piemēram, emisijas [130].

Vairākos pētījumos ir pārbaudīta enerģosistēmu plānošana un darbība, izmantojot matemātiskos optimizācijas modeļus. Galvenais mērķis bieži vien ir risināt vienu problēmu, piemēram, samazināt kopējās gada vai aprites cikla izmaksas. Citos gadījumos mērķis ir atrisināt vairākas savstarpēji saistītas problēmas, kas ietver arī vides rādītājus, piemēram, CO₂ emisijas. [131], [132]

Kopsavilkums par pētījumiem, kuros enerģosistēmu projektēšanā galvenokārt tiek izmantotas daudzobjektīvas optimizācijas metodes, uzsverot to kontekstu, metodoloģiju un efektivitāti, ir parādīts 2.9. tabulā.

2.2. tabula

Decentralizētas un centralizētas enerģosistēmas optimizācijas piemēri (izstrādājusi autore no [133])

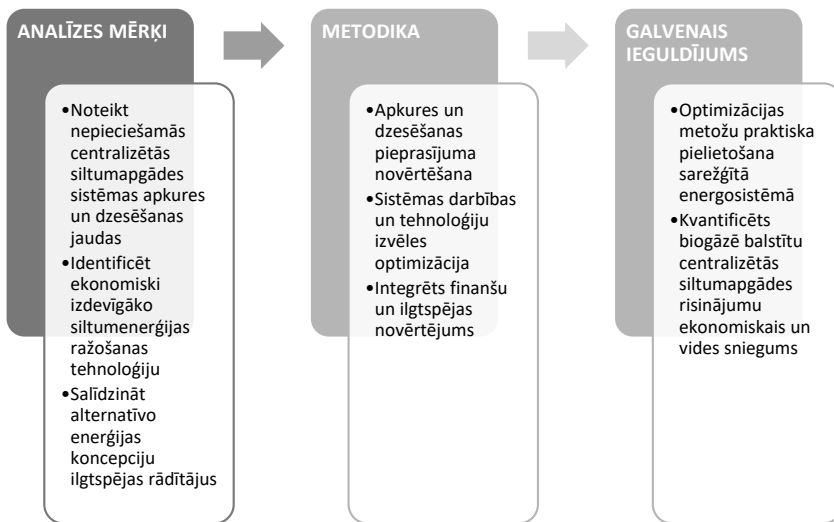
Nr.	Autori un lieta	Nosacījumi	Metodoloģija	Rezultāti, praktiskā pielietojamība
1.	Kersten et al., 2021 Ziemeļvācija	Pilsētas nomales, 4. paaudzes centralizētā siltumapgāde, finansēšanas un nozaru integrācijas ierobežojumi	Izmanto OEMOF (atvērtā koda platformu), simulāciju un optimizāciju siltuma un elektroenerģijas ražošanai, apvienojot dažādus enerģijas avotus, uzglabāšanu un patēriņu.	69% CO ₂ emisiju samazinājums liecina par kombinētās sistēmas optimizācijas praktisku īstenošanu
2.	Liu Y et al., Ķīna (2023)	Trīs Ķīnas pilsētas, saules enerģijas centralizētās siltumapgādes tīkls	Daudzobjektīvs optimizācijas modelis, vienlaicīga iekārtu jaudas un cauruļvada diametra optimizācija, rajonu arhetipi slodzes profila ģenerēšanai.	Kombinētā optimizācija (aprikojums + tīkls) nodrošināja ievērojami augstāku ekonomisko efektivitāti nekā atsevišķa optimizācija.
3.	Li C et al., Pekina (2022)	Pilsētas siltumtīkls, daudzobjektīva optimizācija	Vienlaicīgi modelēti gan ekonomiskie, gan vides aspekti (izmaksas + CO ₂ emisijas), daudzobjektīva optimizācijas pieeja sistēmas projektēšanai.	25% izmaksu samazinājums un 42% CO ₂ emisiju samazinājums; izrādās ekonomiski un ekoloģiski efektīvs risinājums
4.	Elkadeem et al., 2023. gada	Daudzdzīvokļu kompleks ar vairākiem enerģijas avotiem	Sistēmas plānošanas un darbības optimizācijas modelis, ieskaitot ražotāja izvēli un	Enerģijas izmaksu ietaupījums par 46%; parāda, ka detalizēta sistēmas optimizācija

dzīvokļu komplekss	darbības režīmus, ņemot vērā patēriņu un uzglabāšanu.	mikrolīmenī nodrošina ievērojamus ietaupījumus
-----------------------	---	--

2.2. tabula parāda, ka daudzmērķu optimizācija konsekventi nodrošina būtisku CO₂ emisiju samazinājumu (25 - 69 %) un ievērojamus izmaksu ietaupījumus gan centralizētās, gan decentralizētās energosistēmās.

Noderīgu pētījumu un optimizācijas modeli centralizētajai siltumapgādei izstrādāja *Leeuwen et. al. Meppel* apgabalā Nīderlandē. Meppelā energosistēma apvieno biogāzes koģenerāciju, centralizēto siltumapgādi un zemes siltumsūkņus. Centrālā koģenerācijas stacija pārvērš biogāzi no sadzīves notekūdeņu attīrīšanas iekārtas elektroenerģijā un siltumā: elektroenerģija darbina siltumsūkņus, bet siltums apgādā centralizētās siltumapgādes tīklu. Palēninātās ekonomiskās un būvniecības aktivitātes dēļ tika pieņemta pakāpeniska īstenošanas stratēģija, sākot ar aptuveni 40 mājām un pakāpeniski paplašinot līdz 176. Sistēmā ietilpst biogāzes koģenerācijas stacija, rezerves katli, augstas temperatūras ūdens uzglabāšanas tvertne, siltumsūkņi un pazemes ūdens nesējslānis sezonas siltuma un aukstuma uzglabāšanai. Koģenerācija nodrošina siltumu tīklam un elektroenerģiju vietējiem siltumsūkņiem vai eksportam uz tīklu. Dzesēšana tiek piegādāta caur ūdens nesējslāņa aukstuma akām, bet sistēmas temperatūras līdzsvars tiek uzturēts, izmantojot mājāsaimniecības dzesēšanas reģenerāciju un papildu reģenerāciju no sausajiem dzesētājiem vai notekūdeņu attīrīšanas iekārtām. *Leeuwen et. al.* izstrādāja optimizācijas modeli, lai maksimāli palielinātu *Meppel* energoapgādes sistēmas rentabilitāti, analizējot apkures un dzesēšanas pieprasījuma datus. Modelis noteica koģenerācijas staciju un katlu optimālo izmēru un darbību dažādos scenārijos. Tika ierosināta pakāpeniska migrācijas stratēģija, sākot ar vienkāršu, uz katlu balstītu sistēmu, kas prasa zemu sākotnējos ieguldījumus, un vēlāk paplašinot, iekļaujot koģenerāciju un ūdens nesējslāņa siltuma uzkrāšanu. Sākumposmā tiek izmantoti dabasgāzes katli un sertificēta zaļā elektroenerģija, jo biogāze vēl nav pieejama. Konceptija ietver arī dzesēšanas iekārtu, lai apmierinātu dzīvojamo māju dzesēšanas vajadzības. Pētījumā tika novērtēta sistēmas ilgtspēja, salīdzinot fosilā kurināmā patēriņu un CO₂ emisijas dažādos attīstības posmos, īpašu uzmanību pievēršot otrajam posmam, kurā iesaistītas 160 mājas. [134], [135]

Pētījumā tika definēti četri gadījumi un secināts, ka biogāzes izmantošana centralizētajā siltumapgādē ir ilgtspējīgāks risinājums. Tomēr, ja koģenerācijas stacija darbojas ar dabasgāzi, tā ir tikai par aptuveni 6% ilgtspējīgāka nekā parastā apkure ar gāzes katliem. Šīs analīzes mērķi un ieguldījums ir parādīts 2.7. attēlā.



2.7. att. Mērķi un sasniedzamais ieguldījums (izstrādājusi autore izmantojot [135]).

Strukturēts literatūras pārskats tika veikts, izmantojot augstas kvalitātes datubāzes, jo īpaši *ScienceDirect* un *Scopus*. Lai novērtētu esošo pētījumu bāzi, meklēšana apvienoja tādas atslēgvārdus kā "biogāze", "biometāns", "centralizētā siltumapgāde", "energosistēmas optimizācija", "koģenerācija", "modelēšana" un "apkures aprēķini". Iekļaušanas kritēriji koncentrējās uz recenzētiem žurnālu rakstiem, kas publicēti laikā no 2015. līdz 2025. gadam, rakstīti angļu valodā un vēlti biogāzes vai biometāna izmantošanai centralizētajā siltumapgādē vai integrētās energosistēmās. Lai nodrošinātu attiecīgo pētījumu atlasī, tika izslēgti pētījumi, kas attiecās tikai uz mazas jaudas vai ārpus sistēmas esošām biogāzes sistēmām bez pieslēguma centralizētās siltumapgādes tīkliem.

Detalizētai analīzei tika atlasīti divi reprezentatīvi gadījumu pētījumi, pamatojoties uz to metodoloģisko daudzveidību un atbilstību dažādiem Eiropas kontekstiem:

Backbone modelis Somijā, kur Ziemeļvalstu un Eiropas energosistēmām tika piemērota liela mēroga jauktu veselu skaitļu lineārās programmēšanas (MILP) optimizācijas sistēma, uzsverot bioenergoresursu un centralizētās siltumapgādes integrāciju sistēmas ekspluatācijā un investīciju plānošanā[134].

Meppel gadījums Nīderlandē, kur tika izmantots vietējā mēroga optimizācijas modelis, kas apvieno biogāzes koģenerāciju, centralizēto siltumapgādi un siltumsūkņus, kas paredzēts, lai novērtētu sistēmas veiktspēju, enerģijas bilanci un ilgtspēju pilsētvidē [135].

No katra piemēra tika atlasīti galvenie dati par sistēmas konfigurāciju, degvielas sastāvu, efektivitāti, CO₂ samazināšanas potenciālu un tehnokonomiskajiem parametriem. Pēc tam tika veikta izpētoša analīze, koncentrējoties uz:

- modelēšanas pieejas un optimizācijas metodes,
- energoefektivitāte un emisijas rādītāji,
- darbības elastīgums un atjaunīgo energoresursu integrācija,
- un politikas vai investīciju ietekme.

Šis strukturētais salīdzinājums ļauj gūt plašāku perspektīvu no pilsētas līmeņa mikrosistēmām (*Meppel*) līdz nacionālo un reģionālo sistēmu modelēšanai (*Backbone*).

Meppel centralizētās siltumapgādes gadījuma analīzes metodika

Leeuwen et al. izmantotajā metodoloģijā tiek izmantots matemātisks optimizācijas modelis, kas paredzēts, lai identificētu ekonomiski optimālas konfigurācijas centralizētās siltumapgādes (*DH*) sistēmām, kas integrē biogāzes koģenerāciju, katlus un siltuma uzkrāšanu. Izstrādātais optimizācijas modelis bija paredzēts kā validācijas rīks, lai pārbaudītu papildu modelēšanu, kas veikta ar *EnergyPLAN* sistēmu.[135]

Centralizētās siltumapgādes sistēmas sākotnējo koncepciju nosaka tās pārveidotāju efektivitāte, energoresursu īpašības, enerģijas pieprasījums un enerģijas plūsmas. Zemāk sniegts galveno pētījumu metožu kopsavilkums un to pielietojuma piemēri biogāzes un citu enerģijas avotu novērtēšanai centralizētajā siltumapgādē.

2.3. tabula

Strukturētas pētījumu metodes un elementi

Aspekts/elements	Apraksts	Piemērs / Piezīme
Modelēšanas pieceja	Ir izstrādāts optimizācijas modelis, kas vienkāršo sistēmas sarežģītību un kalpo kā validācijas rīks <i>EnergyPLAN</i> rezultātu pārbaudei.	<i>EnergyPLAN</i> plānots izmantot vēlāk.
Modeļa struktūra	Samazināts mainīgo lielumu skaits, ieviešot ierobežojumu, kas sasaista katra ģenerators (koģenerācijas, katla) jaudu ar tā darbības laiku.	Uzmanība tiek pievērsta gan tehniskajiem izmēriem, gan rentabilitātes un ilgtspējas rādītājiem.
Analizētie sistēmas varianti	a) H sistēma tikai ar dabasgāzes katliem; b) ar biogāzes koģenerācijas staciju un atbalsta dabasgāzes katliem.	Abu variantu salīdzinājums CO ₂ emisiju, izmaksu un efektivitātes ziņā.
Enerģijas bilances modelis	Pamatojoties uz pārveidotāja efektivitāti, energoresursiem, pieprasījumu un enerģijas plūsmām.	-
Siltuma uzkrāšanas modelis	Efektivitāte ir atkarīga no uzglabāšanas tvertnes tilpuma, sienu siltumizolācijas kvalitātes un vidējās temperatūras starpības starp ūdeni tvertnē un ārējo gaisu.	Pieņemamā uzglabāšanas ietilpība 125 l vienai mājsaimniecībai 90 °C temperatūrā.
<i>DH</i> sistēmas definīcija	Sistēma iepērk biogāzi vai dabasgāzi, ražo elektroenerģiju un siltumu, pārdod siltumu mājsaimniecībām.	Koģenerācijas stacijas saražotās elektroenerģijas pārpalikums tiek pārdots elektrosistēmā.
<i>HT</i> uzkrāšanās nozīme	Koģenerācijas gadījumā ir nepieciešama lielāka augstas temperatūras uzglabāšanas jauda, lai nodrošinātu stabilu darbību.	- Augstākas kapitāla izmaksas, bet labāka efektivitāte. - Ja tiek izmantoti tikai katli, siltuma jaudu var viegli regulēt

		plašā diapazonā, izmantojot pakāpenisku savienojumu un jaudas modulāciju.
Koģenerācijas stacijas darbības stratēģija	Koģenerācijai vajadzētu strādāt gandrīz nepārtraukti, nevis sekot tūlītējam tīkla pieprasījumam.	Darbība daļējas slodzes režīmā samazina elektroenerģijas ražošanas efektivitāti.
Klimata datu izmantošana	Vidējie klimatiskie dati, ko izmanto bāzes ģeneratoru (koģenerācijas, katlu) jaudas sildīšanai.	Sīkāk paskaidrots sadaļā “Ekonomiskās optimizācijas rezultāti (Meppel gadījums)”.
Jaudas noteikšana praksē	Maksimālais katls tiek pievienots, lai segtu siltuma pieprasījumu ļoti aukstās dienās; Jauda tiek noteikta, izmantojot datus no aukstākās dienas pēdējo 5 gadu laikā. Dzesēšanas jauda – pēc siltākas dienas datiem pēdējo piecu gadu laikā.	Pieņēmums samazina modeļa sarežģītību un ļauj noteikt robežu, kurā sistēma kļūst rentabla.
Enerģijas tarifu pieņēmumi	Tiek pieņemts, ka enerģijas tarifi (dabasgāze, elektroenerģija) ir saistīti tikai ar kopējiem gada patēriņa apjomiem, neņemot vērā stundas cenu svārstības.	Elektroenerģijas biržā un diennakts tirgū cenas mainās pa stundām. Šīs svārstības ir salīdzinoši nelielas, un bieži tiek slēgti līgumi ar fiksētām elektroenerģijas cenām uz ilgāku laiku; Tādā veidā tiek samazināta optimizācijas problēmas sarežģītība un nepieciešamo iterāciju skaits, lai noteiktu māju skaitu, kurās sistēma kļūst rentabla.

Nīderlandes enerģētikas koncepcija kalpoja kā izmēģinājuma sistēma: tā apvieno ar biogāzi darbināmu koģenerācijas dzinēju, rezerves gāzes katlus, augstas temperatūras (HT) ūdens tvertni, siltumsūkņus un ūdens nesējslāņa siltumenerģijas uzkrāšanu. Koģenerācija nodrošina elektroenerģiju siltumsūkņiem un siltumu centralizētajam tīklam. Dzesēšana tiek nodrošināta, izmantojot ūdens nesējslāņa sistēmu, izmantojot siltuma un aukstuma aku.

Modeļa mērķi ietver:

Nepieciešamo siltumapgādes un dzesēšanas jaudu noteikšana siltumapgādes tīklam;

Optimālu kombināciju identificēšana no koģenerācijas stacijas un katlu ekonomiskās (izmaksu) perspektīvas;

CO₂ emisiju samazinājumu novērtēšana biogāzes un dabasgāzes darbībā.

Gada siltuma bilanci pārveidotājiem aprēķina šādi:

$$\left[\frac{Q_{dh,demand,h}}{\eta_{distr} \cdot \eta_{sto}} + Q_{hp,source} \right] \cdot \frac{10^6}{3600} = \dot{Q}_{chp} \cdot t_{op,chp} + \dot{Q}_b \cdot t_{op,b} \quad (2.1.)$$

Ja gan koģenerācijas stacija, gan apkures katli palīdz apmierināt siltuma pieprasījumu, koģenerācijas stacija darbojas prioritāri, bet apkures katliem ir papildu loma. Līdz ar to ir jādefinē papildu izteiksme, kas sasaista koģenerācijas stacijas darbības stundas ar tās jaudu.

$$Q_{dh,demand,h} = n \cdot Q_{dh,hhdemand,h} \quad (2.2.)$$

Līdzīgi mājsaimniecībām, kuras apsilda ar siltumsūkņiem, piemēro šādu attiecību:

$$Q_{hp,demand,h} = m \cdot Q_{hp,hhdemand,h} \quad (2.3.)$$

Siltumsūkņu siltumavota siltuma pieprasījums ir saistīts ar mājsaimniecību siltuma pieprasījumu ar šādu attiecību:

$$Q_{hp,source} = Q_{hp,demand,h} \cdot \left[1 - \frac{1}{COP_{hp}} \right] \quad (2.4.)$$

Koģenerācijas siltuma ražošanas jauda ir saistīta ar koģenerācijas elektroenerģijas jaudu šādā proporcijā:

$$\dot{Q}_{chp} = \dot{E}_{chp} \cdot \frac{\eta_{chp,th}}{\eta_{chp,e}} \quad (2.5.)$$

Biogāzes un dabasgāzes plūsmas ir saistītas attiecīgi ar koģenerācijas elektroenerģijas jaudu un katla siltuma jaudu šādā proporcijā:

$$\phi_{biogas} = \frac{\dot{E}_{chp} \cdot 3600}{\eta_{chp,e} \cdot LHV_{biogas} \cdot 1000} \quad (2.6.)$$

$$\phi_{ngas} = \frac{\dot{Q}_b \cdot 3600}{\eta_{b,th} \cdot LHV_{ngas} \cdot 1000}$$

Kopējais gada pieprasījums pēc elektroenerģijas, ieskaitot dzesēšanas enerģijas ražošanu, ir šāds:

$$E_{demand} \cdot \frac{3600}{10^6} = Q_{hp,demand,h} \cdot \left[\frac{1}{COP_{hp}} + f_{netw,p} \right] + f_{netw,p} \cdot Q_{dh,demand,h} + Q_{demand,c} \cdot \left[f_{netw,p} + \frac{1}{COP_c} \right] \quad (2.7.)$$

Parametrs $f_{netw,p}$ kas atspoguļo tīkla sūkņiem nepieciešamās elektroenerģijas vidējo procentuālo daudzumu attiecībā pret cauruļvadu sistēmā pārvadīto siltumenerģiju. Sūkņu faktisko enerģijas patēriņu nosaka, aprēķinot berzes zudumus sistēmā un piemērojot frekvences regulējamo sūkņu veikspējas raksturlielumus. Praktisko aprēķinu vērtība ir 5%. [135]

2.4. tabula

Optimizācijas modeļa galvenie aspekti (izstrādājusi autore, izmantojot [135])

Aspekts	Apraksts
Mērķis	Nosakiet neto gada peļņu, sasaistot ieņēmumus un izmaksas.

Ieņēmumi	Siltumenerģijas pārdošana mājsaimniecībām un koģenerācijas elektroenerģijas pārpalikuma pārdošana sistēmā.
Izmaksas	enerģijas izejvielu izmaksas (degviela un iepirktā elektroenerģija); attiecīgo enerģijas ģeneratoru (apkures katlu, koģenerācijas, siltumsūkņu un saistīto akumulāciju) faktiskās kapitāla un ekspluatācijas izmaksas.
Infrastruktūras	Neieklāj izmaksas par tīkla daļu, kas atrodas aiz piegādes punkta; tos sedz mājsaimniecības.
Tarifu struktūra	Zemākās siltumsūkņu infrastruktūras izmaksas atspoguļojas tarifa fiksētajā daļā un siltumsūkņu gadījumā pārvēršas papildu ieņēmumos. Aprēķins tika veikts, izmantojot vienādojumu, kas izsaka neto gada peļņu kā maksimizācijas mērķa funkciju.
Vadība	Koģenerācijas stacijas darbības laiks tiek saskaņots ar elektroiekārtu un siltuma patērētāju darba laiku
Investīcijas (INV)	Koģenerācija, apkures katli, siltumsūkņi un akumulatori ir saistīti ar jaudu vai jaudu, un tos raksturo jaudas funkcijas (investīciju kapitāla likme I un investīciju INV). Atbilstošie koeficienti tiek iegūti no izmaksu inženierijas rokasgrāmatām, nozares ekspertu novērtējumiem un piegādātāju piedāvājumiem.

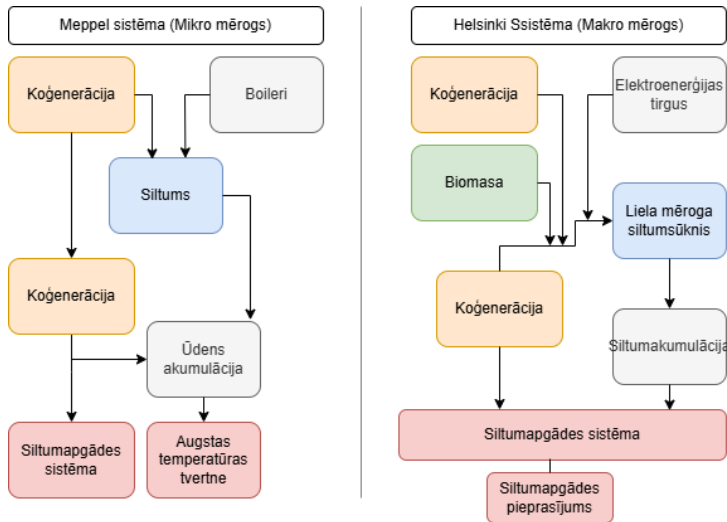
Backbone Energosistēmas modelēšanas sistēma

Makro mēroga modelēšanai tika izmantots *Backbone* ietvars. *Backbone* ir atvērtā koda enerģijas sistēmu modelis, kas ieviests *Python* un atrisināts, izmantojot jauktu veselu skaitļu lineāro programmēšanu (MILP). Tas ļauj optimizēt savstarpēji savienoto elektroenerģijas, apkures un biomasas apgādes sistēmu laika un telpisko optimizāciju.

Modelis pārstāv:

- Ziemeļeiropas energosistēmas (A modulis),
- Somijas bioenerģijas un siltumenerģijas nozares (B un C modulis),
- Pārrobežu elektroenerģijas biržas un biomasas resursu plūsmas.

Ievades datu kopas ietver Eiropas elektroenerģijas pārvades tīklu operatora (*ENTSO-E*) elektroenerģijas jaudu dati, Somijas Dabas resursu institūta (*LUKE*) biomasas statistiku un meteoroloģiskos datus. *ENTSO-E* jaudas dati tika sagrupēti pēc galvenajiem ražošanas veidiem un saskaņoti ar modeļa stundas laika soļiem. *LUKE* biomasas pieejamības dati tika pārveidoti gada piegādes novērtējumos. Meteoroloģiskie dati tika apstrādāti stundas temperatūras un atjaunīgo resursu profilos, lai atspoguļotu sezonālās un diennakts svārstības siltuma pieprasījumā un sistēmas darbībā. Lai ņemtu vērā ievades datu nenoteiktību, tika testēts, kā izmaiņas būtiskajos faktoros ietekmē rezultātus. Modelis novērtē scenārijus līdz 2040. gadam ar pakāpeniskiem dekarbonizācijas pasākumiem - ogļu pakāpenisku pārtraukšanu, biomasas aizstāšanu un liela mēroga siltumsūkņiem Helsinkos un citos Somijas siltumenerģijas tīklos [134]. Abu sistēmas gadījumu vienkāršota vizualizācija ir apkopota 2.8. attēlā.



2.8. att. Sistēmu vizualizācija.

Meppel rajona sistēma ir neliels vietējais centralizētās siltumapgādes tīkls ar tikai dažām sastāvdaļām (koģenerācija, apkures katli, ūdens nesējslānis), ko izmanto neliels skaits ēku. Energosistēmas terminoloģijā šāda veida uzstādīšana parasti tiek aprakstīta kā mikromērogs, jo tā aptver salīdzinoši nelielu ģeogrāfisko teritoriju, nav daudz siltuma avotu un tai ir dažas decentralizētas vienības. Savukārt Helsinku sistēma ir pilsētas mēroga centralizētās siltumapgādes tīkls ar daudziem siltuma avotiem (biomasa, elektroenerģijas tirgus, siltumsūkņi, koģenerācija), un tajā tiek izmantota liela mēroga akumulācija un centrālā infrastruktūra, kas apgādā lielu skaitu patērētāju.

2.4. Daudzkritēriju lēmumu analīze piemērojot *TOPSIS* metodi

Svarīga nozīme pētījuma rezultātu iegūšanā ir piemērotas daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metodes izvēlei. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas jeb *MCDM* metodes ir plaši izmantotas zinātniskajos pētījumos un ir kļuvušas par noderīgu instrumentu mūsdienu lēmumu analīzē, piedāvājot sistemātiskas pieejas alternatīvu novērtēšanai un klasifikācijai dažādos gadījumos. Ir pierādīts, ka šīs metodes ir efektīvas sarežģītu problēmu risināšanā, kur lēmumu pieņēmējiem vienlaicīgi jāapsver vairāki, bieži vien pretrunīgi kritēriji, lai panāktu optimālus risinājumus.

Lai gan pētījumos tiek izmantotas daudzas *MCDM* metodes, tostarp *ELECTRE* (*Elimination and Choice Expressing Reality*), *VIKOR* (*VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje*), *PROMETHEE* (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*) un vairākas citas, *the Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)* un Analītiskās hierarhijas process (*AHP*) ir pierādījušas sevi kā īpaši spēcīgas un plaši pieņemtās pieejas.[136], [137]

Citas ievērojamas *MCDM* metodes ietver svērtās summas modeli (*WSM*) vienkāršākām problēmām, *Multi-Attribute Utility Theory (MAUT)* nenoteiktības apsvēršanai, analītisko tīkla

procesu (*ANP*) sarežģītām savstarpējām atkarībām, *TODIM* riska novērtēšanai un *MULTIMOORA* rezultātu stabilitātei.[138], [139] Tomēr *TOPSIS* praktiskuma un loģikas līdzsvars padara to īpaši vērtīgu reālās dzīves praktiskiem pielietojumiem.

Balstoties uz autores salīdzinājumu, *TOPSIS* izceļas kā efektīvs rīks vairāku iemeslu dēļ. *TOPSIS* ir balstīts uz matemātiskiem principiem, ka izvēlētajai alternatīvai jābūt īsākajam ģeometriskajam attālumam no pozitīvā ideālā risinājuma (*PIS*) un garākajam ģeometriskajam attālumam no negatīvā ideālā risinājuma (*NIS*). Atšķirībā no tādām metodēm kā *AHP*, kas prasa izveidot pārus salīdzināšanai, kas pieaug eksponenciāli ar alternatīvu skaitu, *TOPSIS* uztur salīdzinoši vienkāršus aprēķinus neatkarīgi no problēmas lieluma. Attālumu noteikšana no ideāliem un vismazāk ideāliem risinājumiem labi atbilst cilvēka lēmumu pieņemšanas modeļiem, padarot rezultātus interpretējamākus un vieglāk saprotamus lasītājam. *TOPSIS* var izmantot gan kvantitatīviem, gan kvalitatīviem kritērijiem, tāpēc tas tika izvēlēts kā labākais novērtēšanas instruments, lai noteiktu labāko scenāriju biometāna integrācijai enerģijas tirgū.

Lai gan biometāna integrācijas metodes ir plaši pētītas, pētījumos reti salīdzināti tiešie sistēmas pieslēgumi, biometāna ievades punkti un ārpus sistēmas piegādes, izmantojot vienotu, daudz-kritēriju pieeju. Jo īpaši zinātniskajā literatūrā nepietiekami tiek analizēts loģistikas modelis, kurā biometāns tiek transportēts kā *bioCNG* uz centralizētiem ievades punktiem. Esošie pētījumi galvenokārt koncentrējas uz tehnoloģisko modernizāciju vai kopējo ietekmi uz ilgtspēju, neaptverot infrastruktūras izvēles un kombinēšanas aspektus, lai noteiktu optimālāko risinājumu no vides, ekonomiskā un tehniskā skatpunkta.

Izmantotā metode ir universāla un to var pielietot optimālā risinājuma izvērtēšanai jebkurā valstī. Jaunākie sistemātiskie pārskati uzsver *TOPSIS* metodes pieaugošo nozīmi enerģētikas un ilgtspējas novērtējumos, tostarp tās plašo izmantošanu elektroenerģijas sistēmās un atjaunīgās enerģijas lēmumu pieņemšanas kontekstā. Tāpat tiek attīstīti *MCDA* ietvari enerģijas tehnoloģiju ilgtspējas novērtēšanai, kas apliecina to nozīmību integrētā novērtējumā pēc vairākiem kritērijiem. *TOPSIS* metode ir ērti piemērojama un atkārojama, tai nav nepieciešami dārgi vai sarežģīti modelēšanas rīki, *TOPSIS* aprēķini tika veikti izmantojot *Microsoft Excel* programmu.

TOPSIS metodes matemātiskie aprēķini

Novērtēšanas matricu izveide ir kritiski svarīga, lai veiktu analīzi, taču uzticamu un visaptverošu datu pieejamība ir ierobežota, līdz ar to izvēlēta iespēja izmantot ekspertu novērtējumu (skat. sadaļu “Ekspertu aptaujas procedūra”). 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. Novērtējums veicams skalā no viens līdz pieci, no kuriem viens ir zemākā un pieci ir augstākā vērtība, kamēr katram parametram bija vēlama minimālā vai maksimālā vērtība. Reitingi tika aprēķināti, lai noteiktu vidējo rādītāju, un vidējie vērtējumi tika ievadīti matricā. Katra no tām vides, ekonomiskās un tehniskās matricas nodrošināja vislabāko scenāriju

klasifikāciju. Visbeidzot, visi gala rezultāti tika ievadīti pēdējā apkopojošajā integrētajā matricā, lai noteiktu kopumā labāko variantu no visām perspektīvām.

TOPSIS aprēķina soļi ir aprakstīti 2.1 līdz 2.6 vienādojumā [140]. Ievade ir lēmuma dati V un svaru kopa w , bet izeja ir tuvuma mērs r [141]. Pirmais solis ir normalizācija, kur katram novērtējumam $v_{m,k}$ ir jāveic šāda normalizācija:

$$u_{m,k} = \frac{v_{m,k}}{\sqrt{\sum_{k=1}^K v_{m,k}^2}}, m = 1, \dots, M, k = 1, \dots, K, \quad (2.8)$$

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 $p_{m,k}$ - veiktspējas rādītāja normalizētā vērtība $v_{m,k}$:

$$p_{m,k} = w_m u_{m,k}, m = 1, \dots, M, k = 1, \dots, K. \quad (2.9)$$

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

$$PIA = p^+ = \{p_1^+, p_2^+, \dots, p_M^+\} \text{ un } NIA = p^- = \{p_1^-, p_2^-, \dots, p_M^-\}, \quad (2.10)$$

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:

$$D_k^+ = \sqrt{(p_k - p^+)^T + (p_k - p^+)}, k = 1, \dots, K \quad (2.11)$$

un

$$D_k^- = \sqrt{(p_k - p^-)^T + (p_k - p^-)}, k = 1, \dots, K, \quad (2.12)$$

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 :

$$r_k = \frac{D_k^-}{D_k^+ + D_k^-}, k = 1, \dots, K. \quad (2.13)$$

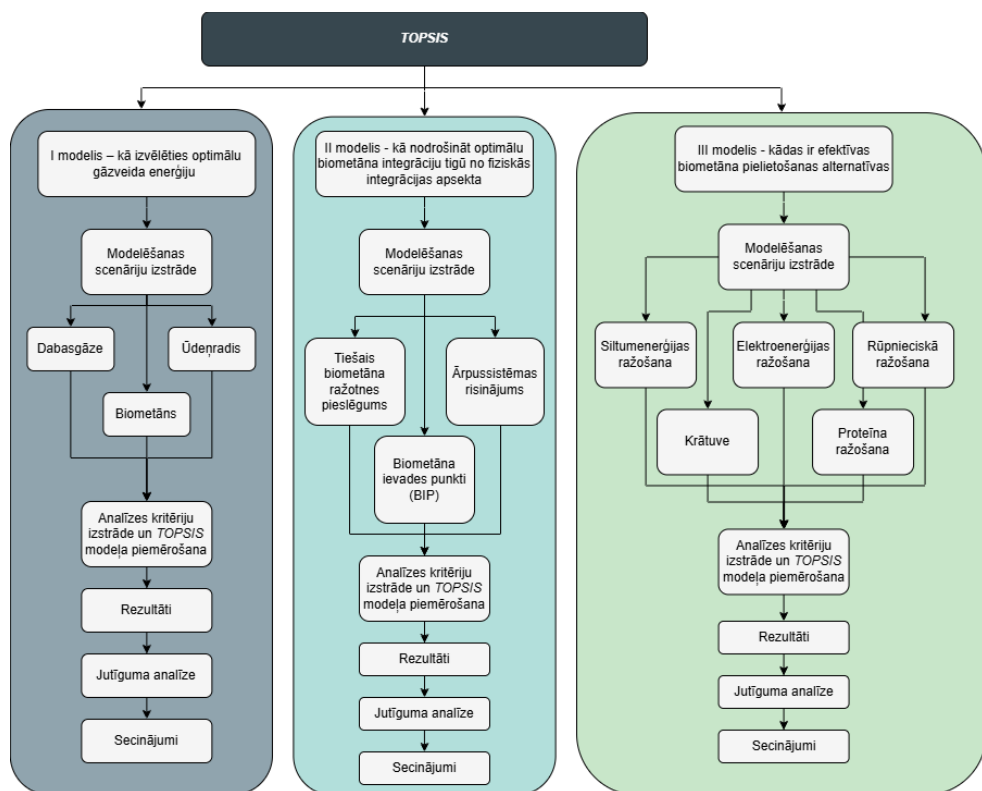
Pēc tam tiek noteikts skaidrs rangs, pamatojoties uz relatīvo tuvumu ideālajam risinājumam. Ieguvums, izmantojot *TOPSIS*, ir tas, ka vērtības ar dažādām vienībām var salīdzināt, un pašas vienības nav novērtējuma uzmanības centrā. Labākos risinājumus var noteikt un analizēt neatkarīgi no izmantotajām vienībām [142] – [144].

TOPSIS metodes pielietojums pētījumā

Pētījuma mērķu sasniegšanai *TOPSIS* metode tika piemērota vairākkārt kā trīs atsevišķi modeļi, lai atbildētu uz atsevišķiem pētījuma jautājumiem, ņemot vērā dažādus vides, ekonomiskos, tehniskos, sociālos, klimata un regulatīvos kritērijus. 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 (2.9. att.).



2.9. 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. Piemēram, I

modelim, kas analizē kā izvēlēties optimālu gāzveida enerģiju kā 1. scenārijs ir dabasgāze, 2. scenārijs – biometāns un 3. scenārijs – ūdeņradis, kur katru no kritērijiem *TOPSIS* ietvaros aprēķina un analizē attiecībā no dažādiem kritērijiem. Savukārt, II modelī, kas analizē, kura no metodēm ir optimāla, lai fiziski integrētu biometānu enerģijas tirgū, 1. scenārijs ir tiešais pieslēgums, 2. scenārijs ir BIP, 3. scenārijs ir ārpussistēmas risinājums, kur katru no scenārijiem analizē pie dažādiem vides, ekonomiskajiem un tehniskajiem kritērijiem. III modelī, kas analizē kādas ir optimālas un efektīvas biometāna lietošanas un izmantošanas alternatīvas, kā scenāriji ir izvēlētas piecas attiecīgās lietošanas alternatīvas.

Ekspertu aptaujas procedūra

Ņemot vērā ierobežotu visaptverošu un savstarpēji salīdzināmu kvantitatīvo datu pieejamību visiem vērtētajiem kritērijiem, šajā pētījumā tika izmantota ekspertu aptaujas novērtēšanas pieeja, lai izveidotu *TOPSIS* analīzes otrā scenārijā izmantotās lēmumu matricas vides, tehniskajiem un ekonomiskajiem kritērijiem.

Kopumā novērtēšanas procesā piedalījās 15 enerģētikas nozares eksperti no Latvijas. Ekspertu paneli veidoja:

- pieci akadēmiskie pētnieki, kas specializējas energosistēmās, vides inženierijā un ilgtspējas novērtēšanā, visi ar doktora grādu (Dr. sc. ing. vai PhD);
- pieci gāzes infrastruktūras un inženierijas profesionāļi ar pieredzi gāzes pārvades un uzglabāšanas sistēmu darbībā un attīstībā; četri no tiem ir ar maģistra grādu, tostarp, būvniecībā, siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģijā un viens ar inženierzinātņu doktora grādu (Dr. sc. ing.);
- pieci politikas un enerģētikas ekonomikas eksperti, kas iesaistīti nacionālajā vai reģionālajā enerģētikas plānošanā un regulējuma izstrādē; četri ar doktora grādu (Dr. sc. ing. vai PhD) un viens ar maģistra grādu.

Pētījumā iesaistītie eksperti bija gan sievietes, gan vīrieši - 40% sievietes un 60% vīrieši. Visiem ekspertiem bija vismaz 3 gadu profesionālā pieredze, turklāt lielākajai daļai bija vairāk nekā 10 gadu pieredze savā jomā. Eksperti pārstāvēja universitātes, pētniecības institūtus, enerģētikas uzņēmumus, gāzes sistēmu operatorus un ministrijas, kas atbildīgas par enerģētikas un klimata politikas izstrādi, kā arī attīstību.

Ekspertu vērtējumi tika iegūti, izmantojot strukturētu rakstisku anketu, kas tika izstrādāta šī pētījuma vajadzībām. Anketā tika aprakstīti trīs biometāna integrācijas scenāriji un sniegti detalizēti skaidrojumi par visiem vides, ekonomiskajiem un tehniskajiem kritērijiem.

Katrs eksperts neatkarīgi novērtēja katru kritēriju katram scenārijam, izmantojot piecu punktu skalu (1 = ļoti zems / ļoti nelabvēlīgs, 5 = ļoti augsts / ļoti labvēlīgs). Anketā tika norādīts vēlamais optimizācijas virziens (minimums vai maksimums), kā arī iekļauti praktiski pieņēmumi, piemēram, tipiski transportēšanas attālumi līdz 50 km un tradicionālās degvielas izmantošana autotransportā, lai nodrošinātu vienotu interpretāciju starp respondentiem.

Visas atbildes tika iegūtas anonīmi un neatkarīgi, bez iepriekšējas grupas diskusijas, lai mazinātu iespējamo aizspriedumu ietekmi. Individuālie vērtējumi tika apkopoti, izmantojot aritmētisko vidējo, un iegūtās vērtības tika izmantotas *TOPSIS* lēmumu matricu izveidei.

Lai novērtētu ekspertu vērtējumu stabilitāti, tika aprēķināti pamata aprakstošās statistikas rādītāji (vidējais, mediāna, minimums, maksimums un standartnovirze), un dispersijas analīze uzrādīja pieņemamu ekspertu viedokļu saskaņotības līmeni. Netika konstatēti būtiski izteikti novirzes gadījumi. Tā kā integrācijas modeli tika analizēti 15 kritēriji un 3 scenāriji, šajā pētījumā kā piemērs 2.5. tabulā ir parādīts tikai viena izvērtētā aspekta un viena scenārija rezultāts, lai gan novērtējums tika veikts visiem kritērijiem un visiem scenārijiem.

2.5. tabula

Ekspertu vērtējumu aprakstošā statistika (piemērs tikai ar vides kritērijiem un vienu tiešā pieslēguma scenāriju).

Kritērijs	Vidējais	Mediāna	Minimālais	Maksimālais	Standartnovirze
CO ₂ emisijas	1,47	1,00	1,00	5,00	1,06
Piegādes ķēdes ilgtspēja	4,00	4,00	1,00	5,00	1,36
Vides riski	2,13	2,00	1,00	5,00	1,06
Gaisa kvalitātes ieguvumi	4,00	5,00	1,00	5,00	1,41
Resursu efektivitāte	4,07	5,00	1,00	5,00	1,39

Salīdzinoši nelielā ekspertu vērtējumu izkliede (standartnovirze robežās no 1,06 līdz 1,41) norāda uz apmierinošu vienprātības līmeni lēmumu pieņemšanas atbalsta vajadzībām.

Iespējamie aizspriedumi ir mazināti, nodrošinot ekspertu daudzveidību, kā arī anonīmu un neatkarīgu vērtēšanu. Akadēmisko, tehnisko un politikas ekspertu kombinācija nodrošināja, ka novērtējums atspoguļo dažādas perspektīvas, kas ir būtiskas biometāna infrastruktūras attīstības lēmumu pieņemšanā.

2.5. Regresijas analīze

Datu ieguve un analīze

Faktiskie darbības dati tika izmantoti no ekspluatācijā nodotās pilna mēroga biometāna ražotnes, kas tika izmantota kā gadījuma izpēte šim pētījumam. Tika izvēlēts noteikts datu vākšanas process, lai labāk izprastu pilnīgu enerģijas un masas bilanci biometāna vērtības ķēdē, sākot no dažādu izejvielu uzņemšanas dažādos maisījumos 7 mēnešu periodā līdz biogāzes attīrīšanai par biometānu un biometāna ievadei savstarpēji savienotajā gāzes sistēmā.

Nepārtrauktas uzraudzības sistēmas var izmantot, lai reģistrētu galvenos procesa parametrus, tostarp reaktora temperatūru, pH, spiedienu, biogāzes plūsmas ātrumu, metāna koncentrāciju un digestāta īpašības. Šajā konkrētajā gadījumā tika noteikti tādi parametri kā metāna koncentrācija, skābeklis (O₂), sērūdeņradis (H₂S), izejvielas avota masa. Tipiskos biometāna pētījumos procesa modelēšanai tiek izmantotas izejvielu sastāva laboratorijas analīzes (piemēram, kopējās cietās vielas, gaistošās cietās vielas, organiskais ogleklis,

slāpekļis). Šie mainīgie lielumi šajā gadījumā izpētē nebija pieejami, tāpēc analīze balstās tikai uz monitoringa sistēmas operatīvajiem datiem. Dati par metānu, dažādiem gāzes kvalitātes parametriem un izejvielām tika papildināti ar darbības ierakstiem par elektroenerģijas un siltuma patēriņu, kā arī gāzes attīrīšanas efektivitāti.

Datu validācijas grupa, kas sastāvēja no inženiera un pētniekiem nodrošināja datu konsekvenču, noņēma novirzes un standartizēja mērvienības, lai padarītu datumu salīdzināmu. Šis process nodrošināja, ka tika iegūta uzticama datu kopa turpmākai statistiskajai un regresijas analīzei.

Datu validācijas grupai jāatbild uz trim pamatjautājumiem:

- Kā izejvielu īpašības un procesa parametri ir saistīti ar biometāna ražu un koncentrāciju?
- Kāda ir paredzamā teorētiskā raža pašreizējos procesa apstākļos?
- Kā darbības vai sastāva uzlabojumi var palielināt metāna izvades efektivitāti?

Pēc datu tīrīšanas un validācijas tika veikta aprakstoša un izpētes datu analīze. Korelācijas analīze tika izmantota, lai identificētu ietekmīgākos mainīgos, kas ietekmē biometāna kvalitāti un ražu, saskaņā ar pieejām, kas aprakstītas [145], [146]. Pēc tam tika izmantota regresijas analīze, lai iegūtu analītiskās attiecības starp izejvielu sastāvu un procesa parametriem, kā parādīts [147]–[149].

Tomēr, lai veiktu datu analīzi, vispirms ir nepieciešams statistiski apstrādāt datus, lai iegūtu grafiskas vai analītiskās korelācijas starp mainīgajiem, piemēram, lai atrastu saikni starp izejvielām, kas būtu neatkarīgais mainīgais vai faktors, un metāna ražu - atkarīgo mainīgo. Meklēto analītisko izteiksmi parasti sauc par parādības vai procesa regresijas vienādojumu (matemātisko modeli), kas raksturo attiecības starp neatkarīgiem un atkarīgiem mainīgajiem. Šādas matemātiskās statistikas metodes kā korelācijas un regresijas analīze tiek plaši izmantotas, lai iegūtu šādas attiecības.

Datu statistiskā apstrāde tiek veikta noteiktā secībā.

- Tiek noteikts aplūkojamās parādības regresijas vienādojums. Šim nolūkam visbiežāk tiek izmantota mazāko kvadrātu metode.
- Iegūtā regresijas vienādojuma koeficientu statistiskā analīze tiek veikta, lai novērtētu to nozīmi vienādojumā. Šī analīzes daļa tiek veikta, izmantojot regresijas analīzi.
- Nosaka neatkarīgo un atkarīgo nejaušo mainīgo savstarpējās ietekmes (stohastiskas attiecības) tuvumu (korelāciju). Šī analīzes daļa tiek veikta ar korelācijas analīzes palīdzību.

Materiāla turpmākā prezentācija sniedz minimālu matemātisko informāciju. Šādas pieejas pamatā ir tas, ka matemātiskās statistiskās analīzes metodes ir darbietilpīgas, un to izmantošana nav iespējama, neizmantojot atbilstošas datorprogrammu pakotnes, piemēram, *SAS*, *STATGRAPHICS*. Tomēr, izmantojot programmu, paketes lietotājam ir jāsaprot iegūtā informācija, jāspēj to novērtēt un redzēt datu savstarpējo saistību. Autores pieredze matemātiskās statistiskās analīzes metožu izmantošanā enerģētikas problēmu izpētē ir sniegta zemāk.

Ievades dati no biometāna rūpnīcas Latvijā ir parādīti 2.6. tabulā, tie tika iedalīti 4 grupās:

- Dzīvnieku atkritumi, kas ietver mājlopus un dzīvnieku izcelsmes produktus;

- Lauksaimniecības atkritumi, kas ietver lauksaimniecības kultūras;
- Pārtikas rūpniecības atkritumi, kas ietver pārstrādes un pārtikas rūpniecības blakusproduktus;
- Sadzīves un rūpniecības dūņas, kas ietver notekūdeņus un notekūdeņu blakusproduktus.

2.6. tabula

Izejvielu apakšgrupas			
Dzīvnieku atkritumi	Lauksaimniecības atkritumi	Pārtikas rūpniecības atkritumi	Sadzīves / rūpnieciskie atkritumi
Asinis	Cukurbiešu atliekas – astes	Pārtikas rūpniecības notekūdeņi	Notekūdeņu dūņas
Vistu kūtsmēsli Piena govju kūtsmēsli	Zāles skābbarība	Rauga pārpalikumi	Rūpniecisko notekūdeņu dūņas
Zirgu kūtsmēsli	Salmi Kukurūzas skābbarība Sēnalas	Flotācijas atlikumi Piena ražošanas blakusprodukti Zivju pārstrādes atkritumi Piena laktoze Naftas atkritumi	

Regresijas analīzes metode un aprēķini

Regresijas analīze nosaka precīzus gadījumu vērtību izmaiņu kvantitatīvos parametrus, t.i., tā izsaka stohastiskās saiknes nozīmi ar funkcionālajām attiecībām.

Regresijas analīzes uzdevums ir:

- noteikt kvantitatīvos parametrus, kas raksturo statistiskās attiecības starp neatkarīgajiem un atkarīgajiem gadījuma mainīgajiem lielumiem;
- Regresijas vienādojuma koeficientu noteikšanai (matemātiskais modelis).

Regresijas analīzi veido divas būtiskākās daļas:

- regresijas vienādojuma noteikšana ar mazākajiem kvadrātiem vai kādu citu metodi;
- iegūtā rezultāta statistiskā analīze.

Atkarībā no neatkarīgo mainīgo (faktoru) skaita un attiecību rakstura starp neatkarīgajiem un atkarīgajiem mainīgajiem var iegūt dažāda veida regresijas vienādojumus:

- Viena faktora lineārs;
- Daudzfaktoru lineārs;
- Linearizēti;

- Nelineārus.

Attiecīgi atšķiras arī kvantitatīvo parametru noteikšana izlases mainīgo izmaiņu novērtēšanai.

Pieņemumi regresijas analīzes piemērošanai nav tik stingri kā korelācijas analīzei. Regresijas analīzi var izmantot pat tad, ja tikai atkarīgais mainīgais seko normālam sadalījumam, šī prasība ne vienmēr attiecas uz neatkarīgajiem mainīgajiem. Regresijas vienādojums var būt lineārs vai nelineārs. Tas nozīmē, ka, piemēram, neatkarīgs mainīgais var parādīties transformētā formā, piemēram, kvadrātā, vai kā divu vai vairāku neatkarīgu mainīgo reizinājums, kas ļauj modelim atspoguļot mijiedarbības efektus.

Tas nozīmē, ka analīze sākas ar atkarīgā mainīgā sadalījuma pārbaudi. Regresijas analīzi var turpināt, ja tās sadalījums ir aptuveni normāls.

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:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n, \quad (2.14)$$

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:

$$y = b_0 + b_1x. \quad (2.15)$$

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:

$$f = m - (n + 1), \quad (2.16)$$

kur m – izlases lielums un $n+1$ – 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:

$$F(f_1, f_2) = \frac{S_{reg}^2(f_1)}{S_{atl}^2(f_2)}, \quad (2.17)$$

kur $S_{reg}^2(f_1)$ – dispersija, kas izskaidrojama ar regresiju, un $S_{atl}^2 \times (f_2)$ – 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:

$$f_1 = m - 1, \quad f_2 = m - n \quad (2.18)$$

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:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1^2 + b_4x_2^2 + b_5x_1 \times x_2 \quad (2.19)$$

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:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 \quad (2.20)$$

Koeficienti $b_0...b_5$ 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. Tā kā "labākā" modeļa jēdziens ir atkarīgs no praktiskiem apsvērumiem un pieredzes statistisko datu

analīzē, nav vienota universāla noteikuma atbilstošas regresijas struktūras izvēlei. Regresijas vienādojuma izvēle balstās uz ekspertu atzinumu, un tas jāveic katram gadījumam pirms statistiskās analīzes. Analīzes kvalitāte un nepieciešamais skaitļošanas darbs ir būtiski atkarīgs no tā, cik veiksmīgi tiek izvēlēta regresijas vienādojuma funkcionālā forma, kā arī no iespējamām alternatīvām. [150]

2.6. Izmaksu un ieguvumu analīze (CBA)

Lai papildinātu izejvielu sastāva un metāna koncentrācijas novērtējumu biometāna ražošanā, tika izmantota izmaksu un ieguvumu analīze (angļu val. *Cost-benefit analysis*). Šī ekonomiskā un vides pieeja ļauj salīdzināt alternatīvus izejvielu ceļus gan monetāro, gan nemonetāro rezultātu ziņā, tādējādi sasaistot ekonomiskos rādītājus ar vides efektivitāti.

Saskaņā ar literatūru CBA ir sistemātiska novērtēšanas metode, kas kvantitatīvi nosaka un salīdzina visas izmaksas un ieguvumus, kas saistīti ar konkrētu projektu vai tehnoloģisko iespēju naudas izteiksmē, lai noteiktu, vai kopējie ieguvumi pārsniedz kopējās izmaksas [151], [152]. Bioenerģijas pētījumos CBA tiek plaši izmantots, lai novērtētu izejvielu iespēju, pārveidošanas ceļu un tehnoloģiju uzlabojumu ekonomisko dzīvotspēju, ņemot vērā tiešās ražošanas izmaksas, ārējo ietekmi uz vidi un novērstās emisijas [153], [154].

Šajā pētījumā CBA tika pielāgota, lai koncentrētos uz attiecību starp izejvielu izmaksām un metāna koncentrāciju (CH_4 %), kas izteikta ar izmaksu rādītāju (EUR/CH_4 %). Šis rādītājs atspoguļo ražošanas izmaksu uz vienu vienību nelielās izmaiņas metāna koncentrācijas pieaugumā, tādējādi integrējot gan ekonomiskos, gan kvalitatīvos (gāzes sastāva) biometāna ražošanas aspektus.

Lai turpinātu analīzi, tika identificēti izejvielu veidi, kas tika pētīti iepriekšējos posmos (piemēram, kūtsmēsli, piena atliekas, flotācijas atliekas, notekūdeņu dūņas), kā arī to iepirkuma izmaksas un paredzamā CH_4 koncentrācija biogāzes maisījumā.

Izmaksu rādītājs (EUR/CH_4 %) tika iegūts, sasaistot izejvielu izmaksas ar iegūto metāna koncentrāciju. Tas ļāva kvantitatīvi noteikt, kā CH_4 % pieaugums ietekmē ražošanas izmaksas uz metāna vienību, tika pārbaudīta saistība starp CH_4 koncentrāciju un izmaksu rādītāju.

Lai gan galvenie pieņēmumi (izejvielu cena, metāna raža un pirmapstrādes izmaksas) nav izsmeltoši kvantitatīvi, tie tika kvalitatīvi pārbaudīti, lai identificētu parametrus, kas visvairāk ietekmē izmaksu mainīgumu. Rezultāti tika interpretēti kā kompromisi starp izejvielu kvalitāti, enerģijas ražošanu un ražošanas izmaksām. Tomēr ir svarīgi uzsvērt, ka, lai gan izmaksu rādītājs (EUR/CH_4 %) atspoguļo izejvielu un apstrādes izmaksas, tas neietver kapitāla nolietojumu, darbaspēka un uzturēšanas izmaksas, kas tika pieņemtas nemainīgas.

Izmaksu un ieguvumu analīzes principi

Lai pilnībā izvērtētu biometāna izmantošanas perspektīvas Latvijā, būtiski izvērtēt gan promocijas darbā analizētos tehniski praktiskos risinājumus un izaicinājumus, gan arī veikt

izmaksu efektivitātes analīzi, lai pārlicinātos par dažādu iespējamo risinājumu ekonomisko lietderību.

CBA ir instruments, kas nodrošina iespēju salīdzināt konkrēta projekta izmaksas ar tā sniegtajiem ieguvumiem, lai noteiktu, vai ieguvumi pārsniedz izmaksas.[155] *CBA* tādējādi ļauj projektu īstenotājiem un citām ieinteresētajām pusēm izdarīt secinājumu par projekta lietderību. Lai to izdarītu, izmaksas un ieguvumi ir jāmonetarizē un jāizsaka kā neto pašreizējā vērtība, jo izmaksas parasti rodas pirms ieguvumiem, un līdz ar to izmaksu un ieguvumu parādīšanās laiks būtiski ietekmē vērtējumu.[156]

Lai gan izmaksas un ieguvumi *CBA* ietvaros ir jāmonetarizē finanšu analīzes veikšanai, monetārā vērtība ir tikai viens no instrumentiem kā izteikt projekta sociālās izmaksas un ieguvumus, lai novērtētu ietekmi uz sabiedrības labklājību.[157] Biometāna ražotāju gadījumā projekta izdevīgumu nevar vērtēt tikai pēc pārdotā biometāna daudzuma, jo pastāvētu iespēja noteikt valsts atbalsta pasākumus, kas veicinātu projekta attīstību, bet nepalielinātu sabiedrības labklājību, ja šādi atbalsta pasākumi būtu kādā mērā jākompensē dabasgāzes galalietotājiem [158].

Sociālās labklājības ietekmi novērtēt nav vienkārši, jo tā ir samērā subjektīva kategorija. Daudzi pētnieki izmanto Pareto efektivitātes koncepciju, kas nosaka, ka projekts uzskatāms par sabiedrības labklājībai pozitīvu, ja kāds iegūst, nevienam citam nezaudējot. Tomēr šis kritērijs var viegli izkropļot *CBA* rezultātus, ja, piemēram, tikai viena persona sūdzas, piemēram, par cauruļvada būvniecību biometāna transportēšanai. Vēl viens sociālās labklājības vērtēšanas kritērijs ir Kaldora-Hiksa kompensācijas tests, kas nosaka, ka projekta ietekme uz sociālo labklājību ir pozitīva, ja projekta sniegtie ieguvumi ir pietiekami lieli, lai teorētiski varētu kompensēt zaudējumus tiem, kas cieš no projekta negatīvajām sekām. Te gan būtiski uzsvērt, ka faktiskā kompensācija nav jāmaksā – šī metode ir tikai analītisks instruments sociālekonomisko ieguvumu novērtēšanai [159].

Vērtējot izmaksas biometāna integrēšanas risinājumiem Latvijas dabasgāzes sistēmā, būtiski analizēt trīs galvenos scenārijus: biometāna tiešu ievadi no ražošanas vietas dabasgāzes sistēmā, biometāna transportēšanu ar autotransportu uz centralizētu ievades punktu dabasgāzes sistēmā un biometāna piegādi tieši gala patērētājam, piemēram, degvielas uzpildes stacijās. Katrai pieejai ir atšķirīgas tehniskās, ekonomiskās un vides prasības, kā arī izmaksas un ieguvumi.

Papildus tiešajām darbības un kapitāla izmaksām, kas saistītas ar attīrīšanu un ievadi sistēmā, biometāna integrāciju energoapgādē pamato arī vairāki netieši ekonomiskie ieguvumi un ārējie ieguvumi. Viens no būtiskākajiem ir iespēja nākotnē izvairīties no oglekļa dioksīda emisiju kvotu izmaksām. Tā kā ES Emisijas kvotu tirdzniecības sistēmas (ES *ETS*) oglekļa cena 2025. gadā svārstās ap 80 EUR/t CO₂ un vērtējot tendences paredzams, ka tā turpinās pieaugt [160], [161], fosilās dabasgāzes aizstāšana ar biometānu var nodrošināt ievērojamus ietaupījumus uzņēmumiem un enerģijas piegādātājiem, uz kuriem attiecas oglekļa kvotu maksājumi. Ņemot vērā, ka biometāns ES *ETS* ietvaros tiek uzskatīts par oglekļa neitrālu, ražotāji un lietotāji var būtiski samazināt savas emisiju izmaksas, tādējādi stiprinot konkurētspēju ilgtermiņā.

Bez tiešajām klimata priekšrocībām biometāna ražošana nodrošina arī būtisku ieguldījumu vides kvalitātes uzlabošanā, īpaši atkritumu apsaimniekošanas jomā. Ja lauksaimniecības atlieki, pārtikas industrijas atkritumi un notekūdeņu dūņas netiek apstrādātas, tie kļūst par nozīmīgiem metāna emisiju avotiem. To novirzīšana biogāzes ieguvei palīdz samazināt nekontrolētās emisijas un veicina pāreju uz aprites ekonomikas principiem. Anaerobās fermentācijas rezultātā iegūto fermentātu iespējams izmantot kā organisko mēslojumu, tādējādi noslēdzot barības vielu aprites ciklu, mazinot sintētisko mēslojumu lietošanas nepieciešamību un samazinot ar to saistītās negatīvās ietekmes uz vidi.[162], [163]

Apkopojot tiešos un netiešos ieguvumus, biometāna integrācija Latvijas dabasgāzes sistēmā veicina enerģijas avotu dažādošanu un nodrošina arī stratēģisku ieguldījumu ilgtspējīgā lauksaimniecībā, emisiju mazināšanā un reģionu attīstībā. Tāpēc, izvērtējot biogāzes integrācijas projektus, izmaksu-ieguvumu analīzē vērā ņemami ir arī šie plašākie sociālekonomiskie un vides aspekti.

Līdzīgi kā autore 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 centralizētu ievades punktu dabasgāzes sistēmā;
- 3) biometāna tieša piegāde gala patērētājam no ražotnes vietas.

Novērtējumā, kas atspoguļots arī autore zinātniskajā publikācijā[164], iekļautas sākotnējās izmaksas jeb kapitālieguldījumi (*CAPEX*), darbības izmaksas (*OPEX*), degvielas izmaksas (2. un 3. scenārijā), kā arī provizorisks ienākumi un projekta atmaksāšanās laiks. Šāda metodika ļauj salīdzināt dažādus biometāna integrācijas risinājumus vienotos nosacījumos.

Kapitālieguldījumu aprēķins ietver visas vienreizējās izmaksas, kas nepieciešamas projekta iesākšanai. Pirmajā scenārijā tajās ietilpst iekārtu izmaksas (biogāzes attīrīšanas un uzlabošanas iekārtas, ievades aprīkojums, piemēram, regulatori un odoranti), cauruļvadu būvniecības izmaksas (materiāli un būvdarbi), projektēšanas un plānošanas izdevumi (inženiertehniskie darbi, administratīvie procesi), kā arī maksājumi par dažādu atļauju un licenču saņemšanu (pieslēgšanās dabasgāzes sistēmai, vides atļaujas, vietējie regulējumi). Lai gan kapitālieguldījumu formula (sk. vienādojumu Nr. 2.14) ir vienkārša, rezultāti ievērojami atkarīgi no dažādiem pieņēmumiem – iekārtu cenām, darbaspēka izmaksām un citiem apstākļiem. Lai nodrošinātu salīdzināmību, visos scenārijos tika pieņemti vienādi, Latvijai raksturīgi nosacījumi.

$$CAPEX = I + C + T + I.P. + A\&P \quad (2.21)$$

kur:

CAPEX – kapitālieguldījumi, EUR

I – iekārtu izmaksas, EUR

C – cauruļvadu izmaksas (ja attiecināms), EUR

T – transporta infrastruktūras izmaksas (ja attiecināms), EUR

I.P. – ievades punkta izmaksas (ja attiecināms), EUR

A&P – atļauju un projektēšanas izmaksas, EUR

Lai pilnvērtīgi izvērtētu biometāna ražošanas projekta ekonomisko pamatotību, jāanalizē ne vien sākotnējie kapitālieguldījumi, bet arī ikdienas darbības izmaksas. *OPEX* ietver visas ar sistēmas darbību saistītās izmaksas, tostarp iekārtu ekspluatāciju, enerģijas patēriņu, darbaspēka resursus, uzturēšanu un remontdarbus, materiālu izmaksas, kā arī administratīvās prasības, kas nodrošina nepārtrauktību un efektīvu tehnoloģiskā procesa norisi (sk. vienādojumu Nr. 2.15).

$$OPEX = I.V. + E + D + U + A.I. + C \quad (2.22)$$

kur

OPEX – ekspluatācijas izmaksas, EUR/gadā

I.V. – izejvielu izmaksas, EUR/gadā

E – enerģijas izmaksas, EUR/gadā

D – darbaspēka izmaksas, EUR/gadā

U – uzturēšanas izmaksas, EUR/gadā

A.I. – administratīvās izmaksas, EUR/gadā

C – citas izmaksas, EUR/gadā

Lai pilnvērtīgi izvērtētu biogāzes integrācijas Latvijas dabasgāzes sistēmā ekonomisko lietderību, kapitālieguldījumi un ekspluatācijas izmaksas jāanalizē kopā ar potenciālajiem ieņēmumiem, kas ļauj aprēķināt projekta atmaksāšanās periodu (*payback period* jeb *PBP*). Atmaksāšanās periods ir plaši izmantots finanšu indikators atjaunīgās enerģijas projektu izvērtēšanā, jo tas sniedz ieinteresētajām pusēm iespēju novērtēt, vai ieguldījums spēj atmaksāties saprātīgā laika posmā un līdz ar to ir finansiāli pamatots.

Atmaksāšanās periods tiek aprēķināts, izmantojot vienādojumu Nr. 2.16:

$$PBP = \frac{CAPEX}{IE\check{N}\check{E}MUMI - OPEX} \quad (2.23)$$

kur

PBP – atmaksāšanās periods, gadi

CAPEX – kapitālieguldījumi, EUR

OPEX – ekspluatācijas izdevumi, EUR/gadā

Ieņēmumi tiek aprēķināti, pamatojoties uz biogāzes pārdošanas apjomu, ko aprēķina šādi (sk. vienādojumu Nr. 2.17):

$$IE\check{N}\check{E}MUMI = \text{Biogāzes ražošana gadā} \times \text{Tirgus cena} \quad (2.24)$$

kur

IE\check{N}\check{E}MUMI - naudas summa, ko uzņēmums iegūst, pārdodot saražoto biometānu, EUR/gadā

Biometāna ražošana gadā – saražotās biogāzes apjoms, MWh/gadā

Tirgus cena – biometāna tirgus cena par vienu MWh, EUR/MWh.

Izmaksu un ieguvumu analīzes kapitālieguldījumu pieņēmumi

Kapitālieguldījumu aprēķināšanai tika izmantoti gan pieejamās zinātniskās un tehniskās literatūras dati, gan arī nozares uzņēmumu sniegtie izmaksu piedāvājumi. Atsevišķu komponentu izmaksas (iekārtas, cauruļvadi, projektēšanas darbi u.c.) noteiktas, balstoties uz Latvijā raksturīgām vidējām izmaksu vērtībām. Tā kā reālās izmaksas var variēt atkarībā no konkrētās projekta lokācijas un tehniskajiem apstākļiem, aprēķinos izmantotas standarta vienības izmaksas un vidējie rādītāji, kas attēloti 2.7. tabulā.

2.7. tabula

Kapitālieguldījumi 1. scenārijam tiešajiem pieslēgumiem

Komponente	Vienības izmaksas (EUR)	Vienību skaits	Kopējās izmaksas (EUR)
Biogāzes attīrīšanas iekārta	1 500 000	1	1 500 000
Biometāna ievades aprīkojums (regulatori, odorizatori)	200 000	1	200 000
Cauruļvadu izbūve (EUR/km)	1 500 000	10 km	15 000 000
Projektēšanas un administratīvās izmaksas	-	-	250 000
Atļaujas un licenču iegūšana	-	-	100 000
Kopā CAPEX			17 050 000

Biogāzes attīrīšanas iekārtu izmaksas tika noteiktas, izmantojot starptautiskos pētījumus par biometāna ražošanas investīciju vajadzībām.[165] Savukārt biogāzes ievades aprīkojuma izmaksas balstītas uz Eiropas un Ziemeļamerikas gāzes infrastruktūras projektu analīzēm [166], [167], bet cauruļvadu izbūves izmaksas literatūrā tiek minētas robežās no 500 000 līdz 2 500 000 EUR/km[168]. Aprēķinos pieņemts, ka ražotne atrodas 10 km attālumā no esošās dabasgāzes infrastruktūras, šis pieņēmums izmantots arī otrā scenārija modelēšanā. Projektēšanas, administratīvās izmaksas un maksājumi par nepieciešamo atļauju un licenču saņemšanu tika noteikti, balstoties uz līdzīgu enerģētikas projektu pieredzi un normatīvo aktu prasībām.[169] Tā kā izmaksas var atšķirties atkarībā no izvēlētas tehnoloģijas, reģionālajiem apstākļiem un tirgus situācijas, aprēķinos izmantotas vidējās vērtības no pieejamās literatūras, un salīdzināšanas nolūkos tās saglabātas nemainīgas visos trīs scenārijos.

Pirmajā scenārijā galvenās kapitālieguldījumu pozīcijas ietver biogāzes attīrīšanas iekārtas, cauruļvadu izbūvi un nepieciešamo pieslēguma aprīkojumu dabasgāzes tīklam. Lai gan šī pieeja paredz augstus sākotnējos ieguldījumus cauruļvadu infrastruktūrā, tā nodrošina stabilu un ilgtermiņā efektīvu biometāna integrācijas risinājumu.

Otrajā scenārijā kā alternatīva cauruļvadu būvniecībai tiek apsvērta biometāna transportēšana uz centralizētu ievades punktu dabasgāzes sistēmā jeb BIP. Tas potenciāli samazina sākotnējo infrastruktūras investīciju apjomu, taču vienlaikus palielina darbības izmaksas, kas saistītas ar biometāna pārvadāšanu kā tas atspoguļots 2.8. tabulā.

2.8 tabula

Kapitālieguldījumi 2. scenārijam biometāna ievades punktiem

Komponente	Vienības izmaksas (EUR)	Vienību skaits	Kopējās izmaksas (EUR)
Biogāzes attīrīšanas iekārta	1 500 000	1	1 500 000
Biometāna saspiešanas iekārta	500 000	1	500 000
Uzglabāšanas tvertne	1 000 000	1	1 000 000
Transporta cisternas	250 000	5	1 250 000
Specializētie kravas auto	120 000	5	600 000
Biometāna ievades punkts	1 000 000	1	1 000 000
Biometāna ievades aprīkojums (regulatori, odorizatori)	200 000	1	200 000
Projektēšana un administratīvās izmaksas	-	-	250 000
Licenču un pieslēguma maksas	-	-	100 000
Kopā CAPEX			6 400 000

Otrajā scenārijā, kur biometāns tiek nogādāts ar autotransportu uz centralizētu ievades punktu, kapitālieguldījumu sastāvs būtiski atšķiras no pirmā scenārija struktūras. Šajā gadījumā izmaksu galvenās pozīcijas veido biogāzes attīrīšanas un saspiešanas iekārtas, specializēto pārvadāšanas transportlīdzekļu iegāde, kā arī biometāna ievades stacijas izveide dabasgāzes sistēmā. Biogāzes attīrīšanas iekārtu izmaksas šim scenārijam tika pieņemtas tādas pašas kā pirmajā scenārijā, savukārt saspiešanas iekārtu izmaksas, kas nepieciešamas biometāna drošai un efektīvai transportēšanai literatūrā tiek lēstas ap 500 000 EUR vērtībā.[170]

Lai arī biometāns šajā scenārijā tiek transportēts uz centralizētu ievades vietu, ražošanas objektā nepieciešamas arī uzglabāšanas tvertnes, kas nodrošina vienmērīgu piegādes plūsmu pārvadājumiem un efektīvu loģistiku. Šo tvertņu izmaksas ir atkarīgas no tilpuma un spiediena prasībām un var būt robežās no 500 000 līdz 1 500 000 EUR.[171], [172] Biometāna transportēšanai nepieciešami specializēti transportlīdzekļi un cisternas, kuru izmaksas noteiktas, balstoties uz starptautisko pieredzi, tirgus datiem un literatūras avotiem.[173], [174] Tāpat nepieciešama ievades punkti biometāna ievadīšanai dabasgāzes sistēmā, un tās izmaksas saskaņā ar pieejamo literatūru un nozaru praksi var sasniegt aptuveni 1 000 000 EUR.[173], [175]

Trešajā scenārijā tiek izvērtēta cita piegādes koncepcija – biometāna piegāde tieši gala lietotājiem, piemēram, degvielas uzpildes stacijām vai rūpnieciskajiem patērētājiem, apejot dabasgāzes sistēmu. Lai gan šajā modelī netiek izmantota centralizēta ievades sistēma, tomēr nepieciešami ieguldījumi biometāna uzglabāšanas, saspiešanas un transportēšanas infrastruktūrā. Tāpēc būtiski analizēt šī scenārija kapitālieguldījumu struktūru, kas redzama 2.9. tabulā.

2.9. tabula

Kapitālieguldījumi 3. scenārijam

Komponente	Vienības izmaksas (EUR)	Vienību skaits	Kopējās izmaksas (EUR)
------------	-------------------------	----------------	------------------------

Biogāzes attīrīšanas iekārta	1 500 000	1	1 500 000
Biogāzes saspiešanas iekārta	500 000	1	500 000
Transporta cisternas	250 000	5	1 250 000
Specializētie kravas auto	120 000	5	600 000
Uzglabāšanas tvertnes	1 000 000	1	1 000 000
Projektēšana un administratīvās izmaksas	-	-	250 000
Licenču un pieslēguma maksas	-	-	100 000
Kopā CAPEX			5 200 000

Izmaksu un ieguvumu analīzes ekspluatācijas izmaksu pieņēmumi

Pirmajā scenārijā biometāns no ražošanas vietas tiek tieši ievadīts dabasgāzes sistēmā, tādējādi novēršot izmaksas, kas citkārt būtu saistītas ar biometāna pārvadāšanu, piemēram, transportlīdzekļu ekspluatāciju, degvielas patēriņu un loģistikas nodrošināšanu. Šāds tiešs ievades risinājums nodrošina nepārtrauktu piekļuvi dabasgāzes infrastruktūrai un ļauj ražotājam stabili piegādāt biometānu plašam lietotāju lokam. Vienlaikus šai pieejai nepieciešami ievērojami sākotnējie ieguldījumi un pastāvīgi ekspluatācijas izdevumi, kas saistīti ar biogāzes attīrīšanas iekārtu darbību, saspiešanas nodrošināšanu līdz sistēmā prasītajam spiedienam, kā arī pieslēguma uzturēšanu pie dabasgāzes sistēmas. Papildu izmaksas var rasties arī no regulāras biometāna kvalitātes uzraudzības, lai garantētu atbilstību sistēmas tehniskajām prasībām, kā arī no regulatīvo un administratīvo procedūru izpildes – licenču un atļauju saņemšanas, dokumentācijas sagatavošanas u.c. Ekspluatācijas izmaksas 1. scenārijam atspoguļotas 2.10. tabulā.

2.10. tabula

Ekspluatācijas izmaksas 1. scenārijam

Komponente	Aprēķina metode	Izmaksas (EUR/gadā)
Izejvielas	20 EUR/MWh x 20 000 MWh/gadā	400 000
Enerģija	0.12 EUR/kWh x 1 250 000 kWh	150 000
Darbspēks	2 darbinieki x 12 000 EUR/gadā	24 000
Uzturēšana	3% no CAPEX (17 050 000)	511 500
Administratīvās izmaksas	5% no darbspēka un uzturēšanas izmaksām	26 775
Kopā OPEX		1 112 275

Pirmajā scenārijā kopējās ekspluatācijas izmaksas tiek novērtētas aptuveni 1 112 275 EUR gadā. Šajā modelī nav nepieciešami ar transportēšanu saistīti izdevumi, taču galvenās izmaksu pozīcijas veido elektroenerģijas patēriņš un iekārtu uzturēšana. Darbaspēka izmaksas ir salīdzinoši nelielas, jo sistēma darbojas automatizēti un nepieciešami tikai divi darbinieki ar vidējo gada algu 12 000 EUR. Lai nodrošinātu salīdzināmību, visos trīs scenārijos darbinieku algas tika pieņemtas vienādas. Izejvielu izmaksas noteiktas 20 EUR/MWh apmērā, pieņemot, ka gada laikā tiek saražoti 20 000 MWh biogāzes [10], [176]. Literatūrā norādīts, ka biogāzes attīrīšanas un saspiešanas procesi ir ļoti energoietilpīgi un gada elektroenerģijas patēriņš var sasniegt līdz pat 1 250 000 kWh. Uzturēšanas un administratīvie izdevumi aprēķināti, balstoties uz literatūras datiem: uzturēšanas izmaksas – 3% no kopējiem kapitālieguldījumiem, administratīvās izmaksas – 5% no darbaspēka un uzturēšanas izmaksu summas. [172]

Kā minēts iepriekš, otrajā scenārijā biometāns tiek nogādāts uz centralizētu ievades punktu dabasgāzes sistēmā, kas saskaņā ar autora pieņēmumu atrodas 10 km attālumā no ražotnes, un tas nozīmē papildu transporta izmaksas salīdzinājumā ar pirmo scenāriju (2.11. tab.).

2.11. tabula

Ekspluatācijas izmaksas 2. scenārijam

Komponente	Aprēķina metode	Izmaksas (EUR/gadā)
Izejvielas	20 EUR/MWh x 20 000 MWh/gadā	400 000
Enerģija	0.12 EUR/kWh x 1 250 000 kWh	150 000
Darbaspēks	2 darbinieki x 12 000 EUR/gadā	24 000
Uzturēšana	3% no CAPEX (6 400 000)	192 000
Administratīvās izmaksas	5% no darbaspēka un uzturēšanas izmaksām	10 800
Transports	Degvielas izmaksas: 15 600 EUR Apkope un remonts: 3 000 EUR Apdrošināšana: 12 000 EUR Citas izmaksas: 1 000 EUR (sk. detalizētāku aprēķinu zemāk tabulā Nr.5)	31 600
Kopā OPEX		808 400

Lai gan visas pārējās izmaksu pozīcijas ir tādas pašas kā 1. scenārijā, transportēšanas izmaksas ievērojami palielina kopējo izdevumu apjomu. Lai aprēķinātu biometāna nogādāšanas izmaksas uz centralizēto ievades punktu dabasgāzes sistēmā, kas atrodas 10 km attālumā no ražotnes, jāņem vērā vairāki faktori, kas detalizētāk raksturoti 2.12. tabulā. Salīdzināmības nodrošināšanai šie paši pieņēmumi tiks piemēroti arī 3. scenārija analīzē.

2.12. tabula

Degvielas izmaksu aprēķins

Degvielas patēriņš un izmaksas	Braucienų biežums	Citas transporta izmaksas
---------------------------------------	--------------------------	----------------------------------

<ul style="list-style-type: none"> • Vidējais kravas automašīnas degvielas patēriņš ~ 26 l/100 km[177] • Pieņemtā dīzeļdegvielas cena 1,50 EUR/l • Veiktais attālums: 10 km uz ievades punktu un 10 km atpakaļ jeb 20 km vienā braucienā <p>Degvielas izmaksas vienam braucienam: (26 l/100 km) x 20 km x 1,50 EUR/l = 7,80 EUR</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Biometāna ražošanas apjoms tiek lēsts 20 000 MWh/gadā • Biometāna enerģētiskā vērtība[178]: 10 kWh/m³ • Saražotais biometāna apjoms: 20 000 000 kWh / 10 kWh/m³ = 2 000 000 m³/gadā • Tiek pieņemts, ka kravas automašīna var pārvadāt 1 000 m³ biometāna vienā braucienā <p>Nepieciešamo braucienu skaits: 2 000 000 m³ / 1 000 m³/brauciens = 2 000 braucieni/gadā</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Apkope un remonts: auto uzturēšanas izmaksas, ieskaitot apkopi un remontu, tika pieņemtas 250 EUR/ mēnesī. • Apdrošināšana: OCTA polise 12 mēnešiem kravas automašīnai izmaksātu ap 12 000 EUR • Citas izmaksas: Piemēram, riepu nomaīņa, nodokļi u.t.t. Aprēķiniem tika pieņemti 1 000 EUR/gadā
<p>Gada degvielas izmaksas</p>	<p>Citas izmaksas gadā</p>	
<p>7,80 EUR x 2 000 braucieni/gadā = 15 600 EUR</p>	<p>250 EUR/mēnesī x 12 mēneši = 3 000 EUR + 12 000 EUR + 1 000 EUR = 16 000 EUR</p>	

Šie aprēķini ir orientējoši, un faktiskās izmaksas var mainīties atkarībā no transportlīdzekļu tehniskajām īpašībām, degvielas cenām, ceļu un braukšanas apstākļiem, kā arī citiem ietekmējošiem faktoriem. Jāatzīmē, ka alternatīvs risinājums varētu būt kravas automašīna pielāgošana biometāna izmantošanai kā degvielai, kas ļautu samazināt degvielas izmaksas un CO₂ emisijas. Tomēr šāds risinājums pieprasītu papildu sākotnējās investīcijas transportlīdzekļa pārbūvē. Lai nodrošinātu aprēķinu vienkāršību un scenāriju savstarpējo salīdzināmību, šajā modelī pieņemts, ka transportlīdzekļi visos scenārijos darbojas ar dīzeļdegvielu.

Lai nodrošinātu konsekventu salīdzinājumu starp visiem trim scenārijiem, trešā scenārija (biometāna tiešas piegādes gala patērētājiem) aprēķinos tika izmantots tāds pats pārvadāšanas attālums (10 km), kā arī vienādas degvielas patēriņa un degvielas cenu līmenis. Atšķirībā no otrā scenārija šeit nav nepieciešams izbūvēt centralizētu biometāna ievades infrastruktūru dabasgāzes sistēmā, kas ievērojami samazina sākotnējo investīciju apjomu. Tādējādi galvenais uzsvars tiek likts uz efektīvas piegādes loģistikas nodrošināšanu – tiešu biometāna transportēšanu uz degvielas uzpildes stacijām, industriālajiem patērētājiem vai citiem gala lietotājiem. Tas nozīmē, ka ražotājam nepieciešams ieguldīt atbilstošā uzglabāšanas un transportēšanas aprīkojumā, kā arī specializētos transportlīdzekļos, lai garantētu drošu, nepārtrauktu un tehniskajām prasībām atbilstošu biometāna piegādi tieši gala lietotājiem (skat. 2.13. tabulu).

Eksploatācijas izmaksas 3. scenārijam

Komponente	Aprēķina metode	Izmaksas (EUR/gadā)
Izejvielas	20 EUR/MWh x 20 000 MWh/gadā	400 000
Enerģija	0.12 EUR/kWh x 1 250 000 kWh	150 000
Darbaspēks	2 darbinieki x 12 000 EUR/gadā	24 000
Uzturēšana	3% no CAPEX (5 200 000)	156 000
Administratīvās izmaksas	5% no darbaspēka un uzturēšanas izmaksām	9 000
Transports	<ul style="list-style-type: none"> • Brauciena attālums: 10 km uz gala patēriņa vietu un 10 km atpakaļ, kopā 20 km vienā braucienā • Degvielas patēriņš (26 l/ 100 km) x 20 km = 5,2 l/braucienā • Degvielas izmaksas: 5,2 l x 1,50 EUR/l = 7,80 EUR/braucienā • Braucienu skaits gadā: tiek pieņemts, ka nepieciešami 365 braucieni/gadā jeb katru dienu • Degvielas izmaksas gadā: 7,80 EUR x 365 = 2 847 EUR • Apkopas un citas izmaksas: 16 000 EUR/gadā • Kopējās transporta izmaksas gadā: 2 847 + 16 000 = 18 847 EUR 	18 847
Kopā OPEX		757 847

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. Šādi modeļi apraksta lēmumu mainīgos lielumus (piemēram, tehnoloģiju jaudu, darbības ātrumu, enerģijas vai materiālu plūsmas), objektīvo funkciju (piemēram, kopējās izmaksas, peļņu, emisijas) un iespējamo reģionu, ko nosaka vienlīdzības un nevienlīdzības ierobežojumi, un tos risina ar matemātiskām programmēšanas metodēm, piemēram, lineāru, nelineāru vai jauktu veselu skaitļu optimizāciju. [179], [180]

Optimizācijas modeļi ir galvenais darbību izpētes instruments, un tos plaši izmanto ikreiz, kad sistēmas sarežģītība un alternatīvu skaits padara intuitīvu lēmumu pieņemšanu neuzticamu vai neefektīvu.[181] Enerģētikas nozarē optimizācijas modeļi tiek izmantoti, lai energosistēmas projektētu un ekspluatētu rentablā un uzticamā veidā, vienlaikus ievērojot tehniskos ierobežojumus un politikas mērķus. Energosistēmas optimizācijas modeļi parasti atspoguļo veselās piegādes ķēdes vai daudzu enerģijas avotu tīklus, un tos izmanto, lai izpētītu tehnoloģiju portfeļus, dispečerizācijas stratēģijas un investīcijas infrastruktūrā, kas atbilst ilgtermiņa dekarbonizācijas virzieniem [182], [183], [184]. Atkarībā no problēmas formulējuma tie var būt viena mērķa (piemēram, sistēmas kopējo izmaksu samazināšana) vai vairāku mērķu sasniegšana, vienlaicīgi ņemot vērā izmaksas, siltumnīcefekta gāzu

emisijas, piegādes drošību, citus kritērijus un radot optimālus kompromisus starp tiem. [185] - [187]

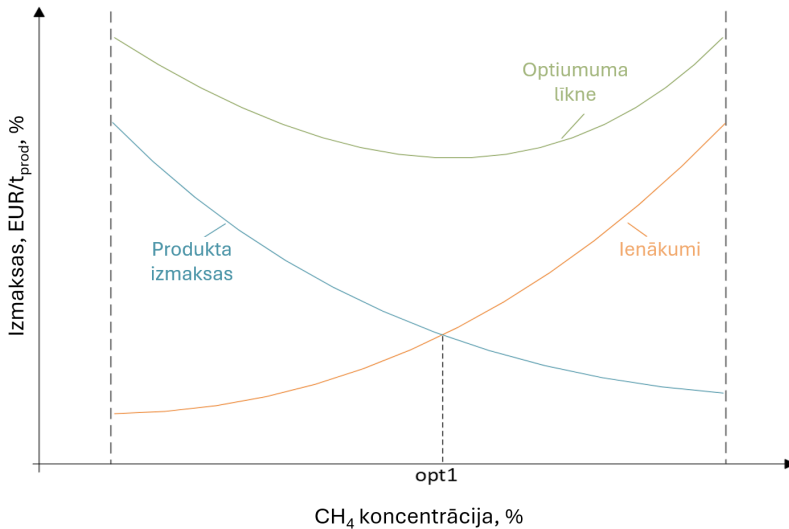
Jaunākie pētījumi liecina, ka šādi modeļi ir īpaši piemēroti, lai novērtētu mazoglekļa pārejas stratēģijas, kurās laika gaitā konsekventi jāapsver daudzas mijiedarbīgas tehnoloģijas un politikas instrumenti. [188], [189]

Attiecībā uz atjaunīgo gāzi un biometānu arvien biežāk tiek izmantoti tehnoekonomikas optimizācijas modeļi, lai noteiktu izmaksu ziņā optimālas iekārtu konfigurācijas, ekspluatācijas apstākļus un piegādes ķēdes struktūras tirgus un politikas ierobežojumu apstākļos. Kā piemērus var minēt biogāzes pārvēršanas biometāna modernizācijas maršrutu un darbības parametru optimizāciju, integrētu biometāna un ūdeņraža piegādes ķēžu optimizāciju un daudzobjektīvu elektroenerģijas pārvēršanas gāzē vai biogāzes modernizācijas iekārtu izstrādi, kas līdzsvaro investīciju izmaksas, darbības izmaksas un emisiju samazinājumu. [197] - [201]

Šajos lietojumos optimizācijas modeļi nodrošina sistemātisku sistēmu, lai kvantitatīvi noteiktu kompromisus starp izejvielu izvēli, procesu efektivitāti, produktu kvalitāti (piemēram, CH₄ koncentrāciju) un ieņēmumiem no enerģijas un oglekļa tirgiem, tādējādi atbalstot uz pierādījumiem balstītus lēmumus par biometāna ražošanas paņēmieni ekonomisko dzīvotspēju.

Šajā gadījuma izpētē tika izstrādāts optimizācijas modelis, lai identificētu ekonomiski optimālo metāna koncentrācijas līmeni biometāna ražošanā, kur ražošanas izmaksas un ieņēmumi ir līdzsvaroti. Konceptuālā pieeja ir parādīta 2.10. un 2.11. attēlā.

Modelis ir balstīts uz pieņēmumu, ka ražošanas izmaksu līkne palielinās eksponenciāli ar augstāku CH₄ koncentrāciju dārgāku izejvielu, augstāka enerģijas patēriņa un papildu attīrīšanas prasību dēļ. Un otrādi, ienākumu līkne atspoguļo biometāna potenciālo tirgus vērtību, kas pieaug ar augstāku metāna saturu, pateicoties paaugstinātai siltumspējai un tirgus cenai par enerģijas vienību. Šo divu līkņu krustošanās punkts nosaka optimālo CH₄ koncentrāciju (opt1), kur peļņas norma ir maksimāli palielināta.

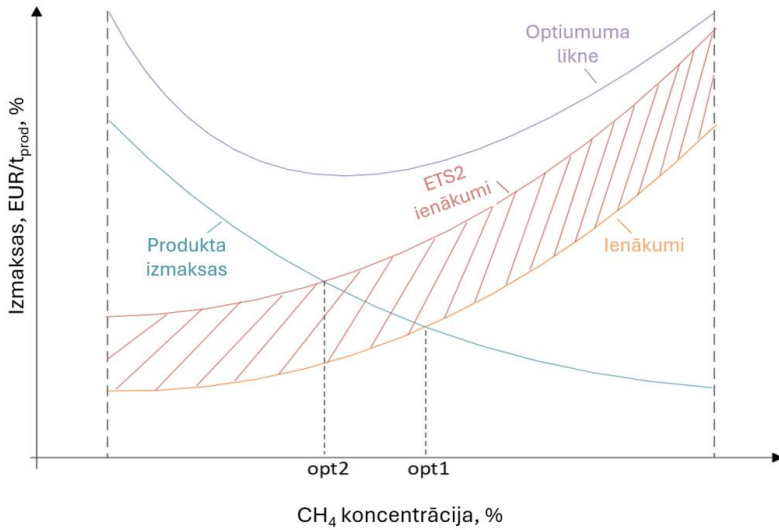


2.10. att. Konceptuālā saikne starp ražošanas izmaksām, ienākumiem un metāna koncentrāciju biometāna ražošanā (bāzes scenārijs).

Datu kopa ietver CH_4 koncentrāciju (%), izejvielu (tonnās) un saistītās ieņēmumu vērtības (EUR), kas iegūtas no biometāna pārdošanas. Attiecībā uz darbības izmaksām tiek pieņemts, ka ar izejvielām saistītās vienotas izmaksas ir 25 EUR/t, kas atspoguļo tipisko vidējo izejvielu iepirkuma un pārkraušanas izmaksu diapazonu visā nozarē.[190] Ieņēmumi ir balstīti uz aprēķināto saražotā un pārdotā biometāna apjomu, ņemot vērā CH_4 koncentrāciju un atbilstošo enerģijas saturu. Lai atvieglotu ieņēmumu un izmaksu tendenču salīdzinošo analīzi neatkarīgi no absolūtajām vērtībām, abi mainīgie lielumi ir normalizēti.

Optimizācijas pieejā autore pārbauda, kā biogāzes CH_4 koncentrācijas mainīšana (izmantojot izejvielu izvēli vai maisījumus) ietekmē izlīdzinātās ražošanas izmaksas un peļņu. Mēs uzskatām, ka reprezentatīvi scenāriji ir 50%, 55% un 59% CH_4 , lai aptvertu diapazonu no tipiskas kūtsmēsļu biogāzes (~50% CH_4) līdz enerģētiski bagātai atkritumu/līdzsubstrāta biogāzei (~60% CH_4)[195]. Katram scenārijam ir norādītas izejvielu izmaksas par tonnu un iegūtais enerģijas ieguvums (MWh/t), pamatojoties uz literatūras vērtībām par šīm izejvielām [195], [196], [197], [198]. No tiem tiek iegūtas ar izejvielām saistītās izmaksas uz MWh. Visbeidzot, lai novērtētu ekonomisko iespējamību, mēs salīdzinām ražošanas izmaksas ar dominējošajām biometāna tirgus cenām 2023.–2025. gadā, kas vidēji ir ap 54–91 EUR/MWh [199]. Pozitīva peļņas norma tiek sasniegta, ja ražošanas izmaksas ir zemākas par šo pārdošanas cenu.

Optimālā līkne apvieno abus efektus un norāda kopējo sistēmas veiktspēju dažādos CH_4 koncentrācijas līmeņos. Sekundārais optimizācijas scenārijs (2.11. att.) ietver oglekļa cenu noteikšanas ietekmi (emisijas kvotu tirdzniecības sistēmas jaunā pieeja, kas pazīstama kā *ETS 2*), kur atjaunīgo energoresursu gāzes ražotāji var gūt papildu ieņēmumus no izvairīšanās no CO_2 emisijām vai emisijas kvotu tirdzniecības. Tas pārvieto optimālo no opt1 uz opt2, nodrošinot rentablu ražošanu ar zemāku CH_4 koncentrāciju.



2.11. att. Oglekļa cenas noteikšanas (*ETS 2*) ietekme uz biometāna ražošanas ekonomisko optimumu.

Tādējādi tiek nodrošināta sistēma, kas novērtē kā izejvielu sastāva, procesu efektivitātes un politikas instrumentu izmaiņas ietekmē biometāna ražošanas ekonomisko ilgtspējību.[129]

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.

Datu bankas izstrāde un infrastruktūras kartēšana ir identificēta kā būtiski elementi visaptverošam un kvalitatīvam valsts biometāna attīstības pētījumam. Datu bankas izveide nodrošina vienotu datu banku ar strukturētu informāciju par sekojošajiem datiem.

Biometāna ražotāji (tos var sadalīt un grupēt pēc reģiona, pilsētas, valsts un potenciāli paplašināt, iekļaujot citas apkārtējās valstis). Šādas kartēšanas priekšrocības ietver uzlabotu politikas plānošanu, optimizētu regulatīvo uzraudzību un uzlabotas investīciju stratēģijas. Izmantojot centralizētu skatu uz biometāna ražotājiem, ieinteresētās personas var identificēt ražošanas tendences, novērtēt reģionālās jaudas un precīzi noteikt infrastruktūras attīstības jomas. Turklāt tas atvieglo pārrobežu sadarbību, atbalsta enerģētikas pārkārtošanas mērķus un ļauj precīzāk prognozēt piedāvājuma un pieprasījuma dinamiku. Datubāze var arī palīdzēt pētniekiem un izstrādātājiem apzināt inovācijas iespējas un veicināt pārredzamību un sadarbību starp nozares dalībniekiem.

Datu bankā būtu iekļauta arī detalizēta informācija par esošo dabasgāzes infrastruktūru, tostarp galvenajiem aktīviem, piemēram, pazemes gāzes krātuvi, kas ir jutīga infrastruktūra, ko var ietekmēt biometāna pieaugums energosistēmā. Šādu datu iekļaušana sniedz vairākas svarīgas priekšrocības, piemēram, ļauj skaidrāk izprast biometāna un pašreizējo gāzes sistēmu saderību, atbalsta stratēģisko plānošanu jaudas optimizācijai un palīdz identificēt iespējamās investīciju vajadzības. Turklāt tas ļauj precīzāk modelēt piegādes drošību un sezonālās pieprasījuma svārstības, kas ir būtiski stabilas un efektīvas enerģētikas pārkārtošanas nodrošināšanai.

Svarīga iezīme ir izmaksu aplēses dažādām biometāna ražošanas iekārtu pieslēguma iespējām, tostarp noteikumi par reversās plūsmas konfigurācijām. Piekļuve šāda veida finanšu un tehniskajiem datiem sniedz vairākas galvenās priekšrocības. Pirmkārt, tas ļauj reāllaikā atjaunināt optimizācijas modeļus, nodrošinot, ka plānošanas un lēmumu pieņemšanas procesi reaģē uz mainīgajiem tirgus un infrastruktūras apstākļiem. Turklāt tas atbalsta detalizētu gāzes sistēmas noturības un pielāgošanās spējas analīzi, jo īpaši piedāvājuma vai pieprasījuma svārstību scenārijos. Izmaksu datu pieejamība palīdz ieinteresētajām personām salīdzināt dažādu pieslēguma stratēģiju iespējamību, efektīvāk virzot gan privātās, gan publiskās investīcijas. Tas arī veicina pārredzamību un apzinātus lēmumus biometāna ražotājiem un gāzes infrastruktūras operatoriem un pat finansētājiem. Turklāt izmaksu tendenču izsekošana laika gaitā var sniegt informāciju politikas izstrādē

un subsīdiju izstrādē, atvieglojot finansiālā atbalsta mehānismu saskaņošanu ar faktiskajām infrastruktūras vajadzībām un tirgus dinamiku.

Publiski pieejama biometāna datu banka, kas tiek mitināta atvērto datu platformās, piemēram, *Zenodo*, varētu ievērojami uzlabot pārredzamību, sadarbību un inovācijas visā enerģētikas nozarē. Padarot strukturētus, augstas kvalitātes datus atklāti pieejamus, pētnieki, politikas veidotāji, investori un nozares ieinteresētās personas var pieņemt apzinātus lēmumus, pamatojoties uz kopīgotu, uzticamu informāciju. Publiskā piekļuve arī veicina akadēmiskos pētījumus, atbalsta uz pierādījumiem balstītu politikas veidošanu un veicina privātā sektora iesaistīšanos, samazinot informācijas asimetriju. Tas arī ļauj īstenot pārrobežu sadarbību un salīdzinošo novērtēšanu, kas ir īpaši vērtīga attīstošā nozarē kā atjaunīgo energoresursu enerģija. Turklāt atvērtie dati dod iespēju vietējām kopienām, nevalstiskajām organizācijām un vides grupām piedalīties enerģētikas pārkārtošanas dialogā, veicinot atbildību un sabiedrības iesaistīšanos ilgtspējīgas enerģijas iniciatīvām.

Sistēmdinamikas modelēšana piedāvā strukturētu pieeju, lai izprastu un pat veidotu biometāna nozares attīstību nacionālā līmenī, simulējot sarežģītās attiecības un mijiedarbību starp dažādiem sistēmas elementiem. Tā kā sistēmdinamika ņem vērā atkarības, atgriezenisko saiti un, kas ir svarīgi, sistēmas aizkavēšanos, tā ir metode, kas var prognozēt un efektīvi pārbaudīt dažādus nozares attīstības scenārijus un ietekmējošos faktorus. Modelējot galvenos mainīgos lielumus, piemēram, biometāna ražošanas apjomus, infrastruktūras paplašināšanu, politikas ietekmi, tirgus pieprasījumu, investīciju plūsmas un ieguvumus videi, sistēmdinamika var sniegt plaši piemērojamu priekšstatu par nozares attīstību laika gaitā.

Šāda simulācija var atklāt vērtīgas atziņas. Infrastruktūras vai politikas vājās vietas, kas palēnina biometāna izmantošanu, mijiedarbību un potenciāli meklēt optimālu konfigurāciju starp īstermiņa ieguldījumiem un ilgtermiņa ilgtspējas mērķiem.

Ieguvumi ietver, piemēram, biometāna plašāku izmantošanu, kas var samazināt atkarību no dabasgāzes, ietekmēt cenas vai mainīt emisiju trajektorijas, sniedzot ieguvumus NEKP 2030. gadam noteikto siltumnīcefekta gāzu emisiju samazināšanas un atjaunīgo energoresursu īpatsvara mērķu sasniegšanā.

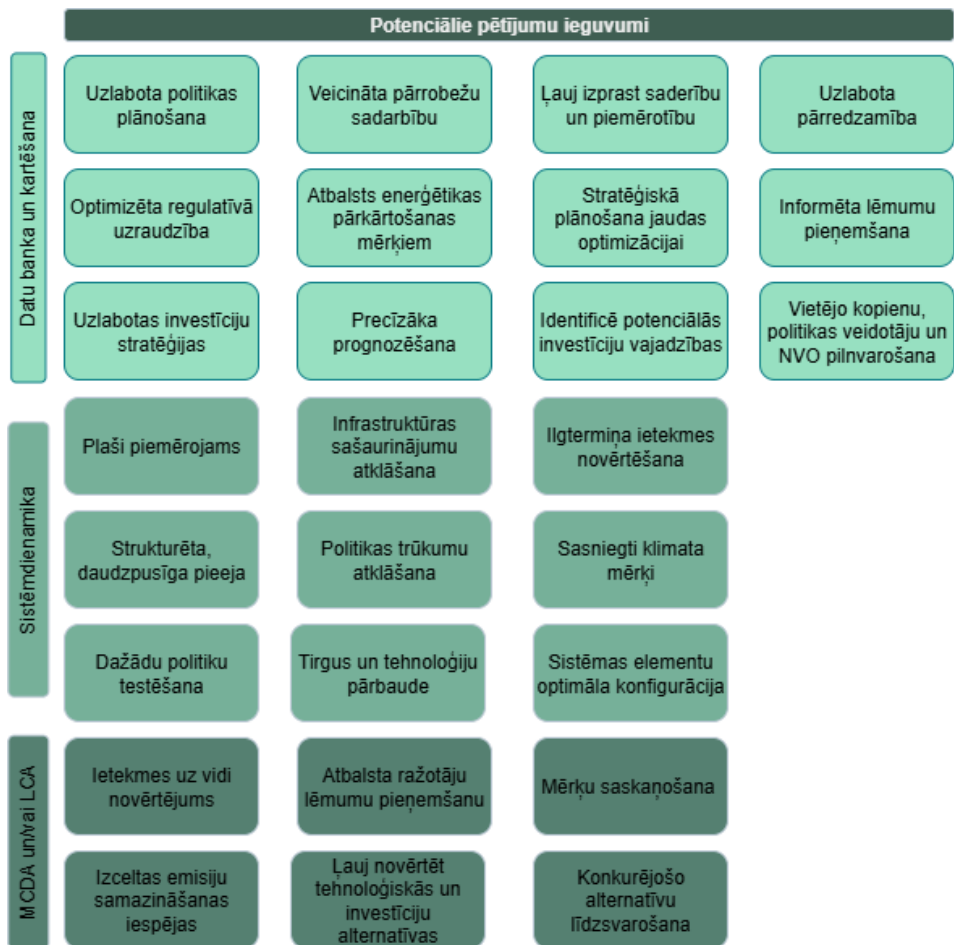
Modelēšana pārbauda dažādas politikas, tirgus vai tehnoloģiskos ceļus, pamatojoties uz nepieciešamajiem scenārijiem, kas ietver subsīdijas, oglekļa cenas vai tehnoloģisko izmaksu samazināšanu. Laika grafiki, kas parāda, cik ilgs laiks nepieciešams, lai ieguldījumiem vai noteikumiem būtu izmērāma finansiālā ietekme, un tas ir pozitīvs vai negatīvs.

Kopumā sistēmdinamikas modelis ļauj ieinteresētajām pusēm pārbaudīt stratēģijas un izstrādāt elastīgāku politiku, lai palielinātu biometāna ražošanu, kas atbilst enerģētikas un klimata mērķiem. Savukārt, dzīves cikla analīzes izmantošana biometāna attīstības kontekstā sniedz un var sniegt atziņas, kas uzlabo gan zinātnisko izpratni, gan praktisku lēmumu pieņemšanu, piemēram, visaptverošu novērtējumu par biometāna ražošanas ietekmi uz vidi visā tās dzīves ciklā - no izejvielu ieguves un pārstrādes līdz ievadīšanai gāzes sistēmā un galalietojumam. Šī analīze atklāj galvenos posmus ar vislielāko siltumnīcefekta gāzu emisiju un resursu patēriņu, uzsverot iespējas samazināt ietekmi uz

vidi, uzlabojot procesu efektivitāti, izejvielu un tehnoloģiju izvēli. Kvantitatīvi nosakot gan tiešās, gan netiešās emisijas, *LCA* piedāvā pārlicinošus datus, lai palīdzētu izvēlēties ilgtspējīgākas ražošanas metodes un salīdzināt alternatīvo tehnoloģiju ekoloģiskos raksturlielumus. *LCA* un *MCDA* ir spēcīgi instrumenti pārejas posmā no rūpnieciskās pētniecības uz eksperimentālo attīstību. To integrēta izmantošana var nodrošināt vides un stratēģisko interešu objektīvu saskaņošanu, kas savukārt palīdz optimizēt potenciālās sistēmas pirms to attīstības lielā mērogā.

MCDA piedāvā plašāku un elastīgāku sistēmu lēmumu pieņēmējiem, kas pārsniedz tikai vides aspektus salīdzinot ar *LCA*. Viena no *MCDA* galvenajām stiprajām pusēm ir spēja iekļaut plašu kvalitatīvu un kvantitatīvu faktoru klāstu, kas ietver vides aspektus, kā arī ekonomisko un tehnisko novērtējumu. Tas padara *MCDA* īpaši vērtīgu reālos apstākļos, kur lēmumu pieņēmējiem ir jālīdzsvaro konkurējošās prioritātes un jādarbojas nenoteiktībā. Atšķirībā no *LCA*, kas galvenokārt koncentrējas uz vides rezultātiem, *MCDA* atvieglo plašāku alternatīvu salīdzinājumu un atbalsta skaidru lēmumu pieņemšanu. Biometāna attīstības kontekstā tas ļauj ieinteresētajām personām identificēt risinājumus, kas ir gan videi draudzīgi, gan arī ekonomiski pamatoti, padarot *MCDA* par noderīgu instrumentu ilgtspējīgu inovāciju un investīciju stratēģiju virzīšanai.

Visi iespējamie integrēto pētījumu ieguvumi ir parādīti 3.1.attēlā.



3.1. att. Pētījumā identificētie integrētie pētījumu ieguvumi.

Veiksmīgam, integrētam pētījumam nepieciešama gan kvalitatīva teorētiskā bāze, gan arī eksperimentāla attīstība un praktiskā pētījuma piemērojamība reālajā dzīvē. 3.1. attēlā apkopoti potenciālie pētījuma ieguvumi, ko var sasniegt, izmantojot noteiktas metodes. Vertikālās šūnas norāda metodes, kuras var izmantot atsevišķi vai kombinēt integrētai problēmu risināšanai. Augšējā horizontālā blokā redzams nosaukums, bet zem tā ir norādīti katras metodes ieguvumi, kas atšķirti ar krāsu.

Piemēram, izveidojot datu banku un veicot kartēšanu, var uzlabot politikas plānošanu, optimizēt regulatīvo uzraudzību, uzlabot investīciju stratēģijas, veicināt pārrobežu sadarbību utt. Ir identificēti 12 ieguvumi, izmantojot datu banku un kartēšanu kā integrētas analīzes metodi, sistēmas dinamika var nodrošināt vismaz deviņus ietekmīgus ieguvumus, jo tā ir plaši piemērojama un var pārbaudīt dažādus scenārijus, dažādas politikas utt. *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.

iepriekš minētajiem atslēgvārdiem papildus dominēja uzsvars uz emisiju jautājumiem un ekonomisko analīzi un izmaksu efektivitātes analīzi, tādējādi uzsverot ekonomiskā pamatojuma nozīmību runājot par biometāna ievadīšanu dabasgāzes sistēmā.

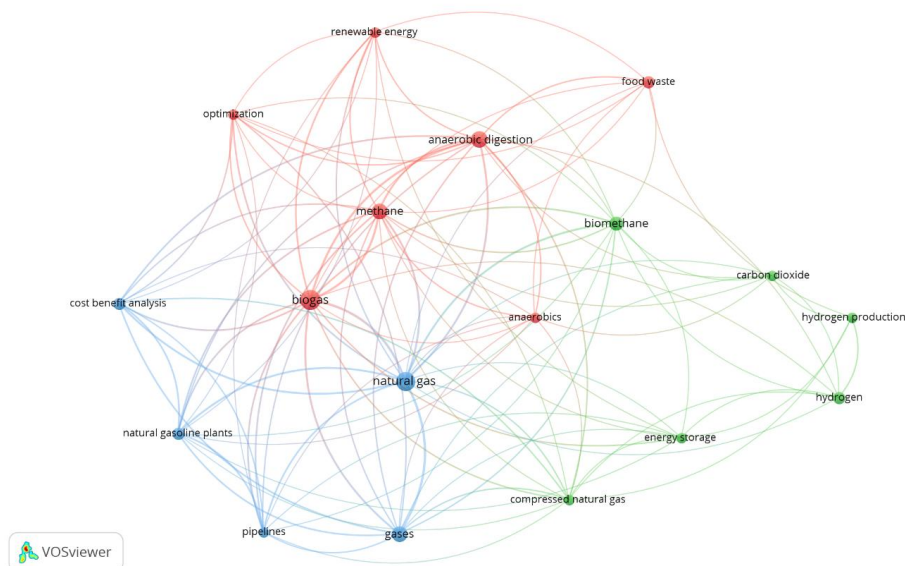
Secināms, ka pētījumu fokuss ir ļoti starpdisciplinārs – inženierzinātnes, vide un ekonomika ir līdzvērtīgi sasaistīti. Karte skaidri veido vairākus tematiski nošķiramus klasterus – tehnoloģijas (metāns, dabasgāze, cauruļvadi), vides ietekmes (emisijas, CO₂, GHG), enerģijas pāreja (atjaunīgā enerģija, dekarbonizācija, ūdeņradis) un biogāzes ražošana/anaerobās fermentācijas procesi. Tas apstiprina pieņēmumu, ka biometāna integrēšana gāzes infrastruktūrā nav analizējama izolēti.

Kartē redzama ļoti bieža līdzās pastāvēšana jēdzieniem ūdeņraža ražošana/ ūdeņraža uzglabāšana un biometāns/atjaunīgā enerģija. Tas liecina par pieaugošu literatūras tendenci analizēt gāzes sistēmu kā kopīgu infrastruktūras balstu vairākiem gāzveida enerģijas nesējiem un veicina diskusiju par daudzprofilu gāzes tīkliem (*multi-gas grids*).

No kartes secināms, ka anaerobā fermentācija, biogāze, ilgtspēja un metāns ir cieši sasaistīti ar tādiem atslēgvārdiem kā ekonomiskā analīze, izmaksu efektivitāte un ienesīgums. Tas parāda, ka ekonomiskais pamatojums literatūrā nav perifēra tēma, bet centrālais faktors, kas nosaka, vai biometāna ievades infrastruktūras izveide ir uzskatāma par pamatotu. Kartē to labi ilustrē zilā-zaļā klastera pārklāšanās ar sarkanajiem aerobās fermentācijas klasteriem.

Siltumnīcefekta gāzes, oglekļa dioksīds, oglekļa pēda, klimata pārmaiņas un globālās sasilšanas potenciāls – šo terminu blīvums kartē atspoguļo to, ka pētniecība primāri vadās no definētajiem sasniedzamajiem klimata mērķiem un regulējuma vajadzībām. Savukārt notekūdeņu attīrīšana, pašvaldību sadzīves atkritumi un atkritumu apsaimniekošana ir jēdzieni, kas parādās kā atsevišķs klasteris aerobās fermentācijas sadaļā. Tas apstiprina, ka zinātniskā literatūra attiecībā uz biometāna ievadi dabasgāzes sistēmā bieži tiek skatīta kontekstā ar lauksaimniecības sektoru, kā arī ar atkritumu un notekūdeņu resursu apsaimniekošanas sektoru. Savukārt tas parāda, ka biometāna ievades punktu plānošanā ir jāņem vērā pašvaldību resursi.

Vienlaikus secināms, ka dabasgāzes sistēmas aspekti zinātniskajā literatūrā ir salīdzinoši mazāk pētīti nekā klimata un aerobās fermentācijas tehnoloģijas. Salīdzinot atslēgvārdu biežumu un atslēgvārdu apļus izmērus, tādi atslēgt vārdi kā “cauruļvadi”, “pārvades tīkls”, “tīkla integrācija” ir mazāki un tālāk viens no otra nekā biogāzes, aerobās fermentācijas vai emisiju klasteri. Tas liecina, ka biometāna infrastruktūra ir temats attiecībā uz kuru ir būtisks pētniecības vakuums, ko autore cenšas novērst promocijas darba ietvaros.



3.3. att. Bibliometriskās tīkla analīzes otrais meklējums.

Otrā bibliometriskā analīzē tika veidota ar nolūku izprast publikāciju izvirci jautājumos par biometānu, kas tiek ievadīts sistēmā biometāna ievades punktos. Tā kā angļiski šos ievades punktus tulko dažādi, tad arī veicot publikāciju atlasī, tika izmantoti visi potenciālie tulkojumi kā meklējumu alternatīvas. Neraugoties uz to, pieejamo publikāciju loks būtiski sašaurinājās.

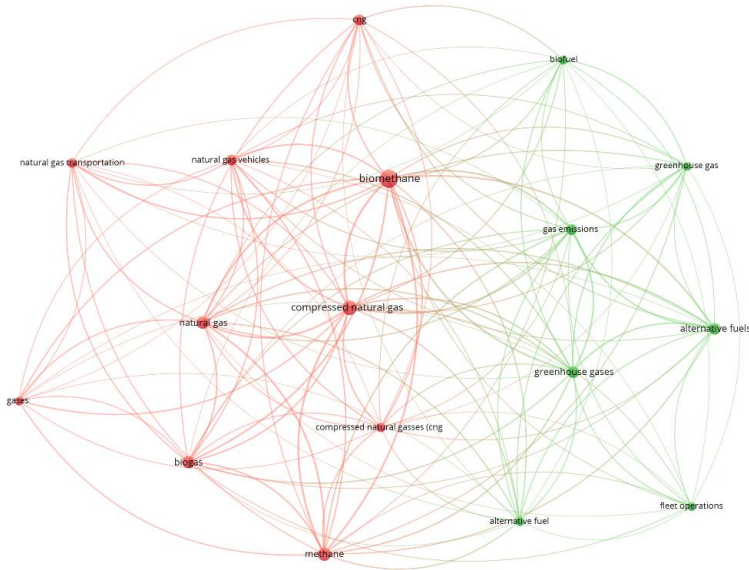
Atšķirībā no plašās pirmās analīzes ar vairāk nekā 120 atslēgvārdiem, 3.3. attēlā redzams ļoti kompakts mezglu tīkls, kur dominē tikai daži tematiski klasteri (biogāze, aerobā fermentācija, dabasgāze, infrastruktūra, oglekļa emisijas, ūdeņradis). Tas norāda, ka biometāna ievades punktu jautājumi nav atsevišķs, bieži pētīts temats, bet gan parādās kā sekundārs aspekts publikācijās par biogāzi, dabasgāzi vai atjaunīgajiem gāzveida resursiem.

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.

Lielākais un koncentrētākais ir sarkanais klasteris (biogāze, anaerobā fermentācija, pārtikas atkritumi, atjaunīgā enerģija). Tas nozīmē, ka pat tad, ja meklējumus fokusē uz ievades punktiem, zinātniskās literatūras izpētes centrā paliek ražošanas process, substrāti un metāna saturs, nevis infrastruktūra.

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



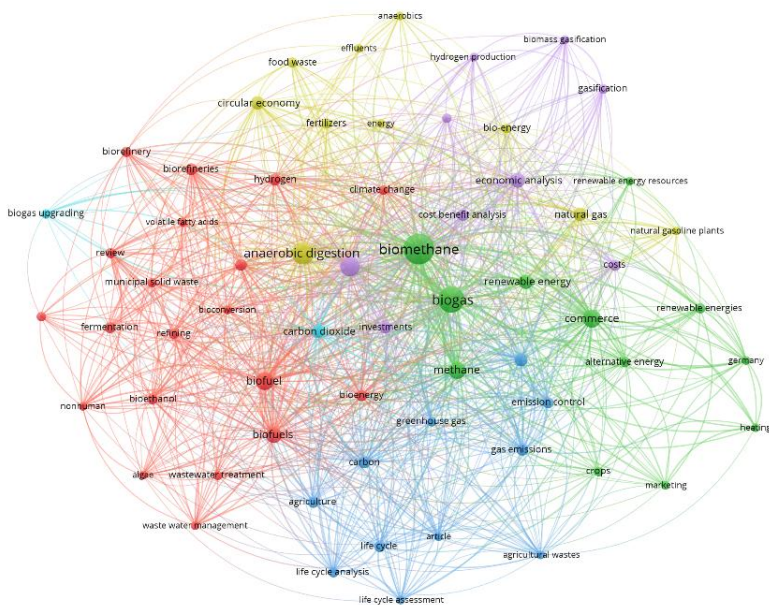
3.4. att. Bibliometriskās tīkla analīzes trešais meklējums.

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. Savukārt ražošanas un anaerobās fermentācijas jautājumi šajā kontekstā parādās minimāli.

Kā redzams 3.4. attēlā, zaļais klasteris ilustrē, ka zinātniskajā literatūrā biometāns transporta sektorā tiek galvenokārt analizēts kā emisiju samazināšanas instruments, īpaši salīdzinājumā ar fosilo saspiesto dabasgāzi un dīzeļdegvielu. Savukārt sarkanais klasteris norāda, ka biometāns transportā visbiežāk tiek skatīts kā tehnoloģiski un infrastruktūras ziņā aizvietojams ar fosilo saspiesto dabasgāzi, izmantojot esošās autoparka tehnoloģijas un infrastruktūru. Tas parāda, ka pētniecībā galvenais uzsvars ir uz praktisku aizvietošanu un emisiju samazināšanas ieguvumiem, nevis uz plašāku sistēmisku analīzi.

Kartē 3.4. attēlā biometāns atrodas centrā savienojot abus iepriekš minētos klasterus, kas apstiprina, ka biometāna izmantošana transportā tiek uztverta kā tilts starp esošajām dabasgāzes tehnoloģijām un klimata mērķiem, radot iespēju būtiski samazināt emisijas bez nepieciešamības veidot jaunu infrastruktūru.

Tādi atslēgvārdi kā dabasgāzes transportēšana, gāze, saspiebtā dabasgāze parādās kartē, tomēr netiek sasaistīti ar terminiem, kas atsauktos uz biometāna ievades punktiem vai cauruļvadiem. Tas nozīmē, ka transporta kontekstā biometāns tiek skatīts galvenokārt kā degviela, nevis kā biometāna integrācijas sistēmā problēmas risinājums.



3.5. att. Bibliometriskās tīkla analīzes ceturtais meklējums.

Ja pirmās trīs bibliometriskās analīzes meklējumi tika orientēti uz dažādajiem biometāna transportēšanas risinājumiem (ar cauruļvadu vai autotransporta starpniecību), tad ceturtais bibliometriskās analīzes ietvaros tika vērtētas zinātniskās izpētes tendences attiecībā uz biometāna tirdzniecību un ar to saistīto blakusproduktu tirgus izveidi. Iegūtā karte, kas atspoguļota 3.5. attēlā, ir būtiski blīvāka un daudzdimensionālāka par iepriekšējām, norādot uz to, ka biometāna tirgus aspekts zinātniskajā literatūrā tiek skatīts sistēmiski un starpdisciplināri.

Karte parāda vismaz piecus lielus klasterus:

- 1) Sarkanais klasteris, kur dominē blakusprodukti, atkritumi, fermentācija, bioloģiskie resursi. Tas ilustrē, ka literatūrā biometāna tirgus tiek cieši saistīts ar aprites ekonomikas koncepcijām;
- 2) Zaļais klasteris, kur fokuss ir tirgus, tirdzniecība, ekonomika un arī atjaunīgie resursi. Tas norāda, ka zinātniskajā literatūrā tiek aktīvi analizētas biometāna tirdzniecības barjeras, cenu konkurētspēja ar dabasgāzi un tirgus attīstības modeļi;
- 3) Zilais klasteris koncentrējas uz dzīves cikla analīzi, ietekmi uz vidi un oglekļa emisiju modelēšanu. Šis klasteris kopumā uzsver emisiju ietaupījumus kā pamatotu tirgus stimulēšanas instrumentu;
- 4) Dzeltenais klasteris ir bioloģisko resursu un aprites ekonomikas klasteris, un tā centrālā tēma anaerobās fermentācija no aprites ekonomikas perspektīvas;
- 5) Violetais klasteris, kurš koncentrējas uz investīcijām un izmaksu efektivitāti augstas pievienotās vērtības alternatīvajām tehnoloģijām.

Kartē izdalāmi trīs funkcionālie klasteri. Zilajā klasterī skābeklis tiek aplūkots nevis kā infrastruktūras problēma, bet procesa blakusprodukts. Sarkanajā klasterī skābeklis fokusējas uz skābekļa radītajiem riskiem. Šis klasteris ir ļoti blīvs, kas norāda, ka skābeklis tiek uztverts kā primārs tehniskais risks, ne tikai kvalitātes parametra novirze. Savukārt zaļais klasteris fokusējas uz to kā skābekļa radītie mikrobioloģiskie riski tieši ietekmē gāzes kvalitāti.

Skābekļa problēma zinātniskajā literatūrā lielākoties tiek raksturota atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas kontekstā. Karte norāda uz to, ka zinātniskajā literatūrā biežāk pētīts paaugstināts skābekļa saturs aerobās fermentācijas sistēmās. Tas liek secināt, ka skābekļa daudzums biometānā tiek daudz biežāk saistīts ar atkritumu/notekūdeņu saražoto biogāzi, nevis ar tradicionālo lauksaimniecības biogāzi.

Atšķirībā no pirmās un otrās bibliometriskās analīzes, kur zinātniskā literatūra ietver infrastruktūru, šajā kartē infrastruktūras tematu praktiski nav. Tas parāda, ka zinātniskajā literatūrā tiek pamatā uzskatīts, ka skābekļa saturs ir ražošanas procesa problēma. Infrastruktūras riski tiek minēti, bet tikai kā sekundāra ietekme, kad skābeklis jau ir nonācis biometānā. No kartes secināms, ka līdzšinējā pētniecība fokusējas uz cēloni (aerobās fermentācijas procesi, substrāti, mikrobioloģija) nevis sekām (ietekme uz cauruļvadiem).

Baloties uz bibliometriskās analīzes laikā gūtajiem rezultātiem, ir izstrādāts integrēts analītiskais ietvars (3.7. att. Biometāna sistēmas analīzes procesu shēma (autores veidots). 3.7. att.), tas ļauj vienlaikus analizēt biometāna tehnoloģisko attīstību, ekonomisko dzīvotspēju un vides ietekmi, balstoties uz identificētajiem izaicinājumiem no zinātniskās literatūras.



3.7. att. Biometāna sistēmas analīzes procesu shēma (autores veidots).

Bibliometriskās analīzes rezultātā tika identificētas galvenās tēmas, kuras tiek analizētas biometāna attīstības pētījumos, kā arī analizētas piemērotas metodes. Identificēti pieci galvenie biometāna attīstības analīzes virzieni, kas saistīti ar izejvielu pieejamību, ražošanas tehnoloģijām, integrāciju infrastruktūrā, energosistēmu mijiedarbību, kā arī ietekme uz vidi un klimatu. Papildus šiem tehniskajiem un sistēmiskajiem aspektiem būtiska loma biometāna attīstībā ir arī regulatīvajam ietvaram, kas nosaka tirgus attīstības iespējas un investīciju vidi. Bibliometriskā analīze parādīja, ka biometāna attīstības analīze literatūrā bieži tiek veikta fragmentāri, analizējot atsevišķus sistēmas elementus. Šī pētījuma ietvars ļauj šos aspektus aplūkot analītiski no daudzpusīgiem aspektiem, sniedzot iespējami plašu rezultātu bāzi.

3.3. Izpētošās gadījumu analīzes rezultāti

Biogāze parasti sastāv no aptuveni 60% metāna (CH_4) un 40% CO_2 , ar nelielām H_2 un citu gāzu pēdām. Izmantojot anaerobo fermentāciju (*AD*), lauksaimniecības atliekas, notekūdeņu dūņas un sadzīves atkritumi tiek pārvērsti atjaunīgā enerģijā. Biogāzes pārveidošana par biometānu ļauj to izmantot ievadei sistēmā un transportēšanai.

Aprites cikla analīze liecina, ka fosilās gāzes aizstāšana ar biogāzi koģenerācijas sistēmās var samazināt siltumnīcefekta gāzu emisijas par 70-90 % atkarībā no izejvielām. Turklāt bio- CO_2 , kas iegūts modernizētās iekārtās, veicina oglekļa neitralitātes mērķu sasniegšanu, potenciāli sasniedzot 89 Mt/gadā uztveršanu ES līdz 2040. gadam.

Dzīves cikla analīze liecina, ka, aizstājot fosilo gāzi ar biogāzi koģenerācijas sistēmās, SEG var samazināt par 70-90 % atkarībā no izmantotajām izejvielām. Emisiju samazinājuma līmenis atspoguļo atšķirības biogāzes izejvielu izcelsmē un ar tām saistītajos dzīves cikla posmos. Emisijas no biogāzes sistēmām galvenokārt rodas izejvielu ražošanā un transportēšanā, anaerobajā fermentācijā un gāzes attīrīšanā. Savukārt ar fosilo dabas gāzi saistītās emisijas galvenokārt rodas ieguves, apstrādes, transportēšanas un infrastruktūras noplūžu rezultātā. Lauksaimniecības atlikumi un atsevišķi savākti organiskie atkritumi nodrošina mazāku, bet joprojām būtisku emisiju samazinājumu. Savukārt enerģētiskās kultūras parasti sniedz mazāku ietaupījumu, jo emisijas rodas arī to audzēšanas procesā. Emisiju rādītāji ir lielā mērā atkarīgi no izmantotā izejvielu veida un sistēmas robežnosacījumiem, nevis tikai no degšanas efektivitātes [23].

Biogāzes koģenerācijas emisijas ir būtiski zemākas nekā fosilās dabasgāzes sistēmās, jo degšanas laikā izdalītais ogleklis nāk no neseniem biogēniem avotiem, nevis no ģeoloģiski uzkrāta oglekļa [200]. Līdz ar to CO_2 emisijas parasti tiek uzskatītas par oglekļa neitrālām, jo tās ir daļa no īstermiņa bioloģiskā oglekļa cikla un neveicina neto oglekļa uzkrāšanos atmosfērā [201].

Tādējādi galvenais siltumnīcefekta gāzu samazinājuma ieguvums rodas no metāna emisiju novēršanas, kas saistīta ar kūtmēsli un organisko atkritumu apsaimniekošanu, kā arī no fosilā kurināmā aizstāšanas siltuma un elektroenerģijas ražošanā. Šie mehānismi izskaidro emisiju samazinājumu biogāzes koģenerācijas sistēmās neatkarīgi no tā, vai biogāzes attīrīšanas procesā tiek izmantota oglekļa dioksīda uztveršana.

Centralizētā energotīklam jeb *DEN* (*District Energy Network*) ir sekojoši optimālie mainīgie lielumi:

1. siltumnesēja padeves temperatūra, plūsmas ātrums un kopējais enerģijas patēriņš un izmaksas [202];
2. Uzglabāšanas ietilpība [203], [204]

DEN optimizācijas algoritmi galvenokārt ietver hibrīda evolūcijas un jaukta vesela skaitļa lineārās programmēšanas (MILP) metodi [205], ģenētiskie algoritmi [203].

Atjaunīgo energoresursu integrēšana un atlikumsiltuma atgūšana centralizētās siltumapgādes tīkla sistēmās ir būtiska, lai samazinātu būvniecības nozares ietekmi uz vidi, atbalstītu ilgtspējas mērķus un samazinātu vides piesārņojumu. Piemēri ir hidroenerģijas

izmantošana [206], fotoelementu tehnoloģijas [207], [208], un koksa krāšņu siltuma atlikumi [207]. Šie risinājumi ir arī visizdevīgākie un energoefektīvākie ilgtermiņā.

Pamatojoties uz [209], galvenās problēmas ar *DEN*:

- ievērojamas sākotnējās investīcijas un augstas uzturēšanas izmaksas;
- nepieciešamība vietējām pašvaldībām sniegt finansiālu atbalstu, kā arī izstrādāt detalizētu plānu un projektēšanas stratēģiju pirms tīkla izbūves.

Pētniecības galvenais uzdevums ir vairāku energosistēmu un atjaunīgo energoresursu efektīva un vienmērīga integrācija *DEN* struktūrā. *DEN* tehnoloģijas galvenais izaicinājums ir tas, ka vieni un tie paši cauruļvadi nevar vienlaikus nodrošināt gan apkuri, gan dzesēšanu dažādām ēkām[210].

Wang et. al. [209] pētījumā izdarīti secinājumi, kas izskaidro *DH* un centralizēto energotīklu (*DEN*) darbības un optimizācijas iespējas (3.1. tabula).

3.1. tabula

Galvenie rezultāti un piemēri *DEN* izstrādē

Nr.	Secinājums	Galvenie aspekti un piemēri
1.	Labākie veikspējas rezultāti	Apvieno vairāku enerģijas avotu izmantošanu ar mūsdienīgām tehnoloģijām; Piemērs – sabalansēts energotīkls: urbumu sistēmas, aukstā ūdens sildīšanas tīkli, ūdens siltumsūkņi, viedās siltuma uzkrāšanas sistēmas, viedo tīklu tehnoloģijas (<i>DSR</i>); apkārtējā temperatūra zemāka par 4G DHN (50-60 °C)
2.	Matemātiskās modelēšanas nozīme	Siltuma bilance, masas plūsmas nepārtrauktība, spiediena zudumi, energosistēmu un hidraulisko modeļu analīze; ļauj novērtēt atsevišķu sistēmas elementu un visa tīkla veikspēju, identificēt optimizācijas iespējas
3.	Simulācijas vide	Aptuveni puse pētījumu izmanto <i>MATLAB/Simulink</i> , kas šobrīd ir populārākā izvēle modelēšanai
4.	Faktoru ietekme	Tika analizēti vairāk nekā 30 faktori; Ietekme uz tīkla veikspēju mainās atkarībā no sistēmas ierobežojumiem, atrašanās vietas, laika un mainīgo faktoru mijiedarbības
5.	Nākotnes attīstības virziens	Koncentrējas uz progresīviem optimizācijas algoritmiem un stratēģijām (“mīkstās tehnoloģijas”) apvienojumā ar mūsdienīgiem atjaunīgās enerģijas risinājumiem, viedu enerģijas uzglabāšanu un pānesi, kā arī energoefektīviem lietojumiem (“cietajām tehnoloģijām”)

Piektās paaudzes centralizētās siltumapgādes un aukstumapgādes (*5GDHC*) tīkli vēl ir salīdzinoši jaunā izstrādes stadijā, taču vairākas šādas sistēmas jau darbojas Eiropā, daudzas no tām sākotnēji tika uzsāktas kā izmēģinājuma projekti. Šīs sistēmas ievērojami atšķiras no tradicionālajām *DHC* tehnoloģijām. Piemēram, tie piegādā ūdeni decentralizētām ūdens siltumsūkņu stacijām temperatūrā no 0 °C līdz 30 °C, piedāvājot vairākas priekšrocības salīdzinājumā ar parastajām centralizētās siltumapgādes sistēmām.

Turklāt *5GDHC* ļauj tīkla temperatūrai brīvi svārstīties un izmanto gandrīz neizmējamus vietējos siltuma avotus. Sadales temperatūra, kas ir tuvu zemes temperatūrai, būtībā ir “neitrāla” no siltuma zudumu viedokļa, spēja darboties apkures vai dzesēšanas

režīmā neatkarīgi no tīkla temperatūras un divvirzienu, decentralizētas enerģijas plūsmas ir dažas no galvenajām 5GDHC priekšrocībām salīdzinājumā ar 4GDH. Šī tehnoloģija cieši saskan ar viedo siltumapgādes tīklu koncepciju, jo tajā tiek izmantotas hibrīda apakšstacijas un atvieglota elektroenerģijas un siltuma nozares sasaiste viedajā energosistēmā (*Lund et al.* [211]).

Līdztekus pieaugošajai elektrisko transportlīdzekļu ieviešanai transporta nozarē 5GDHC tehnoloģija varētu atbalstīt ilgtspējīgu un efektīvu pilsētas siltumapgādes nozares elektrifikāciju.

3.2. tabulā apkopotas iespējas un draudi, kas saistīti ar 5. paaudzes centralizētās siltumapgādes sistēmām un to ieviešanu esošajā infrastruktūrā.

3.2. tabula

5. paaudzes centralizētās siltumapgādes sistēmu SVID analīzes rezultāti

STIPRĀS PUSES	VĀJĀS PUSES
Iespēja atgūt zemas temperatūras siltuma pārpalikumu un iekļaut zemas entalpijas atjaunīgos energoresursus (AER).	Apakšstacijas ir dārgākas nekā iepriekšējās paaudzes centralizētā siltumapgāde (CAPEX).
Divvirzienu darbība: nodrošina gan apkuri, gan dzesēšanu visu gadu.	Nepieciešama individuāla karstā ūdens tvertne (karstā ūdens tvertne).
Modularitāte, elastība un noturība pret robežapstākļu izmaiņām (ēkas līmeņa efektivitāte, slodzes).	Nelielām temperatūras atšķirībām (ΔT) starp padeves un atgriešanās caurulēm nepieciešama lielāka diametra caurule un lielāka uzglabāšanas siltuma jauda.
Siltuma zudumi ir niecīgi, jo zemā temperatūras starpība starp caurulēm un zemi.	Augstas sūkņu ekspluatācijas izmaksas uz vienu enerģijas vienību, pateicoties zemam ekspluatācijas ΔT un augstākai šķidrums viskozitātei.
Caurules var būt neizolētas.	Elektroenerģijas izmaksas (un ar to saistītais primārās enerģijas patēriņš) siltumsūkņiem (HP).
Caurules var izgatavot no polimēru materiāliem (HDPE), kas samazina uzstādīšanas izmaksas.	Jauna pieeja cauruļu un sietu dizainam ir nepieciešama, pārejot no tradicionālā DH.
Zemi un tīklu var izmantot kā siltuma uzkrāšanu (urbums/ūdens nesējslānis TES).	Pašvaldības vai normatīvās prasības var uzlikt par pienākumu pieslēgt ēku tīklam.
Ļoti piemērots kombinācijai ar saules kolektoriem, koģenerāciju, dzesēšanas iekārtām un saules centralizēto siltumapgādi.	Ir nepieciešama pieredze izmēģinājuma projektiem, un trūkst vadlīniju projektēšanai un optimizācijai.
Atbalsta lokālos biznesa modeļus un trešo pušu tīkla piekļuvi.	Siltumsūkņu nozare saskaras ar HFC gāzes izbeigšanas regulējumu, kas ietekmē izmaksas un veiktspēju.

Samazina CO ₂ emisijas un palīdz dekarbonizēt siltumnozari.	Augstas kapitāla un ekspluatācijas izmaksas salīdzinājumā ar atsevišķām tradicionālajām sistēmām.
Atbalsta jaunu rajonu būvniecību un esošo ēku renovāciju ar zemas temperatūras emisiju sistēmām.	Klientu uztvere un iesaistīšanās ir kritiski svarīga <i>DHC</i> ieviešanai, kas var radīt sociālas problēmas.
IESPĒJAS	DRAUDI
Jauns biznesa modelis enerģijas tirgū.	Ir jāpārskata pieeja tradicionālās centralizētās siltumapgādes dizainam un lielumam.
Esošā augstas temperatūras tīkla pārveidošana par <i>5GDHC</i> ir teorētiski iespējama, bet tai ir rūpīgi jāpārbauda.	Siltumsūkņu koeficients (<i>COP</i>) (<i>HP</i>) var būt pārāk zems atkarībā no ēkas apkures sistēmas veida un tīkla padeves temperatūras.
Sadarbība ar sezonas uzglabāšanas sistēmām (mazāki zudumi, bet arī mazākas ΔT).	Augstākas izmaksas un zemāka veiktspēja nākotnes siltumsūkņiem, pateicoties pakāpeniskai F-gāzu noņemšanai.
Dekarbonizācijas mērķi var sasniegt komunālie pakalpojumi vai pašvaldības, attīstot šāda veida infrastruktūru.	Ja ir atkarība no sezonas uzglabāšanas, trūkst vietas.
Jauna enerģētikas koncepcija rajona līmenī ļauj panākt lielus primārās enerģijas ietaupījumus, veicot vienkāršu ēku renovāciju.	Uzstādīšana ir invazīva gan cauruļu, gan lietotāju apakšstaciju gadījumā.
Pastiprināta mijiedarbība ar elektroenerģijas nozari (<i>HP</i> potenciālā izmantošana pieprasījuma regulēšanai – pieprasījuma puses pārvaldība).	Savienojuma lēmumi tiek pieņemti vienas ēkas vai lietotāju grupas līmenī.

5GDHC priekšrocības salīdzinājumā ar gaisa siltumsūkņu sistēmām ir salīdzinoši daudzas [210], [212], [213]. Tās 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 siltumsūkņu uzstādīšana var būt ierobežota. Turklāt ēku slodžu daudzveidība un vienlaicīgums palielina iespēju atgūt lieko siltumu no dzesēšanas procesiem izmantošanai apkurē [210]. Tā kā *5GDHC* joprojām ir jauna un salīdzinoši maz izpētīta joma, zināšanas par šo tehnoloģiju joprojām ir koncentrētas nelielā skaitā uzņēmumu. Turklāt vietējo siltuma avotu izmantošana un decentralizētu “aktīvo” apakšstaciju ieviešana atbalsta pāreju no tradicionālajām monopolistiskajām *DHC* struktūrām un veicina jaunu biznesa modeļu attīstību daudzpakalpojumu uzņēmumiem. Dizaineriem pašlaik trūkst tehnisko standartu un vadlīniju, un nav pietiekamu zināšanu par *5GDHC* sistēmu darbības optimizāciju un pārvaldību [214].

Var novērot, ka *5GDHC* tīklu attīstība ir visattīstītākā Šveicē un Vācijā. Šveicē *5GDHC* paplašināšanos galvenokārt veicina tiesību akti un politikas pasākumi. 3.3. tabulā ir uzsvērti galvenie *5GDHC* attīstības virzītājspēki un sniegti piemēri tās ieviešanai Šveicē.

5GDHC attīstības virzītājspēki un ieviešanas piemēri Šveicē (izstrādājusi autore, izmantojot [210], [215])

Aspekts	Apraksts
Galvenais virzītājspēks	"2000 vatu sabiedrības" enerģētikas politikas koncepcija, ko izstrādāja Cīrihes Federālais tehnoloģiju institūts (<i>ETH Zürich</i>) un kuru 2008. gada referendumā atbalstīja 75% Cīrihes vēlētāju.
Mērķis	Samazināt aplēsto primārās enerģijas patēriņu uz vienu iedzīvotāju līdz vidējai jaudai 2 kW stundā (48 kWh dienā vai 17 520 kWh gadā), nezaudējot dzīves komfortu. Lai to panāktu, enerģijas patēriņš ir jāsamazina apmēram trīs reizes, līdz 1950. gadu līmenim
Politikas pasākumi	Referendumā 2017. gada maijā 58% iedzīvotāju nobalsoja par Federālo enerģētikas likumu, kas paredz pakāpenisku kodolenerģijas pārtraukšanu un pāreju uz energoefektivitāti un atjaunīgajiem energoresursiem.
5GDHC ieviešanas piemēri	<i>Richti Wallisellen</i> rajons un <i>ETH Hönggerberg</i> universitātes studentu pilsētiņa ir pirmie 5GDHC tīkli Šveicē, kas īsteno "2000 vatu sabiedrības" principus.
Tehniskie risinājumi	Urbumu siltumenerģijas sezonālā uzglabāšana (<i>TES</i>) un liekā siltuma atgūšana tās reģenerācijai.
Papildu faktori	Aktīva dzesēšana dzīvojamās ēkās ar dzesētājiem ir aizliegta ar likumu Šveicē, tāpēc 5GDHC sistēmām ir liels potenciāls nodrošināt brīvu dzesēšanu vai bezmaksas dzesēšanu.

Šveices piemērs parāda, kā politika un sabiedrības iesaiste var paātrināt 5GDHC sistēmu ieviešanu. Lai padziļināti izpētītu praktiskos rezultātus, nākamajā sadaļā aplūkots *Meppel* gadījums un novērotie ekonomiskās optimizācijas rezultāti.

Ekonomiskās optimizācijas rezultāti (*Meppel* gadījums)

Optimizācija un scenāriju analīze, pamatojoties uz *Meppel* centralizētās siltumapgādes sistēmu [135] salīdzināja četrus jēdzienus: 1. scenārijs - biogāzes koģenerācijas sistēma ar dabasgāzes rezerves katliem, 2. scenārijs - centralizētā siltumapgāde, izmantojot tikai gāzes katlus, 3. scenārijs - individuāli gāzes katli katrā mājā un 4. scenārijs - jumta saules fotoelementu sistēma ar gāzes rezerves apkuri. No šiem risinājumiem visilgtspējīgākais izrādījās 1. scenārijs, kurā koģenerācijā tiek izmantota biogāze, apvienojot vietējo atjaunīgo energoresursu izmantošanu un koģenerācijas procesa efektivitāti. Tam bija nepieciešami tikai aptuveni 1,65 TJ dabasgāzes un 6,18 TJ biogāzes gadā, izmešos aptuveni 86 t CO₂ gadā, kas ir par 80% mazāk nekā tradicionālā individuālā apkure. Turpretī sistēma, kurā tika izmantoti tikai katli (2. scenārijs), darbojās vissliktāk, patērējot gandrīz 9,8 TJ dabasgāzes un emitējot vairāk nekā 500 t CO₂ gadā. 3. scenārijs (individuālie gāzes katli) emitēja aptuveni 430 t CO₂ gadā, savukārt 4. scenārijs (saules fotoelementu un gāze) panāca emisiju samazinājumu par 50 %, kompensējot tīkla elektroenerģiju ar saules enerģiju uz vietas.

Modelis arī atklāja, ka kopējais siltuma pieprasījums rajonā bija aptuveni 4 - 5 TJ gadā, bet atsevišķām māsaimniecībām bija nepieciešami 12 - 20 GJ gadā, atkarībā no ēkas veida. Dzesēšanas vajadzības bija ievērojami zemākas (aptuveni 5 - 10 GJ gadā uz vienu māju), un tās daļēji sedza ūdens slāņa uzglabāšanas sistēma. Izmantojot matemātiskās attiecības starp koģenerācijas stacijas elektrisko un siltuma jaudu un siltumsūkņa veiktspējas koeficientu (*COP* apmēram 3,5 - 4), pētījumā aprēķināts, ka uz katru MJ siltuma no siltumsūkņa ir nepieciešami tikai 0,25 - 0,3 MJ elektroenerģijas, uzlabojot kopējo energoefektivitāti. Koģenerācijas stacija sasniedza kopējo efektivitāti aptuveni 88% ar jaudas koeficientu aptuveni 1,45 MJ siltuma uz 1 MJ saražotās elektroenerģijas.

Vienkāršotais optimizācijas modelis efektīvi noteica optimālo sistēmas lielumu un darbības stratēģijas, ierosinot pakāpenisku ieviešanu, sākot ar nelielu koģenerācijas staciju un palielinot tās lielumu, paplašinoties apkārtnē. Metodoloģija veiksmīgi līdzsvaro tehnisko projektu, ekonomisko pamatojumu un ietekmi uz vidi. Neraugoties uz tādiem vienkāršojumiem kā fiksētie efektivitātes rādītāji, statistiskie tarifi un pieņēmumi par stabilu stāvokli, šī pieeja bija ļoti efektīva sākotnējā plānošanas posmā un centralizētās siltumapgādes scenāriju salīdzināšanā.

Meppel gadījuma optimizācija parādīja, ka biogāzes koģenerācija sasniedz vislabāko līdzsvaru starp efektivitāti un emisijām, ja to nepārtraukti darbina ar siltuma uzkrāšanu. Sistēmas, kurās izmanto dabasgāzes koģenerācijas staciju, ir tikai ~6 % ilgtspējīgākas nekā standarta gāzes katlu sistēmas, savukārt biogāze uzlabo ilgtspēju par > 30 %. Siltuma uzkrāšanas iekļaušana (125 l vienai māsaimniecībai 90 °C temperatūrā) palielina darbības stabilitāti un rentabilitāti.

Kopumā rezultāti liecina, ka vietējo atjaunīgo energoresursu (biogāzes, elektroenerģija no saules paneļiem) integrēšana koģenerācijā nodrošina vislielākos ilgtspējas ieguvumus tādām pilsētu energosistēmām kā *Meppel*.

***Backbone* simulācijas ieskatī (Somijas gadījums)**

Pētījuma rezultāti parāda *Backbone* energosistēmas modelēšanas sistēmas pielietojamību un elastību sarežģītu, daudzlīmeņu energosistēmu analīzei Ziemeļeiropā. *Backbone* modelis tika izmantots kā vienības iesaistes un ekonomiskās sadales rīks ar mainīgu laika periodu, koncentrējoties uz esošo aktīvu darbības optimizēšanu, nevis jaunu investīciju lēmumu pieņemšanu. Modelis veiksmīgi atspoguļoja mijiedarbību starp Ziemeļeiropas elektroenerģijas sistēmu, Somijas centralizētās siltumapgādes tīklu un reģionālo meža biomasas piegādi, sniedzot integrētu skatu uz enerģijas plūsmām, resursu pieejamību un sistēmas līmeņa ierobežojumiem.

Rezultāti liecina, ka modelētā sistēma efektīvi atspoguļoja Ziemeļvalstu enerģētikas nozares izvēlēto dekarbonizācijas ceļu, ko galvenokārt veicināja ievērojams vēja un saules enerģijas ražošanas pieaugums. 2030. gada bāzes scenārija modeļa aprēķinu galvenie rezultāti un to salīdzinājums ar 2017. gada statistiku liecināja, ka arī Somijā nedaudz palielinājās biomasas un hidroenerģijas īpatsvars, savukārt tika prognozēts, ka kodolenerģijas ražošana samazināsies par aptuveni 35 %. Centralizētās siltumapgādes

nozārē ogles un kūdras pakāpeniski aizstāja meža atliekas, maza diametra koksne, importēts granulā kurināmais, siltumsūkņi un dabasgāze. Modelis apstiprināja, ka lielapjoma siltumsūkņi nodrošina viszemākās robežizmaksas un kalpo kā bāzes slodzes tehnoloģijas, savukārt biomasas katli darbojas gandrīz visu gadu, izņemot vasaru. Enerģijas uzkrāšanas iekārtām, jo īpaši siltuma uzkrāšanas iekārtām, ir svarīga loma pieprasījuma un ražošanas īstermiņa svārstību līdzsvarošanā. Scenāriju analīze atklāja ievērojamu elastību, lai pielāgotos mainīgajiem darbības un tirgus apstākļiem. Vietējās centralizētās siltumapgādes sistēmu apvienošana ar kaimiņu pilsētu sistēmām uzlaboja sistēmas stabilitāti un samazināja kopējās ekspluatācijas izmaksas. Ekonomiskie rādītāji, piemēram, atmaksāšanās periods un iekšējā peļņas norma (*IRR*), liecina, ka biomasas apkures tehnoloģijas var būt finansiāli dzīvotspējīgas, it īpaši, ja oglekļa cenu noteikšanas un degvielas nodokļu politika veicina risinājumus, kas rada pēc iespējas zemākas emisijas. *Backbone* sistēma, pateicoties tās caurspīdīgajai modulārajai struktūrai, tiek uzskatīta par piemērotu elektroenerģijas, siltumenerģijas un biomasas nozaru apvienošanai ilgtermiņa plānošanā, vienlaikus saglabājot iespēju detalizēti novērtēt katras darbības rezultātus.

Somijas siltumenerģijas pārejas pamatsimulācija rāda, ka līdz 2040. gadam siltumenerģijas pieprasījums samazināsies par 30 % efektivitātes pieauguma dēļ; ogļu un kūdras aizstāšana ar biomasas atlikumiem, siltumsūkņiem un gāzes rezervi; pakāpeniska kodolenerģijas ražošanas samazināšanās, ko kompensē vēja un saules enerģijas pieaugums; Koģenerācijas stacija panāk lielāku emisiju samazinājumu kopējā sistēmas līmenī. Biomasas un biogāzes integrācija siltumsistēmā ievērojami samazina oglekļa emisijas, neapdraudot piegādes drošību. Helsinkos liela mēroga siltumsūkņi (60 MW) un akumulācija (11 GWh) vēl vairāk uzlabo elastību un emisiju samazināšanas potenciālu.

3.4. Daudzkritēriju lēmumu analīzes rezultāti, izmantojot *TOPSIS*

TOPSIS analīze tika piemērota izstrādājot trīs *TOPSIS* modeļus, lai novērtētu:

1) Salīdzinājumu trīs alternatīviem gāzveida kurināmajiem – dabasgāzei, biometānam, ūdeņradim, to optimālo izmantošanu vērtējot no emisiju, tehnoloģiskās piemērotības un komerciālās izmantošanas;

2) Trīs savstarpējus biometāna integrācijas scenārijus, kā optimāli nodrošināt biometāna nonākšanu tirgū, salīdzinot tiešo pieslēgumu, biometāna ievades punktu izmantošanu un ārpusstādas piegādi galalietotājiem;

3) Analizējot kādam nolūkam biometānu izmantot ir visefektīvāk.

Pēc tam tiek veikts skaidrs rangs sadalījums, pamatojoties uz relatīvo tuvināšanos ideālajam risinājumam. Viens no citiem *TOPSIS* izmantošanas pozitīvajiem rezultātiem ir tas, ka var salīdzināt vērtības ar dažādām vienībām, un vienības pašas nav novērtējuma galvenais objekts. Labākos risinājumus var noteikt un analizēt neatkarīgi no izmantotajām vienībām. [216]

1. *TOPSIS* modelis - optimāla gāzveida enerģijas avota izvēle

TOPSIS analīzes rezultāti 1. modelim, kurā salīdzināti trīs alternatīvi gāzveida enerģijas avoti: dabasgāze (1. scenārijs), biometāns (2. scenārijs) un ūdeņradis (3. scenārijs), ir parādīti rezultātu sadaļā. Tika pieņemts, ka ūdeņradis tiek ražots no atjaunīgās elektroenerģijas, t. i., tas ir zaļais ūdeņradis. Šie gāzveida avoti tika analizēti, lai atrastu optimālo avotu, pamatojoties uz dažādiem klimata, ekonomiskajiem, tehniskajiem un tirgus aspektiem, kas tika formulēti kā 12 kritēriji:

1. Siltumnīcefekta gāzu emisiju samazināšanas potenciāls (CO₂ ekvivalents uz MWh vai kg ūdeņraža gadījumā ko izdevies ietaupīt);
2. Gaisa piesārņotāju samazināšana (samazināts NO_x, SO_x, makrodaļiņu daudzums);
3. Ietekme uz atkritumu apsaimniekošanu;
4. Ienākumu potenciāls (vai produktam ir liels pieprasījums, cenu līmenis un subsīdijas, *ETS*);
5. Tehnoloģijas attīstības pakāpe;
6. Izejvielu elastība (apstrādājamo biomasas veidu klāsts);
7. Saderība ar sistēmu/infrastruktūru (vai to ir viegli integrēt esošajā sistēmā un transporta infrastruktūrā);
8. Darba vietu radīšanas potenciāls;
9. Politikas un regulējuma saskaņotība (saderība ar atjaunīgās enerģijas mērķiem, atbilstība tiesību aktiem);
10. Ieguldījums aprites ekonomikā;
11. Tehnoloģiskais risks (ekspluatācijas problēmas un kļūmes, negadījumu risks);
12. Tirgus risks (jutīgums pret enerģijas cenām, tirgus pieprasījumu, politikas stabilitāti).

Kritēriju vērtējumus izstrādāja pieredzējuši enerģētikas jomas eksperti, visiem kritērijiem tika piešķirts vienāds svars, nodrošinot balansētu rezultātu atspoguļojumu.

Turklāt autore izveidoja jaunu normalizētu kritēriju ietekmes vērtējumu. Tas tika izstrādāts, lai salīdzinātu, kuri kritēriji varētu būt visietekmīgākie katra gāzveida enerģijas nesēja scenārijiem. Nākotnē tas varētu palīdzēt lēmumu pieņēmējiem noteiktās situācijās saprast, kurš kritērijs var būt ietekmīgs un kurš ne, kā arī kāda tieši ir ietekme. Normalizēto kritēriju ietekmes punktu skaitļus var aprēķināt, pamatojoties uz *TOPSIS* datiem. To var izdarīt tikai pēc pilnīgas *TOPSIS* analīzes, un tas nav daļa no faktiskās *TOPSIS* analīzes.

Pēc normalizētās lēmumu matricas izveides katra kritērija vērtības tika kopētas, neveicot pilnīgas *TOPSIS* metodes attāluma un tuvuma koeficientu aprēķinus. Lai atvieglotu rezultātu datu apstrādi, normalizētās vērtības tika reizinātas ar 100. Iegūtie mērogotie rezultāti tika izmantoti vizualizācijā, lai salīdzinātu katra kritērija relatīvo ieguldījumu visos trīs scenārijos. Šī vizualizācija parāda, kuri kritēriji katrā scenārijā rada vislielāko ietekmi, kaut arī tā neatspoguļo galīgos *TOPSIS* tuvuma koeficientus.

2. *TOPSIS* modelis - kā nodrošināt optimālu biometāna integrāciju tirgū

Sekojoši tika veikta otrā analīze trīs biometāna integrācijas scenārijiem, kā optimāli nodrošināt biometāna nonākšanu tirgū, salīdzinot tiešo pieslēgumu, biometāna ievades punktu izmantošanu un ārpussistēmas piegādi galalietotājiem un tas tika darīts sekojoši.

Pirmkārt, tika izvēlēti trīs biometāna savienojuma alternatīvu scenāriji:

1. scenārijs: biometāna ražotnes tiešais savienojums ar gāzes sistēmu;
2. scenārijs: biometāna transportēšana kā bioCNG uz biometāna ievades punktiem (virtuālais cauruļvads);
3. scenārijs: piegāde ārpus sistēmas galalietotājiem (piemēram, transporta vai ražošanas nozarē).

Otrkārt, tika atlasīti vairāki visaptveroši kritēriji, pamatojoties uz pētījuma mērķi un citu attiecīgo pētījumu analīzi. Novērtēšanas kritērijiem ir jāatbilst ilgtspējai, rentabilitātei un darbības ietekmei – pēc iespējas augstāka ilgtspēja un rentabilitāte, kā arī mazāka negatīvā ietekme no konkrētā scenārija īstenošanas uz vidi un socioekonomiskajiem aspektiem. [136]

Lai izvērtētu biometāna tirgū nonākšanas iespējas no vides aspektiem, tika izvēlēti šādi kritēriji, kas tika izmantoti *TOPSIS* aprēķinos, pamatojoties uz ekspertu rezultātiem:

1. CO₂ emisijas: oglekļa dioksīda daudzums, kas izdalās, biometāna transportēšanas laikā uz sistēmu vai galapatērētājam.
2. Piegādes ķēdes ilgtspēja: ietekme uz vidi un sociālo ietekmi visā biometāna piegādes ķēdē, tostarp resursu iegūšanā, ražošanā un piegādē galalietotājam.
3. Vides riski: novērtē iespējamo negatīvo ietekmi uz vidi un riskus, kas var rasties, tostarp piesārņojuma riskus vai citas neparedzētas biometāna ieviešanas negatīvās sekas uz vidi.
4. Gaisa kvalitātes ieguvumi: kvantitatīvi novērtēts kaitīgo piesārņotāju (piemēram, slāpekļa oksīdu, cieta daļiņu) samazinājums ar fosilo kurināmo, uzlabojot vispārējo gaisa kvalitāti un sabiedrības veselību. Šie ieguvumi var rasties no tā, kādā veidā biometāns nonāk tirgū, kādā veidā tas tiek piegādāts sistēmā. Var pieņemt, ka biometāns tiek piegādāts ar transportlīdzekli, kas izmanto dīzeļdegvielu.
5. Resursu efektivitāte: dabas un atkritumu resursu efektīva izmantošana biometāna ražošanā un transportēšanā uz gāzes sistēmu un gala patērētāju, koncentrējoties uz atkritumu samazināšanu un atjaunīgo resursu izmantošanas maksimizēšanu, jo mazāk enerģijas zudumu vai atkritumu procesā, jo labāk.

Papildus vides sniegumam, jaunākie pētījumi arvien vairāk uzsver drošības, ekspluatācijas risku un sociālekonomisko ietekmju nozīmi biometāna sistēmās. Izaicinājumi ietver metāna noplūdes riskus, ar transportēšanu saistītus apdraudējumus, kā arī ekspluatācijas nenoteiktību, kas saistīta ar decentralizētu gāzes apstrādi un augstspiediena saspišanu [5].

Uz ilgtspēju vērsti pētījumi uzsver, ka bioenerģijas sistēmas vērtējamas gan no klimata perspektīvas, gan arī attiecībā uz vides risku iedarbību, piegādes ķēdes noturību un sabiedrības gatavību pieņemt konkrēto risinājumu [6]. Cilvēku drošība ir integrējama ekonomiskās, sociālās un vides plānošanas ietvaros, lai nodrošinātu atbildīgu un noturīgu sistēmu attīstību, savukārt jaunākās biogāzes iekārtu drošības analīzes uzsver nepieciešamību iekļaut cilvēkfaktora un ekspluatācijas risku izvērtējumu biometāna infrastruktūras plānošanā, īpaši pieaugot tās ieviešanas apjomiem [217], [218].

Šie aspekti ir īpaši vērtīgi, salīdzinot centralizētus cauruļvadu risinājumus ar transportēšanā balstītām vai ārpus sistēmas konfigurācijām, tomēr tie reti tiek sistemātiski izvērtēti vienotā lēmumu atbalsta ietvarā.

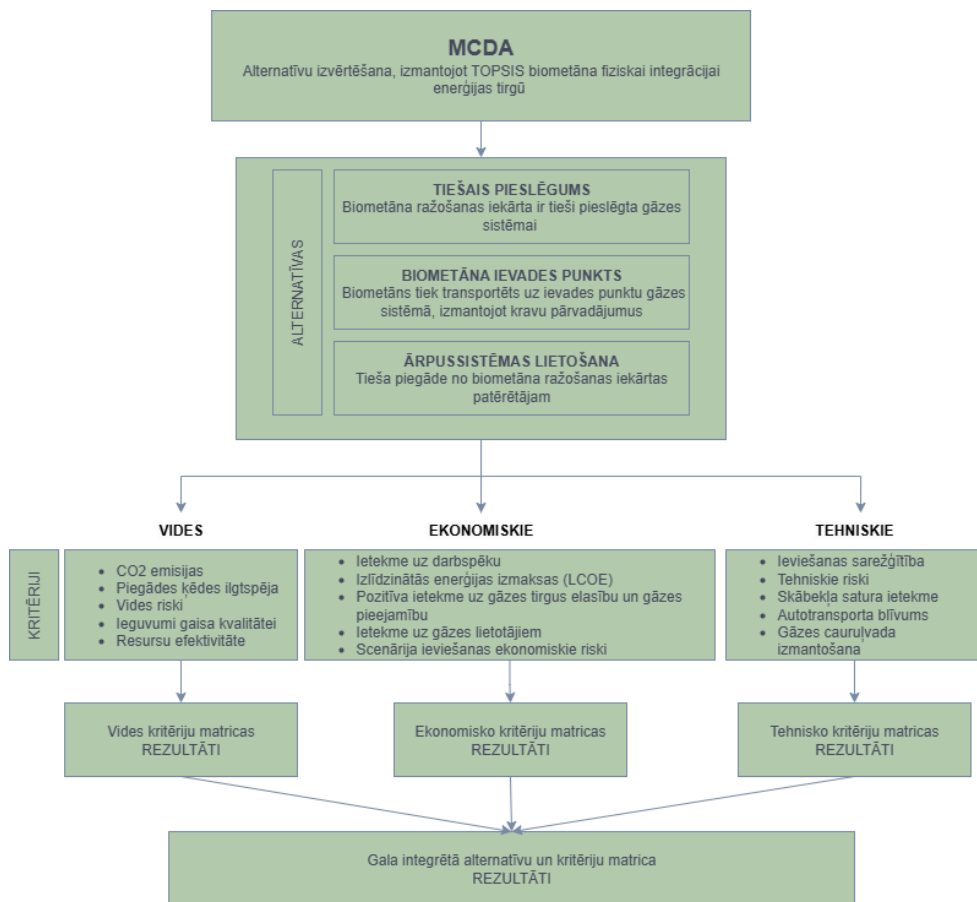
Lai izvērtētu biometāna nonākšanas tirgū iespējas no ekonomiskā viedokļa, tika izvēlēti šādi kritēriji, kas tika izmantoti *TOPSIS* aprēķinos, pamatojoties uz ekspertu rezultātiem:

6. Ietekme uz darbaspēku: potenciāls radīt vai uzturēt darba vietas visā biometāna piegādes ķēdē, veicinot vietējo un reģionālo nodarbinātību.
7. Izlīdzinātās enerģijas izmaksas: vidējo izmaksu aplēse par enerģijas ražošanu no biometāna visā tā aprites ciklā, ieskaitot investīciju, ekspluatācijas un uzturēšanas izmaksas un ievadīšanu sistēmā vai transportēšanu galapatērētājam, nodrošinot pamatu ekonomiskajam salīdzinājumam.
8. Pozitīva ietekme uz gāzes tirgus elastību un pieejamību: kā biometāna integrācija uzlabo gāzes piegādes pieejamību, nodrošinot diversificētu enerģijas tirgu.
9. Ietekme uz gāzes lietotājiem no ekonomiskajiem aspektiem: izmaksas gāzes patērētājiem, tostarp iespējamie izmaksu ietaupījumi, cenu stabilitāte, sistēmas izmantošanas tarifi vai tiešās piegādes izmaksas un ieguvumi no pārejas uz biometānu.
10. Scenārija īstenošanas ekonomiskie riski: nenoteiktība un iespējamās finansiālās problēmas, piemēram, ieguldījumu riski, tirgus pieprasījums vai politikas izmaiņas, kas varētu ietekmēt biometāna izmantošanas ekonomisko dzīvotspēju.

Lai izvērtētu biometāna nonākšanas tirgū iespējas no tehniskā viedokļa, tika izvēlēti šādi kritēriji, kas tika izmantoti *TOPSIS* aprēķinos, pamatojoties uz ekspertu vērtējumiem:

11. Īstenošanas sarežģītība: tehnisko grūtību pakāpe, kas saistīta ar biometāna integrēšanu esošajās sistēmās, tostarp infrastruktūras attīstība un nepieciešamais tehnoloģiskais progress.
12. Tehniskie riski: novērtē tehnisku kļūmju vai problēmu iespējamību, piemēram, iekārtu darbības traucējumus, integrācijas-tehniskās savienojamības problēmas vai neparedzētus inženiertehniskos šķēršļus.
13. Skābekļa satura ietekme: mēra, kā skābekļa saturs biometānā ietekmē gāzes sistēmas veiktspēju, drošību un efektivitāti, tostarp iespējamo ietekmi uz cauruļvadiem.
14. Autotransporta blīvums: ņem vērā loģistikas problēmas, kas saistītas ar biometāna transportēšanu pa sauszemi kā kravas pārvadājumu, tostarp ņemot vērā sastrēgumus uz ceļiem un transportlīdzekļu blīvuma ietekmi uz piegādes efektivitāti.
15. Gāzes cauruļvadu izmantošana: novērtē, cik lielā mērā esošo gāzes cauruļvadu infrastruktūru var efektīvi izmantot vai pielāgot biometāna transportēšanai, samazinot nepieciešamību pēc papildu ieguldījumiem.

Lai nodrošinātu visaptverošu un sistēmisku katra scenārija analīzi, biometāna nonākšanas tirgū scenāriji sākotnēji tika analizēti, izmantojot *TOPSIS*, no vides, ekonomiskajiem un tehniskajiem aspektiem atsevišķi un noslēgumā integrēti kopā. Vizuālais attēlojums ir parādīts 3.8. attēlā.



3.8. att. Rezultātu ieguvei piemērotās metodoloģijas vizuālais attēlojums, lai noteiktu labākās biometāna tirgus integrācijas metodes.

Diagrammā ir izklāstīts katrs lēmumu pieņemšanas sistēmas posms, ko izmanto, lai novērtētu biometāna integrācijas scenārijus. *TOPSIS* metodē izvēlēta pieeja ir strukturēta šādos secīgos posmos: alternatīvu un kritēriju definēšana, ekspertu rezultātu svēršana un novērtēšana, lēmumu matricas normalizēšana, ideālo un negatīvo-ideālo risinājumu aprēķināšana, attāluma aprēķins un tuvuma koeficients (c_i), scenāriju klasifikācija un integrētā analīze. Šī vizuālā metodoloģija 3.7. attēlā ilustrē loģisko analīzes procesu plūsmu un uzsver pieejas caurspīdīgumu, kā arī metodes atkārtotamību citiem pētījumiem. Tajā uzsvērts, kā vides, ekonomiskie un tehniskie apsvērumi tiek sistemātiski sakārtoti, lai atbalstītu visu ieinteresēto personu informētu lēmumu pieņemšanu biometāna izstrādē.

MCDA pētījumi biometāna jomā parasti koncentrējas uz tehnoloģiju izvēli vai individuālu gadījumu analīzi, un sistemātisks tiešā tīkla pieslēguma, biometāna ievades punktu (virtuālo cauruļvadu) un ārpus sistēmas piegāžu salīdzinājums, īpaši ņemot vērā *bioCNG* transportēšanas loģistiku, joprojām ir ierobežots. Šis pētījums papildina šo trūkumu, piedāvājot sistemātisku

salīdzinājumu, izmantojot integrētu *TOPSIS* novērtējumu vides, ekonomiskajā un tehniskajā dimensijā.

3. *TOPSIS* modelis - kādas ir efektīvas biometāna izmantošanas alternatīvas

Sekojoši tika veikta analīze nr. 3) analizējot kādam nolūkam biometānu izmantot ir visefektīvāk un tas tika darīts sekojoši.

Lai novērtētu vispiemērotākos biometāna gala lietojumus, tika izmantota daudzkritēriju analīzes (*MCA*) pieeja. Daudzkritēriju analīze, kas pazīstama arī kā daudzkritēriju lēmumu analīze (*MCDA*), ir strukturēta lēmumu atbalsta metodoloģija, lai novērtētu sarežģītas problēmas, kas ietver vairākus, bieži pretrunīgus kritērijus [219], [220]. Saīsinājumu *MCA* izmanto galvenokārt, lai raksturotu vispārīgi jebkuru metodi, kas ņem vērā vairākus kritērijus, savukārt *MCDA* tiek izmantots runājot par konkrētu, formālu matemātisko lēmumu pieņemšanu, kā piemēram, *TOPSIS* metodi. Tā vietā, lai samazinātu lēmumus līdz vienam rādītājam, *MCDA* nodrošina sistemātisku sistēmu, lai salīdzinātu alternatīvas iespējas tehniskajā, ekonomiskajā, vides un sociālajā dimensijā. [219] Tas ļauj integrēt gan kvantitatīvus, gan kvalitatīvus kritērijus, uztverot ietekmi, kuru ir grūti monetizēt vai tieši salīdzināt parastajā izmaksu un ieguvumu analīzē. Tipisks tās process ietver lēmumu alternatīvu kopuma definēšanu, attiecīgo vērtēšanas kritēriju atlasīšanu, katras alternatīvas snieguma novērtēšanu pēc šiem kritērijiem un svaru piešķiršanu, lai atspoguļotu katra kritērija relatīvo nozīmi, pirms rezultātu apkopošanas vispārējā rangā vai preferenču secībā. [221] Pēdējo desmit gadu laikā enerģētikas plānošanas kontekstā ir izstrādātas un pielietotas dažādas *MCA* metodes [220], visiem ir kopīgs pamatmērķis sistemātiski novērtēt kompromisus daudzobjektīvu lēmumu problēmās.

Atjaunīgo energoresursu un bioresursu novērtēšanā *MCA* ir kļuvis par neaizstājamu instrumentu ilgtspējīgu lēmumu pieņemšanai. Enerģētikas projektu novērtējumiem bieži ir nepieciešamas metodes, lai analizē iekļautu sociālos, vides un ekonomiskos kritērijus, un *MCA* apmierina šo vajadzību, ļaujot lēmumu pieņēmējiem skaidri izsvērt kompromisus starp dažādiem mērķiem. Šī pieeja ir plaši izmantota, lai salīdzinātu atjaunīgo energoresursu alternatīvas, tehnoloģiju iespējas un politikas scenārijus, piedāvājot skaidras priekšrocības salīdzinājumā ar viena kritērija analīzi, nosakot nemonetāro ietekmi un ieinteresēto personu vērtības. [219]

Biometāna izmantošanas kontekstā *MCA* ļauj novērtēt dažādas ražošanas un galapatēriņa iespējas (piemēram, biogāzes modernizācija ievadīšanai sistēmā, transportlīdzekļu degviela vai koģenerācija) pēc vairākiem ilgtspējas kritērijiem, lai noteiktu optimālu vai līdzsvarotu izvēli. Pētījumi liecina, ka tehnisko rādītāju (piemēram, metāna ieguves vai energoefektivitātes), ekonomisko faktoru (piemēram, kapitāla un darbības izmaksas) un ietekmes uz vidi (piemēram, siltumnīcefekta gāzu emisijas vai digestāta apsaimniekošana) iekļaušana *MCA* sistēmā nodrošina pārredzamu biometāna alternatīvu klasifikāciju, kas atbilst klimata un ilgtspējas mērķiem. [221]

Autores izmantotā *MCDA* pieeja balstījās uz ekspertu novērtējumiem, ļaujot strukturēti salīdzināt dažādus, biometāna kā resursa, potenciālos izmantošanas veidus. Tika izvēlēti pieci kritēriji, lai aptvertu katra risinājuma daudzdimensionālo ietekmi - tehnoloģiskos,

ekonomiskos, ar klimatu, vidi un sociālekonomiskos aspektus. Biometāna ievadīšana gāzes sistēmā vai uzglabāšana kā risinājums tika analizēti kā izmantošanas veids, nevis tikai starpposms, jo tam ir cita sistēmiskā funkcija un mērķis. Atšķirībā no tiešas izmantošanas ievade sistēmā un teorētiska uzglabāšana pie atbilstošiem gāzes kvalitātes apstākļiem (it īpaši bez skābekļa klātbūtnes), sniedz elastību un ļauj transportēt biometānu atkarībā no tirgus apstākļu priekšrocībām. Uzglabāšana arī nodrošina piegāžu drošību, līdz ar to scenārijs izvēlēts, lai parādītu biometānu kā tirgū pieejamu un sistēmā integrējamu, nevis tikai vietēji patērējamu energoresursu.

Ekspertiem tika lūgts novērtēt katru potenciālo biometāna izmantošanu, izmantojot skalu no 1 līdz 10, atspoguļojot katras iespējas uztverto ieguldījumu šo kritēriju īstenošanā. Pēc tam individuālie rādītāji tika normalizēti, lai nodrošinātu rādītāju salīdzināmību un samazinātu subjektivitāti.

Novērtētie biometāna izmantošanas veidi ietvēra:

- 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 atkal ir enerģijas pārveidošanas nozare.
- Rūpnieciskā ražošana – biometāna izmantošana kā izejviela vai procesa kurināmais liela mēroga rūpniecības objektos, tostarp ķīmijas, mēslojuma vai cementa rūpniecībā.
- Proteīna ražošana – inovatīvs biotehnoloģisks pielietojums, kur biometāns kalpo kā substrāts vienšūnu proteīns vai citu augstvērtīgu bioproduktu ražošanai.

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

Daudzkritēriju lēmumu analīzes rezultāti optimālai gāzveida kurināmā izmantošanai

Rezultāti atspoguļoti salīdzinājumam trim alternatīviem gāzveida kurināmajiem – dabasgāzei, biometānam, ūdeņradim, to optimālai izmantošanai vērtējot no emisiju, tehnoloģiskās piemērotības un komerciālās izmantošanas aspektiem.

MCDA izmantošana ir vērtīgs instruments gan kā atsevišķs pētījums, gan kā *LCA* papildinājums. Tas ļauj novērtēt dažādas tehnoloģiskās un investīciju alternatīvas, pamatojoties uz līdzsvarotu kritēriju kopumu, tostarp ietekmi uz vidi, rentabilitāti, energoefektivitāti un tehnoloģisko realizējamību. *MCDA* palīdz noteikt prioritātes investīcijām un politikas izvēlēm, kas atbilst gan vides mērķiem, gan arī ekonomiskajai un tehniskajai efektivitātei, piemēram, kā nodrošināt, ka biometāns tiek ievadīts sistēmā vai citādi sasniedz gala lietotāju.

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.).

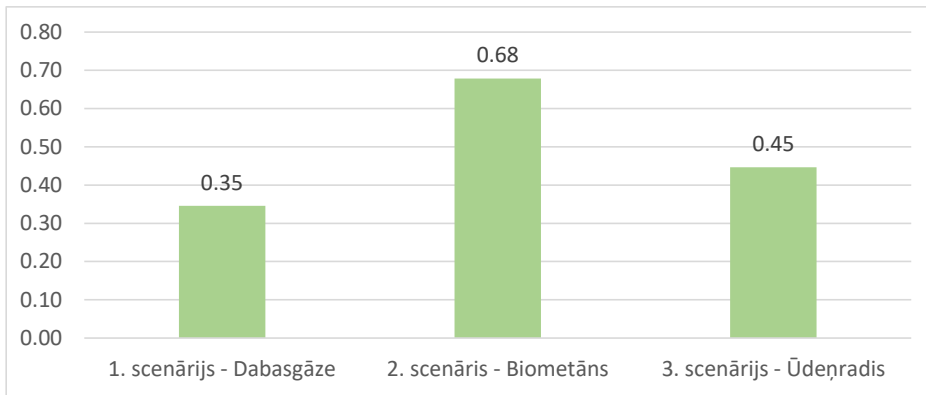
3.5. tabula

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 (neradītas) 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)	0,717	0,574	0,395	0,0833

esošajā infrastruktūrā vai izmantojama transporta sektorā), <i>technical rediness level</i> 1-10				
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 jūtīgums, politikas mainība), vērtējums 1-10	0,600	0,388	0,600	0,0833

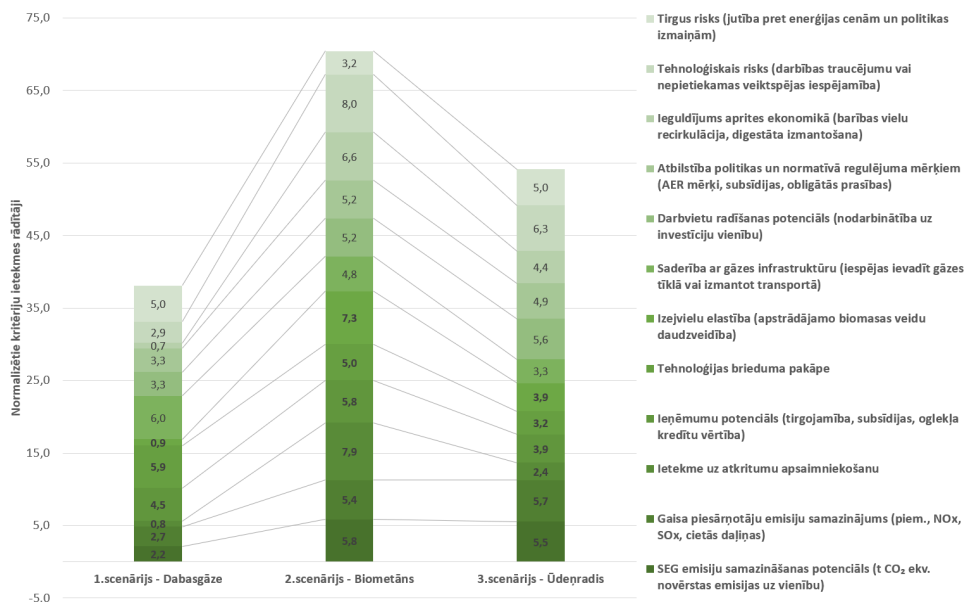
Salīdzinot scenārijus, visiem kritērijiem tika izmantots vienāds kritēriju svērums, lai nodrošinātu līdzvērtīgu novērtējumu un objektīvu salīdzinājumu. Tas nodrošina sabalansētu pieeju salīdzinājumam. Izaicinājums, izmantojot daudzkritēriju analīzi ir tajā, ka samazinās katra kritērija ietekme, jo to 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 (3.9. att.).



3.9. 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 dabaszgāze (rezultāts 0,35).

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



3.10. att. Normalizēto rādītāju kritēriju līmeņu salīdzinājums.

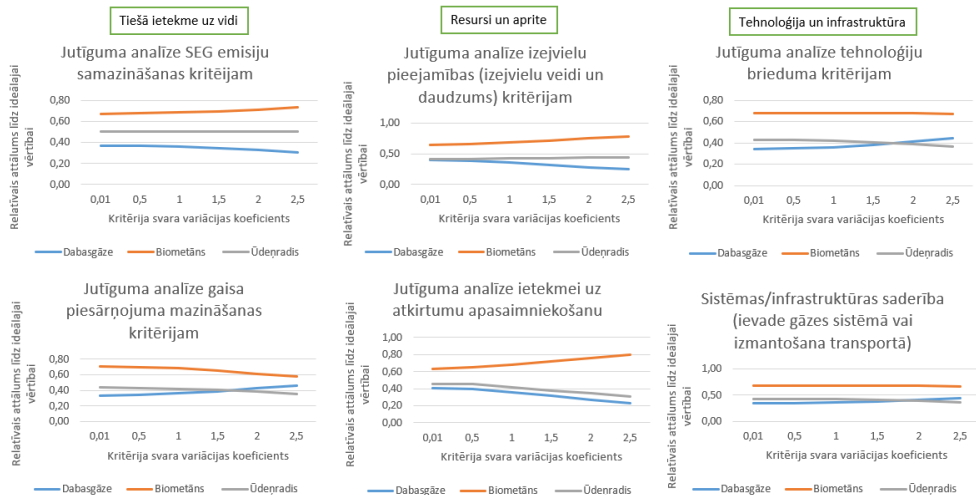
3.10. attēla rezultāti liecina, ka biometāns (2. scenārijs) uzrāda visaugstāko kumulatīvo punktu skaitu visos 12 kritērijos, kas liecina, ka tas ir vislabvēlīgākais risinājums daudzkritēriju novērtējumā. Otrā vietā ierindojas ūdeņradis (3. scenārijs), savukārt visvājākie kopējie rādītāji

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 uzrādīja 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. Biometāns dominē kritērijos, kas saistīti ar aprites ekonomiku, atkritumu apsaimniekošanu un elastīgumu. Ūdeņradis var tikt uzskatīts par daudzsoļu energoresursu dekarbonizācijas jomā (siltumnīcefekta gāzu samazināšana, atbilstība regulējumam), bet tā tehnoloģiskā brieduma trūkums un riski ierobežo tā pašreizējo konkurētspēju. Dabasgāze ir ar zemākiem rādītājiem vairumā ilgtspējības kritēriju, kas norāda uz tās lomu kā pārejas energoresursam.

Papildus tika veikta jutīguma analīze (angļu val. *sensitivity analysis*), un tā tiek veikta, lai izpētītu kritēriju svaru ietekmi uz alternatīvām. Tā tika veikta, lai noteiktu kā mainās kāds no parametriem, ja analīzē tiek aizstāts kāds no elementiem vai cik stabili ir iegūtie rezultāti kādai no alternatīvām, ja tiek mainīti svāri jeb konkrētā elementa nozīmīgums. Balstoties uz jutīguma analīzes rezultātiem var konstatēt vai izvēlēta mainīgā komponente izraisa lielas izmaiņas - būtisku ietekmi uz attiecīgo tehnoloģisko, vides vai ekonomisko aspektu.

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 rangus. Šajā jutīguma analīzē katram kritērijam piešķirtais svārs tika pakāpeniski mainīts robežās no 0,01-2,5. Katrai variācijai tika pārrēķināts relatīvais attālums no ideālā risinājuma.

Jutīguma analīzes rezultāti ir strukturēti divās galvenajās grupās, apvienojot savstarpēji saistītus kritērijus loģiskam pārskatam. Pirmajā grupā (3.11. att.) analizēts rezultātu jutīgums vides un tehniskajiem kritērijiem, kas raksturo fizisko infrastruktūru, sistēmu un tās ietekmi uz vidi.

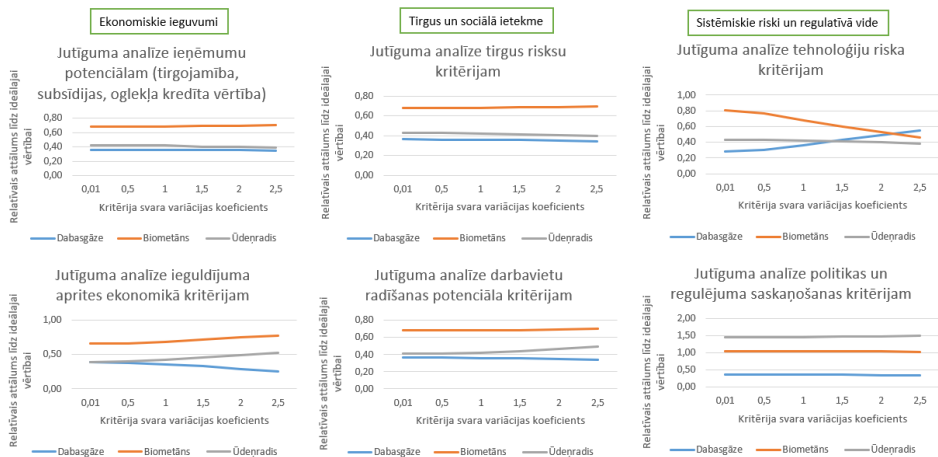


3.11. att. Jūtīguma analīze vides un tehniskajiem kritērijiem.

Jūtīguma analīze vides un tehnisko kritēriju grupā ir ar salīdzinoši augstu rezultātu stabilitāti. Tiešās ietekmes uz vidi kritēriju - SEG emisiju samazināšanas un gaisa piesārņojuma mazināšanas kritēriju gadījumā biometāna scenārijs stabili saglabā augstāko relatīvo attālumu līdz ideālajai vērtībai visā kritēriju svara variācijas koeficienta diapazonā. Līknes ir stabilas pat ja vides prioritātes mainās.

Resursu un aprītes kritēriju grupā ir līdzīga tendence kā tiešās ietekmes uz vidi grupai, kur biometānam ir visaugstākā jūtība un tam ir vismazākais relatīvais attālums līdz ideālajai vērtībai. Palielinoties šo kritēriju svaram (nozīmībai), biometāna novērtējums pieaug un tas atbilst, kā arī saskan ar literatūrā aprakstīto biometāna lomu aprītes ekonomikā. Ne ūdeņraža, ne dabaszāzes scenārijos novērtējums ir stabils vai nedaudz samazinās, īpaši atkritumu apsaimniekošanas jomā. Tehnoloģisko un infrastruktūras kritēriju gadījumos scenāriji ir mēreni stabili un attiecīgie kritēriji neietekmē vai ietekmē minimāli alternatīvu rangus. Vairums grupas kritēriju ir stabili un attiecīgi vides un tehnisko kritēriju piemērošana novērtējumā nodrošina salīdzinoši stabilu rīku, lai to izmantotu lēmumu pieņemšanā.

Otrajā grupā (3.12. att.) analizēts rezultātu jutīgums ekonomiskajiem, tirgus un regulatīvajiem aspektiem, kas kopumā nosaka risinājumu efektīvu izmantošanu.



3.12. 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. Ieņēmumu potenciāla un ieguldījumu aprites ekonomikā gadījumā, biometāna scenārijs saglabā dominējošu pozīciju un uzrāda mēreni pieaugošu tendenci, palielinoties šo kritēriju svaram. Biometāna risinājums ir konkurētspējīgs, ja prioritāte tiek piešķirta ekonomiskajai aktivitātei un vietējās ekonomikas stimulēšanai. Dabaspāzes scenārijam šajos gadījumos ir pakāpeniska novērtējuma pazemināšanās, vienlaikus tā būtiski pieaug tehnoloģisko risku kritērija svaru gadījumā.

Tirgus risku un darbavietu radīšanas potenciālu scenāriji pēc to tendencēm ir līdzīgi, kur biometāna scenārijs saglabā augstāko novērtējumu, bet dabaspāzes un ūdeņraža scenāriji atsevišķos punktos pietuvojas viens otram un ir relatīvi līdzvērtīgi pie noteiktiem tirgus apstākļiem (kritēriju svāriem).

Vislielākās variācijas ir tehnoloģisko risku kritērijam, kur būtiskas svārstības ir dabaspāzes un biometāna rādītājiem, palielinoties kritērija svaram, samazinās biometāna scenārija tuvums līdz ideālajai vērtībai. Ņemot vērā salīdzinošo nestabilitāti, šis kritērijs ir viens no svarīgākajiem faktoriem, kas var mainīt alternatīvu rangu.

Daudzkritēriju lēmumu analīzes rezultāti katram biometāna savienojuma tipam un optimālai nonākšanai gāzes tirgū

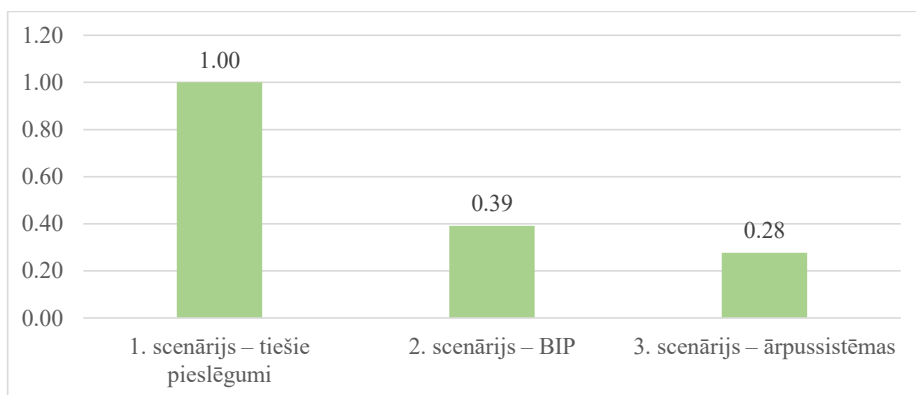
Pēc ekspertu rezultātu saņemšanas, tika veikta atbilžu anketu analīze, apkopojot ekspertu vērtējumus vienā atsevišķā vides kritēriju matricā, kur, izmantojot *TOPSIS*, tika iegūts vides kritēriju novērtējums, kas apkopots 3.6.tabulā.

3.6. tabula

Normalizēta lēmumu matrica vides kritēriju scenārijiem

	1. scenārijs	2. scenārijs	3. scenārijs	Kritēriju svāri
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 svēruma, lai nodrošinātu vienādu novērtējumu un iespējamu objektīvu salīdzinājumu. Tas nodrošina vienādu kritēriju salīdzinājumu, un, pamatojoties uz ekspertu novērtējumu, tika iegūti šādi scenāriju novērtējumi par vides aspektiem, kas atspoguļoti 3.10. attēlā.



3.13. 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 ārpussistēmas 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 ir sniegta normalizētās lēmumu matricas ekonomiskais novērtējums visiem trim scenārijiem, izmantojot ekspertu noteiktos rezultātus.

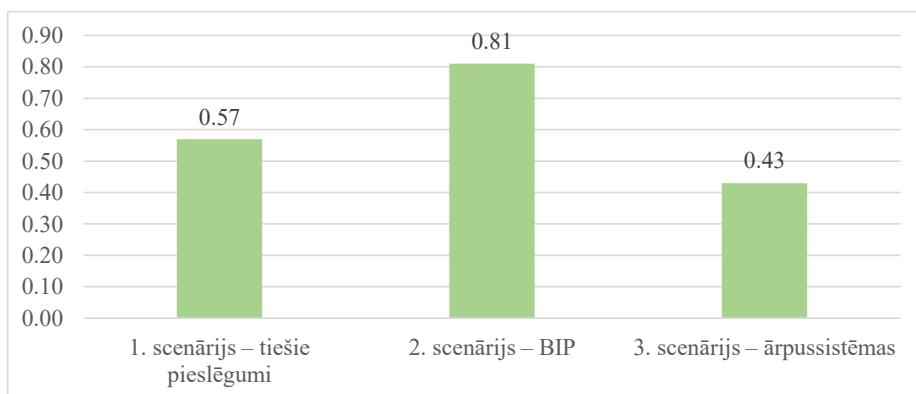
3.7. tabula

Normalizēta lēmumu matrica ekonomisko kritēriju scenārijiem

	1. scenārijs	2. scenārijs	3. scenārijs	Kritēriju svāri
--	--------------	--------------	--------------	-----------------

Ietekme uz darbaspēku, darbvietas uz 1 milj. EUR investīciju	0,496	0,608	0,620	0,2
Izlīdzinātas 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 (3.14. att.), lai pēc iespējas labāk apstrādātu ekspertu novērtējumus pēc pieciem galvenajiem ekonomiskajiem kritērijiem.



3.14. 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 tuvojas 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 veikspējas rādītāju ($C_i = 0,57$). Tas atspoguļo līdzsvarotu, bet mazāk optimālu apmaiņu starp darbaspēka pabalstiem un ekonomiskajiem riskiem.

Savukārt 3. scenārijs, kas balstīts ārpus sistēmas esošos risinājumos, deva viszemāko ekonomisko piemērotību ($C_i = 0,43$). 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 salīdzinotā ar centralizētām vai tiešām alternatīvām, nodrošinot kvantitatīvu pamatu politikas un

investīciju lēmumu prioritāšu noteikšanai energosistēmas dekarbonizācijas atbalstam, ja runa ir tikai par ekonomikas prioritātēm.

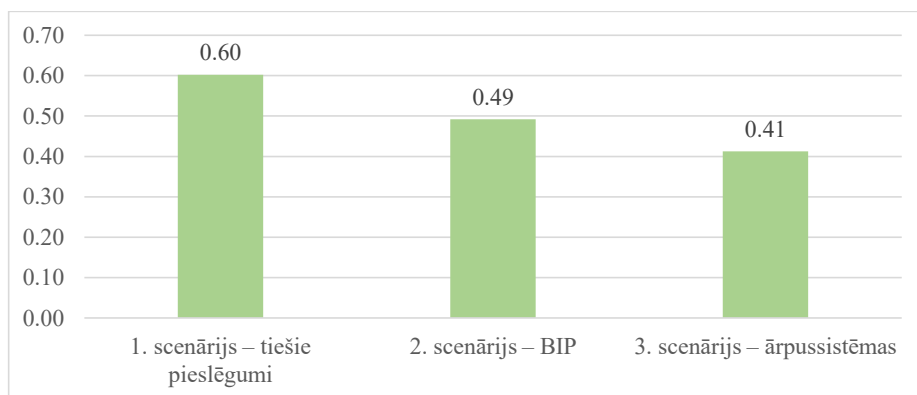
3.8. tabulā sniegts normalizētās lēmumu matricas tehniskais novērtējums visiem trim scenārijiem, izmantojot ekspertu noteiktos rezultātus.

3.8. tabula

Normalizēta lēmumu matrica tehnisko kritēriju scenārijam

	1. scenārijs	2. scenārijs	3. scenārijs	Kritēriju sviri
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 (3.15. att.).



3.15. 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 ārpus tīkla 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 gala lietotājiem, 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.

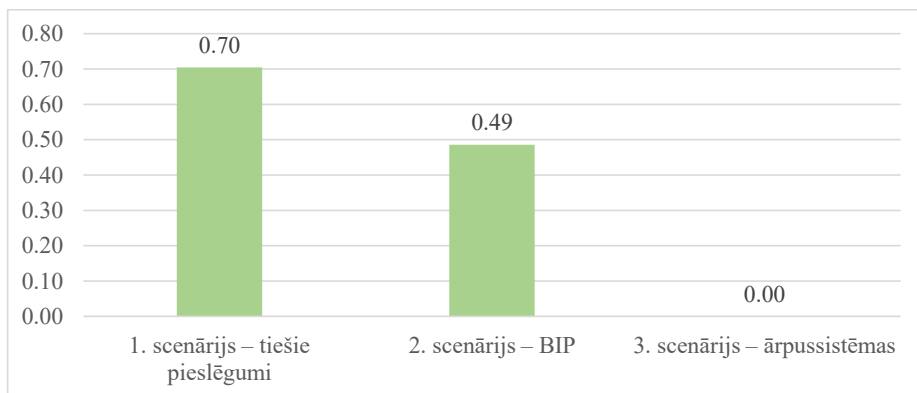
Lai padziļināti izvērtētu un salīdzinātu iegūtos rezultātus, pētījuma autore veica jaunu matricas novērtēšanas analīzi ar *TOPSIS*, integrējot un apkopojot iepriekš iegūtos rezultātus (3.9. att.). Integrētajā matricā, apvienojot vides, ekonomisko un tehnisko kritēriju analīzes rezultātus, tie atkal tika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

3.9. 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.



3.16. 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).

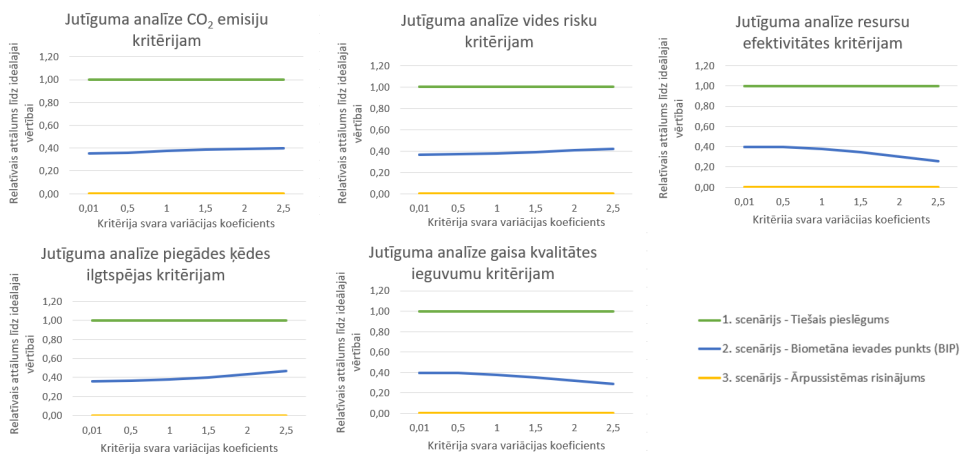
2. scenārijs, kas paredz biometāna ievades punktu, sasniedza vidēju integrēto rādītāju 0,49, atspoguļojot dažus kompromisus starp ekonomiskajām stiprajām pusēm un tehniskajiem ierobežojumiem. Lai gan šī konfigurācija piedāvā zināmu darbības efektivitāti, tās zemākā vides un tehniskā saskaņošana samazina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

Turpretī 3. scenārijs, kas attēlo ārpus sistēmas 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.

Neskatoties uz iespējamiem nišas pielietojumiem attālinātos vai autonomos apstākļos, ārpus sistēmas esošajām sistēmām pašlaik trūkst vispārējai lietošanai nepieciešamās ekonomiskās, tehniskās un vides veiktspējas. Lai novērtētu rezultātu mainību un kritēriju ietekmi TOPSIS analizē rēķinātajiem scenārijiem tika veikta jutīguma analīze.

Jutīguma analīze parāda, kā mainās relatīvais tuvums ideālajam risinājumam, kad palielinās vai samazinās konkrēta kritērija nozīme. Līknes, kuras paliek stabilas norāda, ka rezultāti ir salīdzinoši nejutīgi pret analizētā kritērija svārstībām. Līknes, kas palielinās vai samazinās norāda, kurus scenārijus kritēriju svārstības ietekmē. Krustošanās liecina, ka alternatīvas var mainīties dažādu svārstību ietekmē.

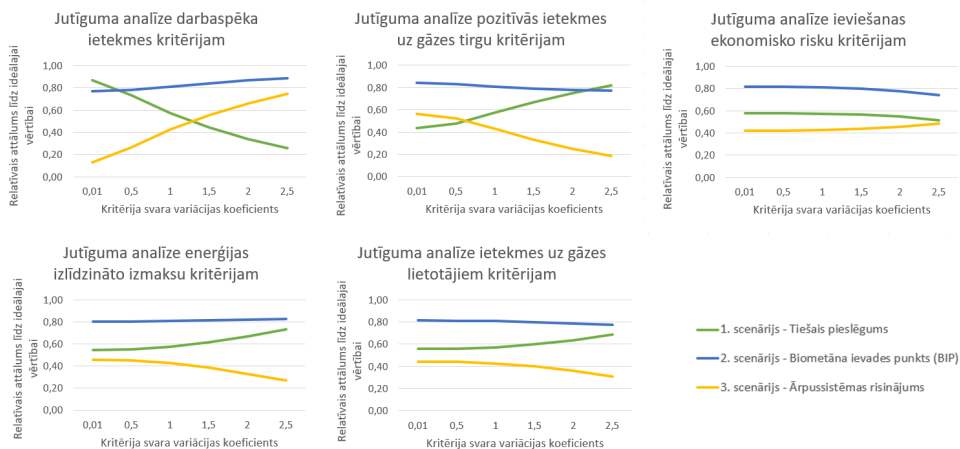
Iegūtie rezultāti ir sagrupēti vides kritērijos (3.17. att.), ekonomiskajos kritērijos (3.18. att.), tehniskajos kritērijos (3.19. att.) un integrētajos kritērijos (3.20. att.).



3.17. att. Vides kritēriju svārstības jutīguma analīze.

Vides kritēriju grupa ietver CO₂ emisiju, vides risku, resursu efektivitātes, piegādes ķēdes ilgtspējas un gaisa kvalitātes ieguvumu kritēriju jutīguma novērtēšanu. Jutīguma grafikos redzams, ka tiešā pieslēguma scenārijs saglabā salīdzinoši augstas tuvuma vērtības visā svārstību diapazonā. Līknes kopumā paliek stabilas, ar nelielām svārstībām BIP scenārijā, norādot, ka šī scenārija vides novērtējumu būtiski neietekmē mērenas atsevišķu vides rādītāju nozīmes izmaiņas. BIP scenārijā vairākos grafikos redzamas nelielas tuvuma vērtību svārstības, ko ietekmē vides rādītāja svaru (kritērija svārstības koeficienta) palielināšanās. Tas

norāda, ka scenārija relatīvā situācija kļūst nedaudz mainīga un potenciāli mazāk labvēlīga, ja lielāks uzsvars analīzē ir uz vides aspektiem. Ārpussistēmas risinājuma scenārijs ir stabils un svaru mainība to neietekmē.

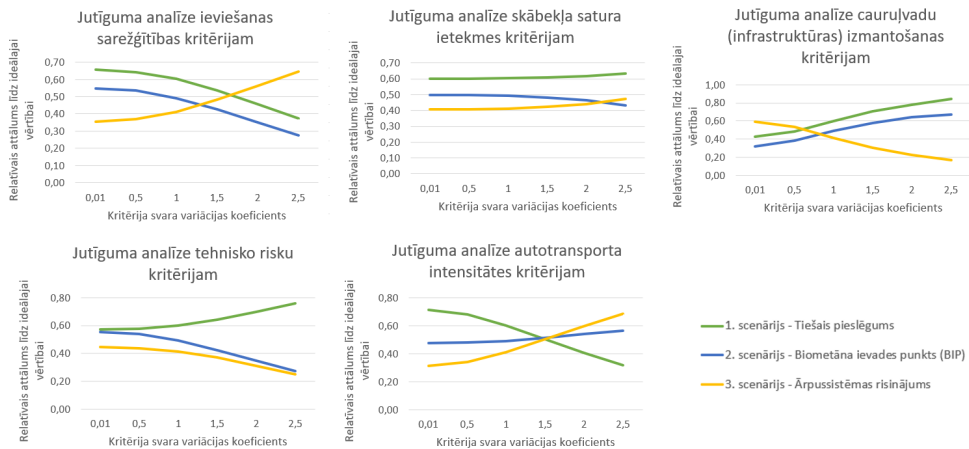


3.18. att. Ekonomisko kritēriju variācijas jutīguma analīze.

Ekonomisko kritēriju grupa (3.18. att.) ietver darbaspēka ietekmi, pozitīvo ietekmi uz tirgu, ekonomisko risku, izlīdzinātajām izmaksām un ietekmi uz gāzes lietotāju novērtēšanu.

Pētījumā veikta ekonomisko kritēriju jutības analīze par izlīdzinātām enerģijas izmaksām, ekonomiskajiem kritērijiem un ieviešanas ekonomiskajiem riskiem.

Kopumā novērojams, ka scenāriju rangs nav pilnībā statisks, un atsevišķos gadījumos tas būtiski mainās, kas norāda uz kritēriju izvēles nozīmīgumu lēmumu pieņemšanā. Visstabilākais rezultāts redzams 2. scenārijam – biometāna ievades punktam (BIP). Tā relatīvais tuvums ideālajam risinājumam saglabājas augsts, ar minimālām svārstībām visos ekonomisko kritēriju gadījumos. Tas liecina, ka šis risinājums ir mazāk jutīgs pret individuālu kritēriju svārstībām. Tiešā pieslēguma (1. scenārijs) gadījumā ir novērojama jutība vairākos kritērijos. Palielinoties pozitīvajai ietekmei uz gāzes tirgu, enerģijas izlīdzinātajām izmaksām vai ietekmei uz gāzes lietotājiem (šo kritēriju svaram), šī scenārija rezultāti uzlabojas šī scenārija novērtējums ievērojami uzlabojas. Pieaugot darbaspēka ietekmes kritērija svaram, tā novērtējums būtiski samazinās, līdz ar to tiešais pieslēgums ir atkarīgs no izvēlētajām prioritāšu struktūras un var būt gan optimāls, gan mazāk piemērots atkarībā no vērtēšanas perspektīvas. Trešais scenārijs ar ārpusistēmas risinājumu lielākoties uzrāda pretēju reakciju tiešajiem pieslēgumiem. Tas kļūst konkurētspējīgāks gadījumos, kad palielinās darbaspēka ietekmes kritērija nozīme, taču tā ietekme mazinās, kad prioritāte ir ekonomisko risku un tirgus attīstības kritērijiem. Ekonomisko risku kritērijs ir salīdzinoši stabils visos scenārijos. Kritēriju savstarpējo novērtējumu ietekmē darbaspēka ietekme, pozitīvā ietekme uz gāzes tirgu un enerģijas izlīdzināto izmaksu rādītāji. Šo kritēriju svārstības var mainīt alternatīvu rangs, kamēr pārējie nodrošina rezultātu stabilitāti.



3.19. att. Tehnisko un infrastruktūras variācijas jutīguma analīze.

Tehnisko kritēriju grupa (3.19. att.) ietver ieviešanas sarežģītību, skābekļa satura ietekmes novērtējumu, cauruļvadu izmantošanu, tehniskos riskus un autotransporta intensitātes novērtēšanu.

Analizējot ieviešanas sarežģītību jutības analīze rāda, tiešā pieslēguma (1. scenārijs) relatīvais attālums līdz ideālajai vērtībai samazinās, kad pieaug kritērija svars, savukārt ārpusistēmas risinājums reaģē pretēji un tas pietuvojas ideālajai vērtībai, tāpat kā transporta intensitātes kritērijā. Skābekļa satura ietekmes kritērija gadījumā visu scenāriju novērtējuma izmaiņas ir minimālas, jutīguma analīze uzrāda stabilus rezultātus. Tiešā pieslēguma gadījumā redzams neliels pieaugums, vienlaikus kopumā skābekļa saturam nav izšķirošas lomas alternatīvu savstarpējā izvēlē un rezultāti ir stabili.

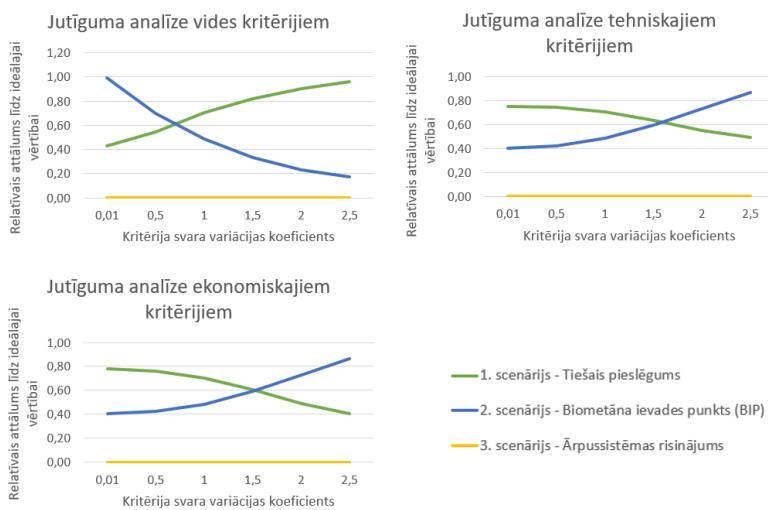
Cauruļvadu izmantošana norāda to kā pieaugot kritērija svaram gan tiešo pieslēgumu, gan BIP pietuvošanās ideālajai vērtībai pieaug, vienlaikus tas norāda uz augstu infrastruktūras izmantošanas potenciālu. Ārpussistēmas risinājums ir ar zemu integrāciju esošajā infrastruktūrā, tāpēc tā sniegums ievērojami samazinās pieaugot kritērija svaram un nozīmīgumam.

Tehnisko risku kritērija analīze parāda, ka tiešā pieslēguma novērtējums uzlabojas, pieaugot šī kritērija nozīmei, kas ļauj secināt - ja svarīgi ir mazināt tehniskos riskus, tiešā biometāna ražotnes pieslēguma pie sistēmas izvēle ir optimāls risinājums. BIP un ārpusistēmas risinājuma novērtējumi samazinās, ņemot vērā riskus, kas saistīti ar sistēmas ne-statisko dabu, regulārām plūsmu izmaiņām, tai skaitā ar ceļu satiksmi saistītajiem riskiem. Tiešais pieslēgums nodrošina stabilitāti un augstāku tehnisko drošumu ilgākā laikā. Autotransporta intensitātes kritērija gadījumā novērojama pretēja tendence, kur ārpusistēmas risinājuma nozīmē pieaug, palienoties kritērija svaram, kamēr BIP ir mēreni augošs. Attiecīgi ārpusistēmas risinājumi var būt elastīgāki un efektīvāki no loģistikas aspektiem, jo var nodrošināt ļoti plašu un elastīgu biometāna piegādi, taču vienlaikus pastāv ceļu infrastruktūras

slodzes palielināšanas saistītie izaicinājumi. Visizteiktākās izmaiņas alternatīvu novērtējumā redzamas mainot ieviešanas sarežģītības, infrastruktūras izmantošanas un autotransporta intensitātes kritēriju svarus. Savukārt skābekļa satura ietekmes kritērijs demonstrē zemu jutību, kas liecina par tā ierobežotu ietekmi uz kopējo rezultātu.

Rezultāti liecina, ka BIP saglabā salīdzinoši augstu stabilitāti, kur tiešais pieslēgums ir jutīgs pret infrastruktūras un tehniskajiem aspektiem, taču tam ir ievērojamas priekšrocības pie noteiktām prioritātēm, piemēram, ja svarīga ir infrastruktūras noslodze un mazināti tehniskie riski.

Visbeidzot veikta jutīguma analīze integrētajiem rezultātiem (3.20. att.).



3.20. att. Integrēto scenāriju variācijas jutīguma analīze.

Visos gadījumos redzama pretēja dinamika starp tiešo pieslēgumu un BIP, kamēr ārpus sistēmas risinājums visos gadījumos ir stabils un relatīvi mazāk piemērotākais risinājums. Palielinoties vides kritēriju nozīmīgumam un vides ilgtspējas aspektiem arvien augstāku sniegumu uzrāda tiešais pieslēgums, kamēr BIP piemērotība mazinās, ko lielā mērā var saistīt ar tehniskajiem riskiem un autotransporta izmantošanu biometāna pārveidošanai uz BIP. Palielinoties tehnisko kritēriju svaram, kopumā BIP risinājuma sniegums uzlabojas, savukārt tiešā pieslēguma vērtība nedaudz pasliktinās, vienlaikus saglabājot mērenu stabilitāti. Ekonomisko kritēriju gadījumā palielinoties ekonomisko kritēriju būtiskumam, BIP uzrāda pieaugošu tendenci tuvojoties ideālajam risinājumam, kamēr no ekonomiskā aspekta tiešais pieslēgums var būt salīdzinoši mazāk izdevīgs augsto investīciju dēļ. Izvēloties labāko risinājumu svarīgi noteikt prioritātes. Izvirzot par svarīgāko vides aspektus, kā optimālākā izvēle ir tiešie pieslēgumi savukārt tehnisko vai ekonomisko risinājumu gadījumā bieži vien pamatotāk var būt izvēlēties BIP, kamēr ārpus sistēmas risinājums visos gadījumos ir vismazāk konkurētspējīgais risinājums.

Vairāki pētījumi analizē energosistēmu projektēšanu un darbību, izmantojot matemātiskās optimizācijas modeļus. Tie bieži tiek formulēti kā atsevišķas problēmas, kuru mērķis ir

minimizēt kopējās sistēmas dzīves cikla izmaksas, vai kā vairāku problēmu kopu, kas papildus ņem vērā vides rādītājus, piemēram, CO₂ emisijas. Šī pētījuma rezultāti saskan ar iepriekšējiem pētījumiem, kas norāda, ka tiešais biometāna pieslēgums gāzes sistēmai nodrošina labāku vides sniegumu, pateicoties transportēšanas izslēgšanai un zemākam metāna noplūdes riskam [222][27]. Šajā kontekstā biometāns ir kļuvis par daudzsološu atjaunīgo gāzveida kurināmo, kas var izmantot esošo dabasgāzes infrastruktūru, vienlaikus piedāvājot ievērojamu siltumnīcefekta gāzu emisiju samazinājumu [28], [29]. Neskatoties uz biometāna attīstības potenciālu. Biometāna ievades punktu ekonomiskais sniegums šajā pētījumā atbilst pētījumiem, kas uzsver to nozīmi kapitālieguldījumu samazināšanā un piekļuves uzlabošanā tirgum reģionos ar izklīdētu biogāzes ražošanu [6].

Šī pētījuma novitāte ir integrēts tiešā pieslēguma, biometāna ievades punktu un ārpussistēmas piegāžu salīdzinājums vienotā, *TOPSIS* balstītā lēmumu atbalsta sistēmā. No plānošanas perspektīvas secinājumi liecina, ka tiešais pieslēgums sistēmai ir vislīdzsvarotākais ilgtermiņa risinājums, savukārt biometāna ievades punkti kalpo kā ekonomiski pievilcīga alternatīva tiešajiem pieslēgumiem. Ārpussistēmas risinājumi galvenokārt ir piemēroti izmantošanai specifiskos lokālos apstākļos.

Daudzkritēriju lēmumu analīzes rezultāti par biometānu kā resursu un optimālu tā pielietojuma novērtējumu

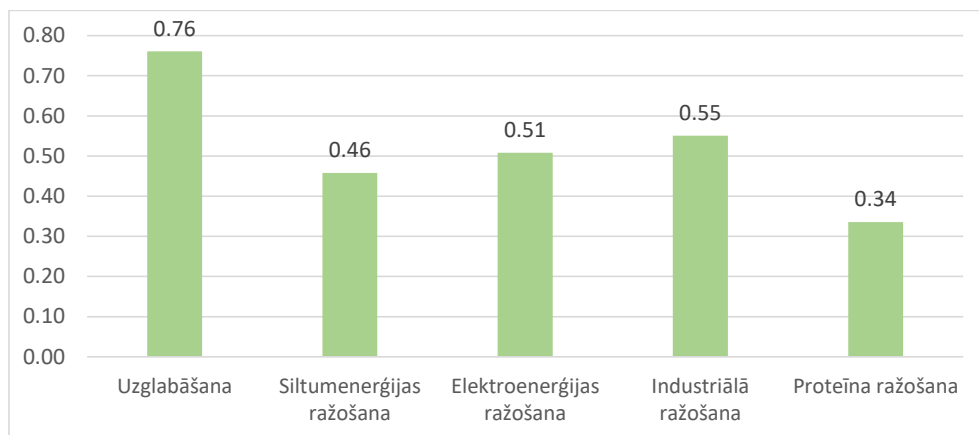
Sekojoši aplūkoti *TOPSIS* analīzes rezultāti, kur *TOPSIS* tika izmantots, lai aprēķinātu un novērtētu kādam nolūkam biometānu iespējams izmantot vis lietderīgāk un efektīvāk.

MCD rezultāti, kā parādīti 3.21. attēlā, atklāj, ka uzglabāšana un ievadīšana 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 caur esošo gāzes infrastruktūru un izplatīt dažādām patērētāju kategorijām, tostarp potenciālo eksportu uz kaimiņu tirgiem. Uzglabāšana un transportēšana ir iespējama tikai pie apstākļiem, kur biometāns un tajā esošo komponentu raksturlielumi atbilst stingrām pieļaujamās gāzes kvalitātes prasībām.

Tālāk ierindojās elektroenerģijas un siltumenerģijas ražošana, uzsverot biometāna kā tūlītēja fosilās dabasgāzes aizstājēja nozīmi enerģijas pārveidošanas procesos. Šie lietojumi ir tehnoloģiski nobrieduši un palīdz samazināt CO₂ emisijas elektroenerģijas un siltumenerģijas nozarē, lai gan to ilgtermiņa klimatiskos un vides rādītājus ierobežo ar sadedzināšanu saistītās emisijas.

Rūpnieciskā ražošana ieguva vidēju rādītāju, parādot, ka eksperti atzīst tās nozīmi energoietilpīgo nozaru dekarbonizācijā. Tomēr pašreizējais rūpnieciskās izmantošanas apjoms un ierobežotie stimuli tuvākajā laikā var ierobežot tās plašāku izvēršanu.

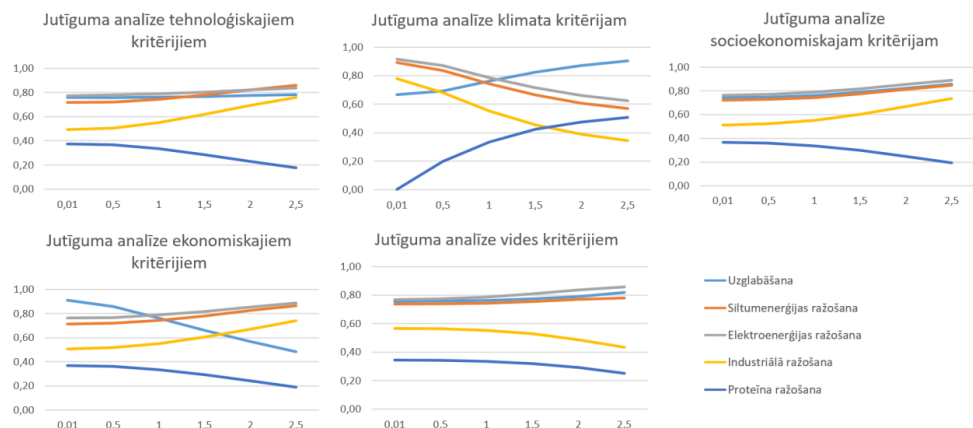
Visbeidzot, olbaltumvielu ražošana tika novērtēta kā vismazāk labvēlīgais risinājums, galvenokārt tāpēc, ka pašlaik ir zemāka tehnoloģiskā gatavība un ekonomiskā iespējamība. Tomēr eksperti atzina tās potenciālu kā nākotnes aprītes ekonomikas inovācijai, kas ļauj atjaunīgo energoresursu gāzi pārvērst augstvērtīgos bioproduktos.



3.21. att. Optimālās biometāna izmantošanas metodes – salīdzinošie *MCDA* rezultāti, kas parāda dažādu biometāna galapatēriņa iespēju relatīvo piemēroību.

Kopumā *MCDA* rezultāti uzsvēr, ka biometāna uzglabāšana un enerģijas ražošana pašlaik tiek uzskatīta par daudzsolācākajiem un īstenojamākajiem virzieniem, savukārt rūpnieciskiem un biotehnoloģiskiem lietojumiem var būt nepieciešama turpmāka tehnoloģiju attīstība un politikas atbalsts, lai sasniegtu salīdzināmu potenciālu.

Kritēriju ietekmes novērtēšanai *TOPSIS* analīzē rēķinātajiem scenārijiem papildu tika veikta jutīguma analīze (3.22. att).



3.22. att. *TOPSIS* modeļa jutīguma analīze pēc biometāna lietojuma veidiem.

Alternatīvu novērtējumu kopumā ietekmē kritēriju grupu svāri, tomēr atsevišķos gadījumos tendences ir stabilas. Augstākais relatīvais tuvums ideālajam risinājumam norāda uz labāku alternatīvas veiktspēju, savukārt līknes slīpums raksturo rezultātu jutību, tāpēc

vēlamākas ir alternatīvas, kas apvieno augstu novērtējumu ar zemu jutību pret kritēriju svāra izmaiņām.

Tehnoloģisko kritēriju grupā augstākais relatīvais tuvums ideālajai vērtībai visā novērtējuma diapazonā (0,01-2,5) saglabājas elektroenerģijas un siltumenerģijas ražošanai. Šīs alternatīvas pārsvarā ir vistuvāk ideālajam rezultātam un pārsvarā, izņemot klimata kritērija analīzi, pieaug pakāpeniski. Gan industriālajai ražošanai, gan proteīna ražošana līknes uzrāda nelineāru jutību. Attiecīgi industriālās ražošanas konkurētspēja tehnoloģiskajā dimensijā pieaug un proteīna ražošanai mazinās, ja tiek piešķirts lielāks kritērija svārs.

Klimata kritēriju grupā līknes ir nestabilas, kas nozīmē, ka svāri ietekmē visus kritērijus. Salīdzinoši izteikts pozitīvs pieaugums ir uzglabāšanai - pozitīvs pieaugums, kas pietuvojas ideālajai vērtībai. līdž ar to palielinot prioritāti, palielinās uzglabāšanas pozitīvais sniegums. Lai arī elektroenerģijas un siltumenerģijas ražošana ir salīdzinoši tuvu ideālajai vērtībai, to konkurētspēja mazinās palielinoties klimata kritēriju nozīmei. Tāpat arī industriālajai ražošanai. Proteīna ražošana ir vistālāk no ideālās vērtības, taču palielinoties klimata kritērija nozīmei tā pieaug, vienlaikus saglabā zemu pozīciju.

Socioekonomiskā kritērija gadījumā augstāko relatīvo tuvumu ideālajai vērtībai saglabā elektroenerģijas un siltumenerģijas ražošana, arī uzglabāšana un to vērtējums pieaug, palielinoties kritērija svāram. Industriālā ražošana arī uzrāda pieaugumu, tomēr saglabā zemāku līmeni nekā vadošās alternatīvas. Kritums ir proteīna ražošanas alternatīvai, attiecīgi palielinoties socioekonomiskā kritērija nozīmei, proteīna ražošana kā alternatīva kļūst arvien mazāk konkurētspējīga.

Ekonomisko kritēriju grupā augstākai un mēreni pieaugošs novērtējums ir elektroenerģijas un siltumenerģijas ražošanai. Uzglabāšana un proteīna ražošana zaudē savu konkurētspēju palielinoties ekonomiskā kritērija lomai. Kad būtiska loma lēmumu piešķiršanā ir ekonomiskajam kritērija, par konkurētspējīgākajām ir uzskatāmas siltumenerģijas un elektroenerģijas ražošanas alternatīvas.

Vides kritēriju grupā kopumā ir vislielākā rezultātu stabilitāte. Elektroenerģijas un siltumenerģijas ražošana, kā arī uzglabāšana saglabā augstu relatīvo tuvumu ideālajai vērtībai. Industriālā un proteīna ražošana pakāpeniski samazinās un pieaugot kritēriju svāram to pozīcija pasliktinās salīdzinot ar citām alternatīvām. Tas nozīmē, ka no vides kritēriju vērtējuma arī konkurētspējīgākās un stabilākās ir enerģijas ražošanas alternatīvas.

Elektroenerģijas un siltumenerģijas ražošana vairumā gadījumu apvieno augstu novērtējumu ar salīdzinoši stabili trajektoriju, tādēļ kopumā šīs alternatīvas uzskatāmas par viskonkurētspējīgākajām. Uzglabāšana kļūst dominējoša galvenokārt klimata kritēriju grupā, kas skaidrojams ar emisiju jaunu emisiju neradīšanu. Industriālā ražošana saglabā viduvēju konkurētspēju. Proteīna ražošana kopumā demonstrē zemāku relatīvo tuvumu ideālajai vērtībai – mazāk vēlamā no alternatīvām dažādās kategorijās. Alternatīvu izvēle lielā mērā ir tieši atkarīga no vēlamajām prioritātēm.

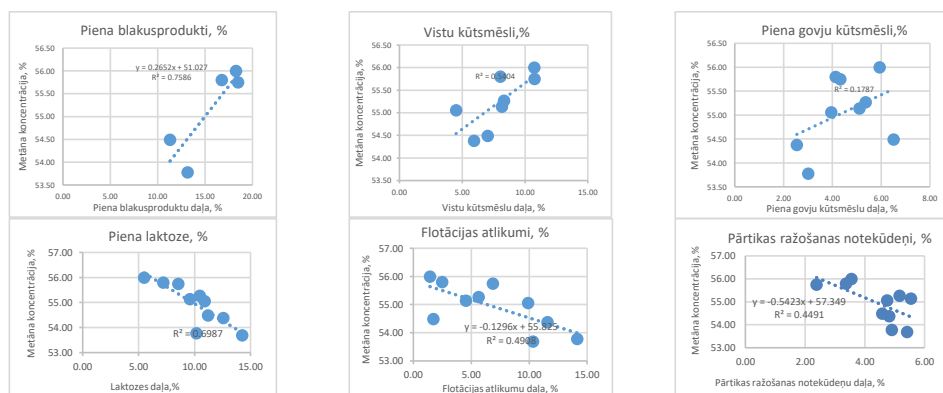
3.5. Regresijas analīzes rezultāti - biometāna ražošanas apjoma (ražīguma) efektivitātes analīze

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 3.23. attēlā. Starp tiem piena ražošanas blakusproduktiem, vistas kūtmēsliem un piena govju kūtmēsliem bija pozitīva korelācija ar metāna koncentrāciju, kas liecina, ka lielāks šo substrātu īpatsvars palielināja izejvielu maisījuma metanogēno potenciālu. Un otrādi, piena laktoze, flotācijas atlikumi un notekūdeņi no pārtikas rūpniecības uzrādīja negatīvu korelāciju, norādot, ka to īpatsvara palielināšanās bija 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.

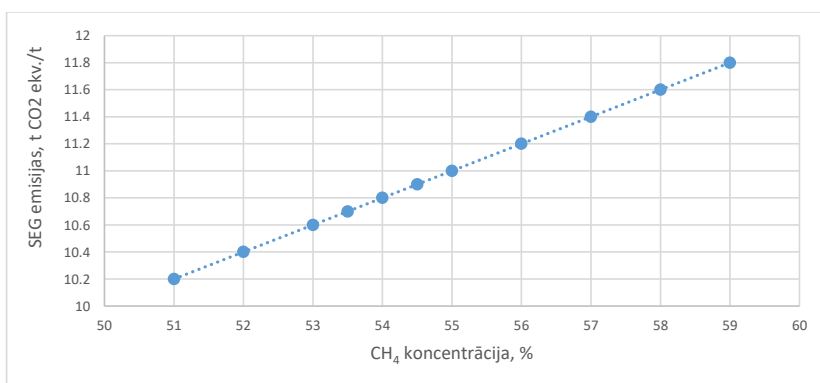
Jāuzsver, ka spēcīgākās prognozējošās attiecības ir tās, kur R² vērtības tuvojas 1, piemēram, piena ražošanas blakusproduktu gadījumā (R² = 0,786), kas visspēcīgāk veicināja metāna koncentrāciju, un piena laktozi (R² = 0,687), kas uzrādīja visizteiktāko negatīvo korelāciju. Turklāt mijiedarbība starp 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.



3.23. 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 3.24. 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.



3.24. 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

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

3.10. 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

Salīdzinot kapitālieguldījumus visos trīs scenārijos (skat. 3.10. tab.), kļūst skaidrs, ka pirmajā scenārijā sākotnējās investīcijas ir vislielākās (aptuveni 17 milj. EUR), jo tajā jānodrošina gan cauruļvadu izbūve, gan centralizētas ievades stacijas izveide dabasgāzes sistēmā. Otrajā scenārijā kapitālieguldījumi ir ievērojami zemāki (aptuveni 6,4 milj. EUR), jo biometāns tiek nogādāts uz centralizētu ievades punktu ar autotransportu, tādējādi izvairoties no plašas cauruļvadu infrastruktūras izbūves. Šī pieeja samazina sākotnējās investīcijas, taču palielina ekspluatācijas izmaksas, kas saistītas ar pārvadāšanu.

Trešajā scenārijā kapitālieguldījumi ir vismazākie (aptuveni 5,2 milj. EUR), jo nav nepieciešams izbūvēt izmaksu ziņā apjomīgus cauruļvadus vai veidot centralizētu biometāna ievades punktu dabasgāzes sistēmā. Lai gan šī pieeja ievērojami samazina tradicionālās infrastruktūras izbūves izmaksas, tā prasa veikt investīcijas alternatīvās enerģijas transportēšanas sistēmās, tostarp biometāna uzglabāšanas iekārtās un specializētā infrastruktūrā, kas nodrošina tiešu biometāna piegādi gala lietotājiem, piemēram, degvielas uzpildes stacijām, rūpnieciskajiem patērētājiem vai citām nozarēm, kur biometāns tiek izmantots kā enerģijas avots vai izejviela.

Šie rezultāti liecina, ka pirmais scenārijs ir visatbilstošākais situācijās, kad pieejama attīstīta dabasgāzes infrastruktūra un biometāna ievadīšana sistēmā ir ekonomiski izdevīga. Otrs scenārijs kļūst par piemērotāko risinājumu tajos reģionos, kur cauruļvadu izbūve nav tehniski vai finansiāli pamatota, taču joprojām pastāv nepieciešamība nodrošināt centralizētu biometāna sadali. Savukārt trešais scenārijs vislabāk atbilst specifiskiem tirgus segmentiem, piemēram, transporta nozarei, kur biometāns tiek izmantots kā alternatīva degviela un kur tieša piegāde gala patērētājiem nodrošina vislielāko pievienoto vērtību.

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

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

Tā, kā visos scenārijos tika pieņemts, ka gada laikā tiek saražotas 20 000 MWh biometāna, tad ieņēmumu aprēķins visiem trim scenārijiem ir identisks un redzams 3.1. vienādojumā.

Tomēr ievērojot atšķirīgos kapitālieguldījumus, atmaksāšanās periods katram no scenārijiem būs atšķirīgs. Atmaksāšanās perioda aprēķins 1. scenārijam attēlots 3.2 vienādojumā:

$$PBP = \frac{17\,050\,000}{1\,400\,000 - 1\,112\,275} \approx 59.2 \text{ gadi} \quad (3.2.)$$

Rezultāts norāda uz ļoti ilgu atmaksāšanās periodu, kas padara šo scenāriju finansiāli nepievilcīgu, ja vien nav pieejamas valsts subsīdijas vai cita veida atvieglojumi, kas ļautu samazināt atmaksāšanās laiku, kurš bez valstiska līmeņa pasākumu piemērošanas, pārsniedz biometāna ražotnes dzīves cikla ilgumu.

Otrais scenārijs ietver biometāna saspiešanu un transportēšanu uz centralizētu biometāna ievades punktu gāzes sistēmā. Kā secināts iepriekš, tas samazina infrastruktūras izmaksas, bet palielina transporta izmaksas ekspluatācijas periodā. Atmaksāšanās perioda aprēķins 2. scenārijam redzams 3.3. vienādojumā:

$$PBP = \frac{6\,400\,000}{1\,400\,000 - 808\,400} \approx 10.8 \text{ gadi} \quad (3.3.)$$

Šim scenārijam kapitālizmaksu atmaksāšanās periods ir vairāk kā piecas reizes īsāks, kas padara šo risinājumu būtiski pievilcīgāku un būtu uzskatāms par realizējamu bez valsts atbalsta pasākumiem.

Trešajā scenārijā biometāns tiek pārdots tieši rūpnieciskajiem lietotājiem un degvielas uzpildes stacijām, tādējādi visvairāk samazinot kapitālieguldījumu izmaksas, jo nav nepieciešama ne cauruļvadu izbūve, ne centralizēta ievades punkta izveide. Atmaksāšanās perioda aprēķins 3. scenārijam atspoguļots 3.4. vienādojumā:

$$PBP = \frac{5\,200\,000}{1\,400\,000 - 757\,847} \approx 8.1 \text{ gadi} \quad (3.4.)$$

Salīdzinot visu trīs scenāriju atmaksāšanās laikus (skat. 3.11. tabulu), kļūst skaidrs, ka trešais scenārijs ir visrentablākais, jo tam ir visīsākais atmaksāšanās periods.

3.11. tabula

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. Pateicoties brīvā tirgus struktūrai, Latvijā ražots biometāns var tikt brīvi eksportēts arī uz citām Eiropas valstīm, atkarībā no pieprasījuma. Turpretī tiešā piegāde ārpus gāzes sistēmas un tiešā pārdošana balstās ierobežotā klientu segmentā, piemēram, transporta sektorā vai lielajos industriālajos objektos.

Otrs nozīmīgs aspekts ir tirgus riska mazināšana, jo biometāna ievadīšana dabasgāzes sistēmā nodrošina stabilāku cenu vidi un noturīgu pieprasījumu, kamēr tiešā pārdošana gala lietotājiem ir daudz vairāk pakļauta cenu svārstībām un konkurencei ar alternatīviem energoresursiem, piemēram, elektroenerģiju vai ūdeņradi. No vides aspektiem biometāna piegāde dabasgāzes sistēmai ļauj plašāk aizvietot fosilo dabasgāzi un līdz ar to mazināt siltumnīcefekta gāzu emisijas lielākā mērogā, savukārt tiešā pārdošana galvenokārt ietekmē tikai atsevišķus sektorus. Līdz ar to, pat ja trešais scenārijs ir finansiāli izdevīgāks īstermiņā, otrais scenārijs piedāvā noturīgāku un drošāku ieguvumu kopumu ilgtermiņā gan ekonomikas, gan vides perspektīvā.

Lai novērtētu dažādu faktoru ietekmi uz biometāna integrācijas ekonomisko dzīvotspēju, tika veikta jūtīguma analīze, kas ļauj noteikt, kā ekonomisko, tehnoloģisko un politisko mainīgo izmaiņas ietekmē atmaksāšanās periodu katrā scenārijā. Jūtīguma analīze ir īpaši nozīmīga atjaunīgās enerģijas projektos, jo biometāna cena, transportēšanas izmaksas, valsts atbalsta intensitāte un tehnoloģiju izmaksas var būtiski svārstīties, tādējādi ietekmējot projekta rentabilitāti.

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:

- scenārijā no 59,2 gadiem līdz 50,6 gadiem;
- scenārijā no 10,8 gadiem līdz 9,3 gadiem;
- 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:

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

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

- scenārijā no 59,2 gadiem līdz 47,4 gadiem;
- scenārijā no 10,8 gadiem līdz 8,9 gadiem;
- 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 kapitālietilpīgi, piemēram, pirmā scenārija risinājums, tomēr aprēķini rāda, ka pat ar pietiekami apjomīgu valsts atbalstu investīcijas pieslēgumu izbūvē ir ļoti sarežģīti atgūt saprātīgā termiņā.

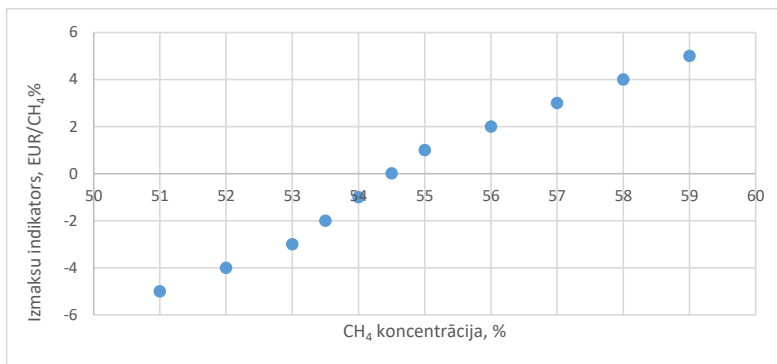
Kopumā šīs nodaļas analīze parāda, ka biometāna integrācijas ekonomiskā lietderība Latvijā ir atkarīga no izvēlēta tehniskā risinājuma, kapitālieguldījumu apjoma un tirgus situācijas. Lai gan tiešā biometāna piegāde gala patērētājiem (3. scenārijs) sniedz visīsāko atmaksāšanās periodu un augstāko teorētisko rentabilitāti, biometāna transportēšana uz centralizētu biometāna ievades punktu (2. scenārijs) nodrošina stabilākus ieņēmumus un mazāku tirgus risku. Savukārt tiešā ievade dabasgāzes sistēmā (1. scenārijs) nav ekonomiski pamatota bez būtiskiem valsts atbalsta mehānismiem.

Šī ekonomiskā analīze atklāj, ka biometāna integrācijas finanšu ilgtspēja un stratēģiskā pievilcība ir cieši atkarīga no izvēlēta scenārija, kapitālieguldījumu intensitātes un tirgus attīstības tendencēm.

Biometāna ražošanas izmaksu analīzes rezultāti

Tika novērtēta arī saistība starp metāna koncentrāciju un ar izejvielām saistītām ražošanas izmaksām, un rezultāti parādīti 3.25. attēlā. Rezultāti liecina par skaidru pozitīvu korelāciju starp CH₄ koncentrāciju saražotajā biogāzē un izmaksu rādītāju (EUR/CH₄%), kas liecina, ka substrāti ar augstāku metāna saturu parasti ir saistīti ar augstākām ražošanas izmaksām. Kad CH₄ koncentrācija palielinājās no aptuveni 50% līdz 59%, attiecīgais izmaksu rādītājs palielinājās no aptuveni -5 EUR/CH₄% līdz gandrīz +5 EUR/CH₄%.

Šo tendenci var attiecināt uz izejvielu sastāvu un kvalitāti. Substrātiem, kas palielina metāna koncentrāciju (piemēram, piena ražošanas blakusproduktiem un kūsmēsliem), bieži ir nepieciešamas lielākas ieguves, apstrādes vai pirmapstrādes izmaksas, savukārt substrāti ar zemāku metāna potenciālu (piemēram, flotācijas atliekas vai notekūdeņi) parasti ir lētāki. Blakusprodukti var būt pieejami pat par negatīvām izmaksām. Tāpēc augstākas kvalitātes izejvielu maisījumi, kas uzlabo biogāzes ražību, arī mēdz palielināt vienības ražošanas izmaksas uz metāna procentuālo daudzumu.



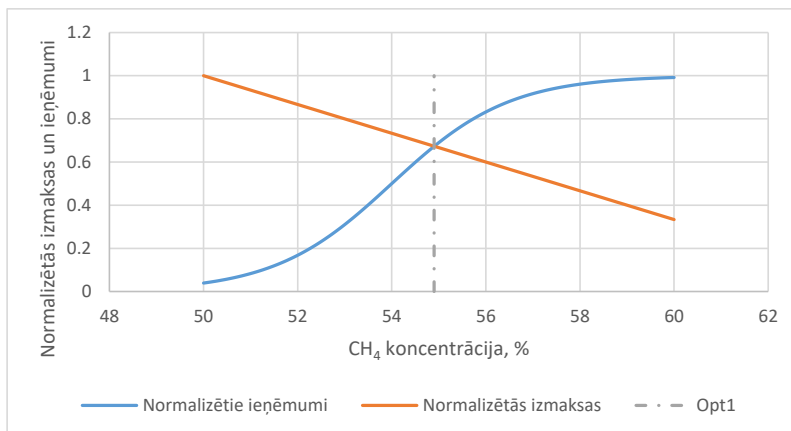
3.25. att. Izejvielu izmaksas, pamatojoties uz metāna koncentrāciju.

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.



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

Šī vizualizācija (3.26.att.) atklāj galveno ekonomisko dinamiku.

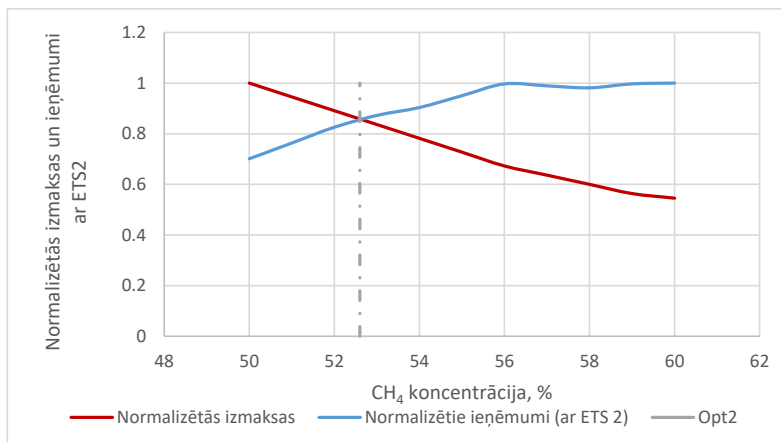
- Normalizētā ražošanas izmaksu līkne parasti samazinās, palielinoties CH₄ koncentrācijai, jo augstāks metāna saturs uzlabo gāzes kvalitāti un ļauj iegūt lielāku enerģijas izlaidi uz vienu apstrādātās izejvielas vienību.
- Un otrādi, normalizētie ieņēmumi līkne sākotnēji palielinās līdz ar CH₄ koncentrāciju, 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 šis krustojuma punkts Opt1 nosaka ekonomiski optimālo metāna koncentrāciju iekārtas darbībai. Darbība šīs koncentrācijas tuvumā var dot vislīdzsvarotāko peļņu no ekspluatācijas ieguldījuma.

3.27. attēls. ilustrē ES 2. emisiju 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.



3.27. 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. 3.26. un 3.27. 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 stimulē samazināt 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 sistēmās 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] Igor Laine, “Institution-based view of entrepreneurial internationalization,” Lappeenranta University of Technology, 2016.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] European Commission, “REPowerEU at a glance,” https://commission.europa.eu/topics/energy/repowereu_en#documents.
- [8] 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>.
- [9] P. Sulewski, W. Ignaciuk, M. Szymańska, and A. Waś, “Development of the Biomethane Market in Europe,” Feb. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/en16042001.
- [10] 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.
- [11] Charlotte de Lorgeril, “7th European Biomethane Benchmark,” <https://www.sia-partners.com/en/insights/publications/7th-european-biomethane-benchmark>.
- [12] 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.
- [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] Centrālā Statistikas 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
- [15] Conexus Baltic Grid, “Dabaszāzes pārvades sistēmas operatora,” Rīga, 2025. Accessed: Oct. 03, 2025. [Online]. Available: https://www.conexus.lv/uploads/filedir/Zinojumi/2024_PSO_ikgad_nov_zinojums-01-07_LV.pdf.

- [16] Conexus Baltic Grid, “Natural gas transmission system operator annual assessment report for the year 2023,” 2024. Accessed: Jun. 03, 2024. [Online]. Available: https://www.conexus.lv/uploads/filedir/Dokumenti/25-07_TSO_annual_assessment_report_2023_eng.pdf.
- [17] 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
- [18] European Environment Agency, “Transport and mobility,” <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/transport-and-mobility#:~:text=The%20European%20Green%20Deal%20aims,cars%2C%20planes%2C%20and%20ships>.
- [19] Eurostat, “Share of energy from renewable sources.” Accessed: Apr. 11, 2026. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_ind_ren_custom_19589624/bookmark/table?lang=en&bookmarkId=ea6f0af7-74a9-4e2e-999e-0fac12ad093f&c=1767887656000.
- [20] GIE (Gas Infrastructure Europe), “European Biomethane Map.” Accessed: Dec. 06, 2025. [Online]. Available: <https://www.gie.eu/publications/maps/european-biomethane-map/>.
- [21] European Biogas Association, “EBA Statistical Report 2024.” Accessed: Dec. 06, 2025. [Online]. Available: <https://www.europeanbiogas.eu/publication/eba-statistical-report-2024/>.
- [22] EBA (European Biogas Association), “Statistical report 2023 Tracking biogas and biomethane deployment across Europe,” Brussels, Dec. 2023.
- [23] D. Thrän *et al.*, “The potential contribution of biogas to the security of gas supply in Germany,” *Energy Sustain. Soc.*, vol. 13, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1186/s13705-023-00389-1.
- [24] European Biogas Association, “European biomethane capacity hits 7 bcm – stronger policy support needed to sustain momentum,” <https://www.europeanbiogas.eu/news/european-biomethane-capacity-hits-7-bcm-stronger-policy-support-needed-to-sustain-momentum/>.
- [25] ENTSOG (The European Network of Transmission System Operators for Gas), “ENTSOG – 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>.
- [26] IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change, *Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Mitigation of Climate Change*. 2022. [Online]. Available: www.ipcc.ch
- [27] I. - International Energy Agency, “World Energy Outlook 2023,” 2023. [Online]. Available: www.iea.org/terms
- [28] M. Torrijos, “State of Development of Biogas Production in Europe,” *Procedia Environ. Sci.*, vol. 35, pp. 881–889, 2016, doi: 10.1016/j.proenv.2016.07.043.

- [29] N. Scarlat, J. F. Dallemand, and F. Fahl, “Biogas: Developments and perspectives in Europe,” Dec. 01, 2018, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.renene.2018.03.006.
- [30] V. Dubrovskis and I. Plume, “Biogas potential from damaged bread,” in *Engineering for Rural Development*, Latvia University of Agriculture, 2017, pp. 437–442. doi: 10.22616/ERDev2017.16.N087.
- [31] J. B. Holm-Nielsen, T. Al Seadi, and P. Oleskowicz-Popiel, “The future of anaerobic digestion and biogas utilization,” *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 22, pp. 5478–5484, Nov. 2009, doi: 10.1016/j.biortech.2008.12.046.
- [32] T. Al Seadi *et al.*, *Biogas Handbook*. University of Southern Denmark, 2008. [Online]. Available: <https://www.lemvigbiogas.com/BiogasHandbook.pdf>.
- [33] I. Muizniece, A. Kubule, and D. Blumberga, “Towards understanding the transdisciplinary approach of the bioeconomy nexus,” in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2018, pp. 175–180. doi: 10.1016/j.egypro.2018.07.052.
- [34] K. Bumbiere, A. Gancone, J. Pubule, V. Kirsanovs, S. Vasarevicius, and D. Blumberga, “Ranking of Bioresources for Biogas Production,” *Environmental and Climate Technologies*, vol. 24, no. 1, pp. 368–377, Jan. 2020, doi: 10.2478/rtuect-2020-0021.
- [35] J. Pubule, A. Blumberga, F. Romagnoli, and D. Blumberga, “Finding an optimal solution for biowaste management in the Baltic States,” *J. Clean. Prod.*, vol. 88, pp. 214–223, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.04.053.
- [36] A. Barisa, V. Kirsanovs, and A. Safronova, “Future transport policy designs for biomethane promotion: A system Dynamics model,” *J. Environ. Manage.*, vol. 269, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110842.
- [37] K. Bumbiere, J. Pubule, and D. Blumberga, “What Will Be the Future of Biogas Sector?,” Jan. 01, 2021, *Sciendo*. doi: 10.2478/rtuect-2021-0021.
- [38] M. Röder, “More than food or fuel. Stakeholder perceptions of anaerobic digestion and land use; a case study from the United Kingdom,” *Energy Policy*, vol. 97, pp. 73–81, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.enpol.2016.07.003.
- [39] J. Markard, R. Raven, and B. Truffer, “Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects,” *Res. Policy*, vol. 41, no. 6, pp. 955–967, Jul. 2012, doi: 10.1016/j.respol.2012.02.013.
- [40] B. K. Sovacool, S. Griffiths, J. Kim, and M. Bazilian, “Climate change and industrial F-gases: A critical and systematic review of developments, sociotechnical systems and policy options for reducing synthetic greenhouse gas emissions,” May 01, 2021, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2021.110759.
- [41] D.-T. C. E. J. O. R. Development, ; J Vol, M. Kulla, and L. Novotný, “Biogas energy - a chance for agriculture and rural development? Insight from the post-communist Central Europe,” vol. 11, 2019.
- [42] S. Achinas, V. Achinas, and G. J. W. Euverink, “A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste,” *Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 299–307, Jun. 2017, doi: 10.1016/J.ENG.2017.03.002.
- [43] E. Mauky, S. Weinrich, H. Nägele, H. F. Jacobi, J. Liebetau, and M. Nelles, “Model Predictive Control for Demand-Driven Biogas Production in Full Scale,” *Chem. Eng. Technol.*, vol. 39, no. 4, pp. 652–664, Apr. 2016, doi: 10.1002/ceat.201500412.

- [44] A. K. Boulamanti, S. Donida Maglio, J. Giuntoli, and A. Agostini, “Influence of different practices on biogas sustainability,” *Biomass Bioenergy*, vol. 53, pp. 149–161, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.biombioe.2013.02.020.
- [45] K. A. Lyng, A. E. Stensgård, O. J. Hanssen, and I. S. Modahl, “Relation between greenhouse gas emissions and economic profit for different configurations of biogas value chains: A case study on different levels of sector integration,” *J. Clean. Prod.*, vol. 182, pp. 737–745, May 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.02.126.
- [46] R. J. Patinvoh, O. A. Osadolor, K. Chandolias, I. Sárvári Horváth, and M. J. Taherzadeh, “Innovative pretreatment strategies for biogas production,” Jan. 01, 2017, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.biortech.2016.11.083.
- [47] B. M. Smyth, J. D. Murphy, and C. M. O’Brien, “What is the energy balance of grass biomethane in Ireland and other temperate northern European climates?,” Dec. 2009. doi: 10.1016/j.rser.2009.04.003.
- [48] C. da S. Bueno, J. M. F. J. da Silveira, B. de S. Moraes, and T. T. Franco, “Biogas upgrading to biomethane in Brazil: Networks, technologies, and industrial pathways,” *Sustainable Futures*, vol. 10, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.sfr.2025.101423.
- [49] W. M. Budzianowski and D. A. Budzianowska, “Economic analysis of biomethane and bioelectricity generation from biogas using different support schemes and plant configurations,” *Energy*, vol. 88, pp. 658–666, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.05.104.
- [50] T. Nevzorova and V. Kutcherov, “Barriers to the wider implementation of biogas as a source of energy: A state-of-the-art review,” Nov. 01, 2019, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.esr.2019.100414.
- [51] Junginger M, Baxter D, editors, *Biomethane Status and Factors Affecting Market Development and Trade A Joint Study by IEA Bioenergy Task 40 and Task 37*. 2014. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC91580>
- [52] M. Poeschl, S. Ward, and P. Owende, “Environmental impacts of biogas deployment - Part I: Life Cycle Inventory for evaluation of production process emissions to air,” *J. Clean. Prod.*, vol. 24, pp. 168–183, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.jclepro.2011.10.039.
- [53] D. Thrän, K. Schaubach, S. Majer, and T. Horschig, “Governance of sustainability in the German biogas sector - Adaptive management of the Renewable Energy Act between agriculture and the energy sector,” Jan. 10, 2020, *BioMed Central Ltd.* doi: 10.1186/s13705-019-0227-y.
- [54] H. P. Vu *et al.*, “Hydrogen sulphide management in anaerobic digestion: A critical review on input control, process regulation, and post-treatment,” *Bioresour. Technol.*, vol. 346, p. 126634, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.biortech.2021.126634.
- [55] L. Costa, M. S. Duarte, C. P. Magalhães, M. A. Pereira, and A. J. Cavaleiro, “Micro-aeration for improving anaerobic treatment and biogas production from organic pollutants,” *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 109, no. 1, p. 131, May 2025, doi: 10.1007/s00253-025-13519-w.
- [56] I. Bragança, F. Sánchez-Soberón, G. F. Pantuzza, A. Alves, and N. Ratola, “Impurities in biogas: Analytical strategies, occurrence, effects and removal technologies,” *Biomass Bioenergy*, vol. 143, p. 105878, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105878.
- [57] 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.

- [58] 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.
- [59] European Parliament, “Fact Sheet ‘Renewable Energy,’” Apr. 2025. [Online]. Available: www.europarl.europa.eu/factsheets/en
- [60] European Parliament & Council, “Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast) (RED III). Official Journal of the European Union, L 328, 82-209.,” <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32018L2001>.
- [61] Biomethane Industrial Partnership, “European biomethane price benchmarking report - Insights into the Current Cost of Biomethane Production from Real Industry Data,” https://bip-europe.eu/wp-content/uploads/2023/10/BIP_TF4-study_Full-slidedeck_Oct2023.pdf.
- [62] E. B. A. Guidehouse, “Biogases towards 2040 and beyond,” Mar. 2024. Accessed: Nov. 23, 2025. [Online]. Available: <https://guidehouse.com/-/media/new-library/services/sustainability/documents/2024/biogases-towards-2040-and-beyond.ashx>
- [63] F. S. de Carvalho, L. C. B. dos S. Reis, P. T. Lacava, F. H. M. de Araújo, and J. A. de Carvalho, “Substitution of Natural Gas by Biomethane: Operational Aspects in Industrial Equipment,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 2, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16020839.
- [64] A. Ansone, L. Rozentale, U. Bariss, and D. Blumberga, “Status and Potential Role of Biomethane in the Way Towards Gas Sector Decarbonization: Case study of Latvia,” in *2024 IEEE 65th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2024 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024. doi: 10.1109/RTUCON62997.2024.10830916.
- [65] IEA (International Energy Agency), “Special section: Biogas and biomethane,” <https://www.iea.org/reports/renewables-2023/special-section-biogas-and-biomethane>.
- [66] M. J. B. Kabeyi and O. A. Olanrewaju, “Biogas Production and Applications in the Sustainable Energy Transition,” *Journal of Energy*, vol. 2022, pp. 1–43, Jul. 2022, doi: 10.1155/2022/8750221.
- [67] “Leeuwen metodika ar Meppelas centralizēto siltumapgādi”.
- [68] N. Scarlat, J. F. Dallemand, and F. Fahl, “Biogas: Developments and perspectives in Europe,” Dec. 01, 2018, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.renene.2018.03.006.
- [69] A. Lindfors, L. Hagman, and M. Eklund, “The Nordic biogas model: Conceptualization, societal effects, and policy recommendations,” *City and Environment Interactions*, vol. 15, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.cacint.2022.100083.
- [70] J. M. Ahlström, J. Zetterholm, K. Pettersson, S. Harvey, and E. Wetterlund, “Economic potential for substitution of fossil fuels with liquefied biomethane in Swedish iron and steel industry – Synergy and competition with other sectors,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 209, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112641.
- [71] European Biogas Association, “EBA Statistical Report 2023.,” Brussels, Dec. 2023.
- [72] M. Soares, Z. Genisheva, T. Miranda, E. Pereira, C. Vilarinho, and J. Carvalho, “Agricultural Waste: The Picture of European Union Countries,” *Journal of Sustainability Research*, vol. 7, no. 3, Sep. 2025, doi: 10.20900/jsr20250047.

- [73] D.-G. for E. European Commission, “Circular Economy,” https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy_en#contact.
- [74] 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.
- [75] D.-G. for E. European Commission, “5 things you should know about biogas and biomethane,” https://energy.ec.europa.eu/news/5-things-you-should-know-about-biogas-and-biomethane-2025-10-09_en.
- [76] I. Angelidaki *et al.*, “Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives,” Mar. 01, 2018, *Elsevier Inc.* doi: 10.1016/j.biotechadv.2018.01.011.
- [77] A. Ritala, S. T. Häkkinen, M. Toivari, and M. G. Wiebe, “Single cell protein-state-of-the-art, industrial landscape and patents 2001-2016,” Oct. 13, 2017, *Frontiers Media S.A.* doi: 10.3389/fmicb.2017.02009.
- [78] J. B. García Martínez, J. M. Pearce, J. Throup, J. Cates, M. Lackner, and D. C. Denkenberger, “Methane Single Cell Protein: Potential to Secure a Global Protein Supply Against Catastrophic Food Shocks,” *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 10, Jul. 2022, doi: 10.3389/fbioe.2022.906704.
- [79] F. M. Kerckhof *et al.*, “From Biogas and Hydrogen to Microbial Protein Through Co-Cultivation of Methane and Hydrogen Oxidizing Bacteria,” *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 9, Aug. 2021, doi: 10.3389/fbioe.2021.733753.
- [80] A. Ritala, S. T. Häkkinen, M. Toivari, and M. G. Wiebe, “Single cell protein-state-of-the-art, industrial landscape and patents 2001-2016,” Oct. 13, 2017, *Frontiers Media S.A.* doi: 10.3389/fmicb.2017.02009.
- [81] R. Li *et al.*, “From anaerobic digestion to single cell protein synthesis: A promising route beyond biogas utilization,” *Water Res.*, vol. 243, p. 120417, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.watres.2023.120417.
- [82] European Commission, “Regulation (EC) No 1069/2009 of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 laying down health rules as regards animal by-products and derived products not intended for human consumption and repealing Regulation (EC) No 1774/2002 (Animal by-products Regulation).” Accessed: Dec. 06, 2025. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2009/1069/oj/eng>
- [83] L. Woolley *et al.*, “Gas to protein: Microbial single cell protein is an alternative to fishmeal in aquaculture,” *Science of The Total Environment*, vol. 859, p. 160141, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160141.
- [84] A. J. Pieja, M. C. Morse, and A. J. Cal, “Methane to bioproducts: the future of the bioeconomy?,” *Curr. Opin. Chem. Biol.*, vol. 41, pp. 123–131, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.cbpa.2017.10.024.
- [85] Latvijas Republikas Ministru kabinets, “2025. gada 21. janvāra noteikumi Nr. 50 ‘Noteikumi par prasībām gāzveida stāvoklī pārvērstas sašķidrinātās dabasgāzes, no atjaunīgajiem energoresursiem saražota vai iegūta gāzveida kurināmā un mazoglekļa gāzveida kurināmā ievadīšanai dabasgāzes pārvades un sadales sistēmā’.” Accessed: Dec. 06, 2025. [Online]. Available: <https://likumi.lv/ta/id/358125>

- [86] 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.
- [87] A. Petersson and A. Wellinger, “Biogas upgrading technologies-developments and innovations Task 37-Energy from biogas and landfill gas,” Oct. 2009. Accessed: Dec. 06, 2025. [Online]. Available: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2009/10/upgrading_rz_low_final.pdf
- [88] H. Zhao *et al.*, “Study on the Mechanism of Corrosion in the Gas Injection/Withdrawal Pipeline of Underground Gas Storage,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 33, no. 15, pp. 7864–7877, Aug. 2024, doi: 10.1007/s11665-023-08491-3.
- [89] N. G. Thompson, M. Yunovich, and D. Dunmire, “COST OF CORROSION AND CORROSION MAINTENANCE STRATEGIES,” *Corrosion Reviews*, vol. 25, no. 3–4, pp. 247–262, Aug. 2007, doi: 10.1515/CORRREV.2007.25.3-4.247.
- [90] B. Wei, J. Xu, C. Sun, and Y. F. Cheng, “Internal microbiologically influenced corrosion of natural gas pipelines: A critical review,” *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 102, p. 104581, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.jngse.2022.104581.
- [91] I. Buriánková *et al.*, “Microbial Communities in Underground Gas Reservoirs Offer Promising Biotechnological Potential,” *Fermentation*, vol. 8, no. 6, p. 251, May 2022, doi: 10.3390/fermentation8060251.
- [92] X. Lv *et al.*, “The Microbiologically Influenced Corrosion and Protection of Pipelines: A Detailed Review,” *Materials*, vol. 17, no. 20, p. 4996, Oct. 2024, doi: 10.3390/ma17204996.
- [93] I. Sin, L. De Windt, C. Banc, P. Goblet, and D. Dequidt, “Assessment of the oxygen reactivity in a gas storage facility by multiphase reactive transport modeling of field data for air injection into a sandstone reservoir in the Paris Basin, France,” *Science of The Total Environment*, vol. 869, p. 161657, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.161657.
- [94] R. Hannemanns Allé, “STUDY OF INCREASED FLEXIBILITY AND USE AS STRATEGIC GAS STORAGE SUMMARY.” [Online]. Available: www.ramboll.com/oil-gas
- [95] Marcogaz, “Quality of biomethane required in European countries for injecting into natural gas grid Update,” Brussels, 2024. Accessed: Dec. 06, 2025. [Online]. Available: <https://www.marcogaz.org/wp-content/uploads/2024/03/Quality-of-biomethane.pdf>
- [96] ENTSOG (The European Network of Transmission System Operators for Gas), “GAS QUALITY MONITORING REPORT First Edition,” 2024. Accessed: Dec. 06, 2025. [Online]. Available: https://www.entsog.eu/sites/default/files/2024-12/ENTSOG%20Gas%20Quality%20Monitoring%20Report%20-%20First%20Edition_0.pdf
- [97] 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#
- [98] Gas for Climate and Guidehouse Netherlands B.V., “Manual for National Biomethane Strategies,” 2022. Accessed: Dec. 07, 2025. [Online]. Available:

- https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2023/12/2022-Manual-for-National-Biomethane-Strategies_Gas-for-Climate.pdf
- [99] A. Münther, “Cost-efficient handling of oxygen from bio-methane in the European gas grid,” Aug. 2022. [Online]. Available: www.dgc.dk
- [100] Elering, “Biomethane Aid.” Accessed: Dec. 07, 2025. [Online]. Available: <https://elering.ee/en/biomethane-aid>
- [101] European Commission, “BIOMETHANE FICHE - Estonia,” 2023. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Agri-environmental_indicator_-_mineral_fertiliser_consumption#Analysis_at_country_level
- [102] AS “Conexus Baltic Grid,” “Tiešie pieslēgumi.” Accessed: Jul. 06, 2025. [Online]. Available: <https://conexus.lv/tiesie-pieslegumi>
- [103] Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisija, “Dabaszāzes pārvades sistēmas pieslēguma noteikumi dabaszāzes sadales sistēmas operatoriem, biometāna ražotājiem, sašķidrīnātās dabaszāzes termināļa operatoriem un dabaszāzes lietotājiem.” Accessed: Dec. 07, 2025. [Online]. Available: <https://likumi.lv/ta/id/340173-dabaszazes-parvades-sistemas-piesleguma-noteikumi-dabaszazes-sadales-sistemas-operatoriem-biometana-razotajiem-saskidrinatas-da>
- [104] European Commission, “Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652.”
- [105] 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.
- [106] 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.
- [107] Rīgas Stradiņa Universitāte, “Kvalitatīvā kontentanalīze.” Accessed: Mar. 15, 2026. [Online]. Available: <https://www.rsu.lv/petniecibas-terminu-vardnica/kvalitativa-kontentanalize>
- [108] T. Horschig, P. W. R. Adams, M. Röder, P. Thornley, and D. Thrän, “Reasonable potential for GHG savings by anaerobic biomethane in Germany and UK derived from economic and ecological analyses,” *Appl. Energy*, vol. 184, pp. 840–852, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.07.098.
- [109] P. G. Kougiyas, L. Treu, D. P. Benavente, K. Boe, S. Campanaro, and I. Angelidaki, “Ex-situ biogas upgrading and enhancement in different reactor systems,” *Bioresour. Technol.*, vol. 225, pp. 429–437, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2016.11.124.
- [110] T. Horschig, P. W. R. Adams, M. Röder, P. Thornley, and D. Thrän, “Reasonable potential for GHG savings by anaerobic biomethane in Germany and UK derived from economic and ecological analyses,” *Appl. Energy*, vol. 184, pp. 840–852, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.07.098.

- [111] B. K. Sovacool and P. Lakshmi Ratan, "Conceptualizing the acceptance of wind and solar electricity," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 7, pp. 5268–5279, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.04.048.
- [112] W. M. Budzianowski and D. A. Budzianowska, "Economic analysis of biomethane and bioelectricity generation from biogas using different support schemes and plant configurations," *Energy*, vol. 88, pp. 658–666, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.05.104.
- [113] J. Markard, R. Raven, and B. Truffer, "Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects," *Res. Policy*, vol. 41, no. 6, pp. 955–967, Jul. 2012, doi: 10.1016/j.respol.2012.02.013.
- [114] A. Blumberga *et al.*, *System Dynamics for Environmental Engineering Students*. RTU Izdevniecība, 2011.
- [115] W. J. Forrester, *Industrial Dynamics*. Cambridge: The M.I.T Press, Massachusetts Institute of Technology, 1961.
- [116] I. Passas, "Bibliometric Analysis: The Main Steps," *Encyclopedia*, vol. 4, no. 2, pp. 1014–1025, Jun. 2024, doi: 10.3390/encyclopedia4020065.
- [117] K. Amirbagheri, J. M. Merigó, and A. Corrons, "30 years of Energy for Sustainable Development: A bibliometric overview," *Energy for Sustainable Development*, vol. 87, p. 101741, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.esd.2025.101741.
- [118] 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.
- [119] 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.
- [120] B. Fahimnia, J. Sarkis, and H. Davarzani, "Green supply chain management: A review and bibliometric analysis," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 162, pp. 101–114, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.ijpe.2015.01.003.
- [121] N. Donthu, S. Kumar, and D. Pattnaik, "Forty-five years of Journal of Business Research: A bibliometric analysis," *J. Bus. Res.*, vol. 109, pp. 1–14, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.jbusres.2019.10.039.
- [122] 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.
- [123] European Commission, "Directive 2003/30/EC of the European Parliament and of the Council of 8 May 2003 on the promotion of the use of biofuels or other renewable fuels for transport." Accessed: Dec. 06, 2025. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2003/30/oj/eng>
- [124] European Commission, "Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast) (Text with EEA relevance.)." Accessed: Dec. 06, 2025. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj/eng>
- [125] 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.

- [126] B. K. Sovacool, J. Axsen, and S. Sorrell, “Promoting novelty, rigor, and style in energy social science: Towards codes of practice for appropriate methods and research design,” *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 45, pp. 12–42, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.erss.2018.07.007.
- [127] M. Betancourt Schwarz, M. Veyron, and M. Clause, “Impact of Flexibility Implementation on the Control of a Solar District Heating System,” *Solar*, vol. 4, no. 1, pp. 1–14, Mar. 2024, doi: 10.3390/solar4010001.
- [128] R. W. Puyt, F. B. Lie, and C. P. M. Wilderom, “The origins of SWOT analysis,” *Long Range Plann.*, vol. 56, no. 3, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.lrp.2023.102304.
- [129] J. Wu, N. Zhao, and T. Yang, “Wisdom of crowds: SWOT analysis based on hybrid text mining methods using online reviews,” *J. Bus. Res.*, vol. 171, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.jbusres.2023.114378.
- [130] Y. Xi, Z. Zhang, and J. Zhang, “Multi-objective optimization strategy for regional multi-energy systems integrated with medium-high temperature solar thermal technology,” *Energy*, vol. 300, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.131545.
- [131] W. Chen, H. Ren, and W. Zhou, “Review of multi-objective optimization in long-term energy system models,” *Global Energy Interconnection*, vol. 6, no. 5, pp. 645–660, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.gloi.2023.10.010.
- [132] J. M. Egieya, L. Čuček, K. Zirngast, A. J. Isafiade, and Z. Kravanja, “Optimization of biogas supply networks considering multiple objectives and auction trading prices of electricity,” *BMC Chemical Engineering*, vol. 2, no. 1, Dec. 2020, doi: 10.1186/s42480-019-0025-5.
- [133] M. Friebe, A. Karasu, and M. Kriegel, “Methodology to compare and optimize district heating and decentralized heat supply for energy transformation on a municipality level,” *Energy*, vol. 282, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.128987.
- [134] T. J. Lindroos, E. Mäki, K. Koponen, I. Hannula, J. Kiviluoma, and J. Raitila, “Replacing fossil fuels with bioenergy in district heating – Comparison of technology options,” *Energy*, vol. 231, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120799.
- [135] R. P. van Leeuwen, J. Fink, J. B. de Wit, and G. J. M. Smit, “Upscaling a district heating system based on biogas cogeneration and heat pumps,” *Energy Sustain. Soc.*, vol. 5, no. 1, Dec. 2015, doi: 10.1186/s13705-015-0044-x.
- [136] D. Devaraj, E. Syron, and P. Donnellan, “Diversification of gas sources to improve security of supply using an integrated Multiple Criteria Decision Making approach,” *Cleaner and Responsible Consumption*, vol. 3, p. 100042, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.clrc.2021.100042.
- [137] J. H. Peterseim, S. White, A. Tadros, and U. Hellwig, “Concentrated solar power hybrid plants, which technologies are best suited for hybridisation?,” *Renew. Energy*, vol. 57, pp. 520–532, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.renene.2013.02.014.
- [138] A. Shekhovtsov and W. Sałabun, “A comparative case study of the VIKOR and TOPSIS rankings similarity,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 176, pp. 3730–3740, 2020, doi: 10.1016/j.procs.2020.09.014.
- [139] A. Kumar *et al.*, “A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 596–609, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.191.
- [140] 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.
- [141] 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.
- [142] 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.
- [143] 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.
- [144] 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.
- [145] 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.
- [146] 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.
- [147] 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.
- [148] U. O. Aigbe, K. E. Ukhurebor, A. O. Osibote, M. A. Hassaan, and A. El Nembr, “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.
- [149] 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.
- [150] D. Blumberga, *Energoefektivitāte*, vol. 1996. Rīga: Apgāds “Pētergailis.”
- [151] D. W. . Pearce, Giles. Atkinson, and Susana. Mourato, *Cost-benefit analysis and the environment: recent developments*. Organisation for Economic Co-operation and Development, 2006.
- [152] G. Atkinson, A. Braathen, B. Groom, and S. Mourato, “Cost-Benefit Analysis and the Environment Further Developments and policy use,” Paris, 2018. Accessed: Nov. 18, 2025. [Online]. Available: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2018/06/cost-benefit-analysis-and-the-environment_g1g8b70e/9789264085169-en.pdf.
- [153] M. Bruno, M. Marchi, N. Ermini, V. Niccolucci, and F. M. Pulselli, “Life Cycle Assessment and Cost–Benefit Analysis as Combined Economic–Environmental Assessment Tools: Application to an Anaerobic Digestion Plant,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 9, May 2023, doi: 10.3390/en16093686.

- [154] J. Ammenberg *et al.*, “Identification and assessment of sustainability effects associated with biogas solutions-Literature review and perspectives from five countries Edited by Identification and assessment of sustainability effects related to biogas solutions-Literature review and perspectives from five countries,” 2024.
- [155] N. Simister, D. James, and V. Scholz, “Cost-Benefit analysis - Intrac for civil society,” 2017. Accessed: Jul. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.intrac.org/app/uploads/2017/01/Cost-benefit-analysis.pdf>
- [156] B. Dàmir Belltheus Avdic *et al.*, “Baltic InteGrid review: towards a meshed offshore grid in the Baltic Sea,” 2019. Accessed: Aug. 01, 2025. [Online]. Available: <https://bogf.eu/wp-content/uploads/transfer/190218-big-bog-xl-digital.pdf>
- [157] G. de Rus, *Introduction to Cost–Benefit Analysis*. Edward Elgar Publishing, 2010. doi: 10.4337/9781849804547.
- [158] L. Rozentale and D. Blumberga, “Cost-Benefit and Multi-Criteria Analysis of Wind Energy Parks Development Potential in Latvia,” *Environmental and Climate Technologies*, vol. 25, no. 1, pp. 1229–1240, Jan. 2021, doi: 10.2478/rtuct-2021-0093.
- [159] N. Mouter, “Cost-Benefit Analysis in Practice individuals in the Dutch CBA practice for spatial-infrastructure projects,” Jun. 2014.
- [160] TRADING ECONOMICS, “EU Carbon Permits,” EU Carbon Permits. Accessed: Dec. 05, 2025. [Online]. Available: <https://tradingeconomics.com/commodity/carbon>
- [161] European Commission, “EU Emissions Trading System (EU ETS).” Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-markets/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en
- [162] N. Scarlat, J.-F. Dallemand, and F. Fahl, “Biogas: Developments and perspectives in Europe,” *Renew. Energy*, vol. 129, pp. 457–472, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.03.006.
- [163] A. Ansonē, L. Rozentale, M. Pelss, C. Rochas, and D. Blumberga, “Gaseous bioresources towards climate neutrality: Case study of Latvia,” *Renew. Energy*, no. submitted for publication, 2025.
- [164] M. Treimane, A. Ansonē, and L. Rozentāle, “Sustainable biomethane integration into Latvia’s natural gas network,” *Environmental and Climate Technologies*, Environmental and Climate Technologies, vol. 30, no. 1, pp. 89–101, Jan. 2026, doi: 10.2478/rtuct-2026-0007.
- [165] IEA (International Energy Agency), “Outlook for biogas and Prospects for organic growth World Energy Outlook Special Report - Biomethane,” 2020. Accessed: Dec. 05, 2025. [Online]. Available: https://iea.blob.core.windows.net/assets/03aeb10c-c38c-4d10-bccc-de92e9ab815f/Outlook_for_biogas_and_biomethane.pdf
- [166] BiogasWorld, “10 tips to reduce the costs of your biogas / RNG plant and increase its profitability: BiogasWorld,” Oct. 2019. Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://biogasworld.com/news/reduce-the-costs-of-biogas-plant/>
- [167] United States Environmental Protection Agency, “Switch to Renewable Natural Gas.” Accessed: Apr. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/lmop/switch-renewable-natural-gas>
- [168] G. Ahamer, “Cost of energy infrastructure in Europe and Austria: electricity, gas, oil, and heat,” 2021.

- [169] C. E. Smith, “Land pipeline construction costs hit record 10.7 million per mile,” Land pipeline construction costs hit record \$10.7 million/mile. Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.ogj.com/pipelines-transportation/pipelines/article/14299952/land-pipeline-construction-costs-hit-record-107-million-mile>
- [170] Bright Renewables, “Biogāzes modernizācija.” Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.bright-renewables.com/lv/risin%C4%81jumi/atjaunojam%C4%81s-g%C4%81zes-sist%C4%93mas/biog%C4%81zes-moderniz%C4%81cija/>
- [171] P. Sulewski, W. Ignaciuk, M. Szymańska, and A. Waś, “Development of the Biomethane Market in Europe,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 4, p. 2001, Feb. 2023, doi: 10.3390/en16042001.
- [172] D. Blumberga *et al.*, *Biogāze : rokasgrāmata*. Ekodoma, 2009. Accessed: Dec. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.lemvigbiogas.com/BiogasHandbookLatvia.pdf>
- [173] K. Krich, D. Augenstein, J. P. Batmale, J. Benemann, B. Rutledge, and D. Salour, “Biomethane from Dairy Waste A Sourcebook for the Production and Use of Renewable Natural Gas in California,” Jul. 2005. Accessed: Dec. 05, 2025. [Online]. Available: <https://afdc.energy.gov/publications?keyword=biomethane>
- [174] I. Dzene, “Biomētāna izmantošanas koncepcija Valmieras pilsētai,” Rīga, Apr. 2014. Accessed: Dec. 05, 2025. [Online]. Available: https://www.urbanbiogas.eu/images/pdf/FR/ANNEX_FR_42_D5_2_EKODOMA_LV_Biomethane_use_concept.pdf
- [175] European Biogas Association and G. O. Owusu, “From plant to grid: navigating biomethane injection.” Accessed: Dec. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.europeanbiogas.eu/news/from-plant-to-grid-navigating-biomethane-injection/>
- [176] IEA (International Energy Agency), “World Energy Outlook Special Report Outlook for Biogas and Biomethane A global geospatial assessment,” May 2025. Accessed: Dec. 05, 2025. [Online]. Available: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4702383d-0d3d-4b81-9cbe-a1e368598b2e/OutlookforBiogasandBiomethane.pdf>
- [177] T. Rawa and N. Townsend, “Volvo Trucks Magazine Online.” Accessed: Dec. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.volvotrucks.in/en-in/news/magazine-online/2016/nov/jastim.html>
- [178] IEA (International Energy Agency), “Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth – Analysis.” Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth/an-introduction-to-biogas-and-biomethane>.
- [179] “Optimization Model,” <https://www.sciencedirect.com/topics/social-sciences/optimization-model>. Accessed: Dec. 08, 2025. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/social-sciences/optimization-model>.
- [180] “Mathematical Programming: An Overview.” Accessed: Nov. 18, 2025. [Online]. Available: <https://web.mit.edu/15.053/www/AMP-Chapter-01.pdf>
- [181] P. Kumari, “Quantitative Techniques for Managers,” 2021. Accessed: Nov. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.bbau.ac.in/dept/UIET/EMER-601%20Operation%20Research%20Queuing%20theory.pdf>

- [182] S. Sarfarazi, S. Sasanpour, and K. K. Cao, "Improving energy system design with optimization models by quantifying the economic granularity gap: The case of prosumer self-consumption in Germany," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 1859–1874, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.egy.2022.12.145.
- [183] T. Weidner, Á. Galán-Martín, M. W. Ryberg, and G. Guillén-Gosálbez, "Energy systems modeling and optimization for absolute environmental sustainability: current landscape and opportunities," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 164, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.compchemeng.2022.107883.
- [184] L. Kotzur *et al.*, "A modeler's guide to handle complexity in energy systems optimization," *Advances in Applied Energy*, vol. 4, Nov. 2021, Accessed: Nov. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266679242100055X>
- [185] R. Khezri and A. Mahmoudi, "Review on the state-of-the-art multi-objective optimisation of hybrid standalone/gridconnected energy systems," Oct. 16, 2020, *Institution of Engineering and Technology*. doi: 10.1049/iet-gtd.2020.0453.
- [186] S. Yu, L. You, and S. Zhou, "A review of optimization modeling and solution methods in renewable energy systems," Dec. 01, 2023, *Higher Education Press Limited Company*. doi: 10.1007/s42524-023-0271-3.
- [187] W. Chen, H. Ren, and W. Zhou, "Review of multi-objective optimization in long-term energy system models," *Global Energy Interconnection*, vol. 6, no. 5, pp. 645–660, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.gloi.2023.10.010.
- [188] M. Tangi and A. Amaranto, "Advancements in Multi-Objective Optimization for Planning and Management of Multi-Energy Systems," *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, vol. 13, no. 2, Jun. 2025, doi: 10.13044/j.sdewes.d13.0584.
- [189] G. Mancò, U. Tesio, E. Guelpa, and V. Verda, "A review on multi energy systems modelling and optimization," Jan. 15, 2024, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121871.
- [190] P. Bennett, A. Rossi, and P. B. Chair, "IEA Bioenergy Annual report 2022." Accessed: Nov. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2023/05/Annual-Report-2022.pdf>.
- [191] L. Ahmed and N. Sassersson Busadee, "TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF RENEWABLE GAS PRODUCTION AND ELECTRICITY GENERATION FROM ORGANIC WASTE A Feasibility Study of a Conceptual Biogas Plant in the Santander Region, Colombia."
- [192] M. B. Brands, P. Beuel, F. Torres-Rivera, R. Beckmüller, M. S. Ayoub, and P. Stenzel, "Optimization of biomethane production from purified biowaste pyrolysis gas: A comparative techno-economic assessment," *Renew. Energy*, vol. 245, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.renene.2025.122865.
- [193] S. C. C. Flores, C. Azzaro-Pantel, and F. N. Rivera, "A Techno-Economic Optimization Approach to an Integrated Biomethane and Hydrogen Supply Chain," in *Proceedings of the 35th European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE 35)*, PSE Press, Jul. 2025, pp. 2069–2074. doi: 10.69997/sct.153510.

- [194] D. Agrawal and S. A. Singh, “Techno-Economic Analysis of Biogas Upgrading via CO₂ Methanation for Sustainable Biomethane Production,” *ChemEngineering*, vol. 9, no. 5, Oct. 2025, doi: 10.3390/chemengineering9050114.
- [195] I. Angelidaki *et al.*, “Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives,” Mar. 01, 2018, *Elsevier Inc.* doi: 10.1016/j.biotechadv.2018.01.011.
- [196] “Market Observatory for Energy DG Energy Quarterly report on European gas markets With focus on annual overview for 2024.”
- [197] S. Kühner, “Feedstock costs - Biomass based energy intermediates boosting biofuel production,” 2013. [Online]. Available: www.BioBoost.eu
- [198] T. Karras and D. Thrän, “The Costs of Straw in Germany: Development of Regional Straw Supply Costs between 2010 and 2020,” *Waste Biomass Valorization*, vol. 15, no. 9, pp. 5369–5385, Sep. 2024, doi: 10.1007/s12649-024-02528-x.
- [199] Y. Melekh, J. Dixon, K. Salmon, and M. Grubb, “European Natural Gas through the 2020s: the Decade of Extremes, Contradictions and Continuing Uncertainties,” New York, NY, May 2025. doi: 10.36687/inetwp233.
- [200] D. Christianides *et al.*, “Biogenic CO₂ Emissions in the EU Biofuel and Bioenergy Sector: Mapping Sources, Regional Trends, and Pathways for Capture and Utilisation,” *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 6, Mar. 2025, doi: 10.3390/en18061345.
- [201] M. Hawrot-Paw and J. Tapczewski, “Waste to Energy: Anaerobic Co-Digestion of Microalgal Biomass and Bakery Waste,” *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 20, Oct. 2025, doi: 10.3390/en18205516.
- [202] M. Pirouti, A. Bagdanavicius, J. Ekanayake, J. Wu, and N. Jenkins, “Energy consumption and economic analyses of a district heating network,” *Energy*, vol. 57, pp. 149–159, Aug. 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.01.065.
- [203] T. Fang and R. Lahdelma, “Genetic optimization of multi-plant heat production in district heating networks,” *Appl. Energy*, vol. 159, pp. 610–619, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.09.027.
- [204] B. Morvaj, R. Evins, and J. Carmeliet, “Optimising urban energy systems: Simultaneous system sizing, operation and district heating network layout,” *Energy*, vol. 116, pp. 619–636, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.09.139.
- [205] M. Vesterlund, A. Toffolo, and J. Dahl, “Optimization of multi-source complex district heating network, a case study,” *Energy*, vol. 126, pp. 53–63, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.03.018.
- [206] A. Kuriqi, A. N. Pinheiro, A. Sordo-Ward, and L. Garrote, “Flow regime aspects in determining environmental flows and maximising energy production at run-of-river hydropower plants,” *Appl. Energy*, vol. 256, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113980.
- [207] T. Novosel, F. Feijoo, N. Duić, and J. Domac, “Impact of district heating and cooling on the potential for the integration of variable renewable energy sources in mild and Mediterranean climates,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 272, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.116374.
- [208] F. Sun, J. Li, L. Fu, Y. Li, R. Wang, and S. Zhang, “New configurations of district heating and cooling system based on absorption and compression chillers driven by waste heat of flue gas from coke ovens,” *Energy*, vol. 193, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2019.116707.

- [209] Y. Wang, S. Zhang, D. Chow, and J. M. Kuckelkorn, "Evaluation and optimization of district energy network performance: Present and future," Apr. 01, 2021, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2020.110577.
- [210] S. Buffa, M. Cozzini, M. D'Antoni, M. Baratieri, and R. Fedrizzi, "5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe," Apr. 01, 2019, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2018.12.059.
- [211] H. Lund, N. Duic, P. A. Østergaard, and B. V. Mathiesen, "Future district heating systems and technologies: On the role of smart energy systems and 4th generation district heating," *Energy*, vol. 165, pp. 614–619, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.09.115.
- [212] S. Boesten, W. Ivens, S. C. Dekker, and H. Eijndems, "5th generation district heating and cooling systems as a solution for renewable urban thermal energy supply," *Advances in Geosciences*, vol. 49, pp. 129–136, Sep. 2019, doi: 10.5194/adgeo-49-129-2019.
- [213] D. Menegazzo, G. Lombardo, S. Bobbo, M. De Carli, and L. Fedele, "State of the Art, Perspective and Obstacles of Ground-Source Heat Pump Technology in the European Building Sector: A Review," Apr. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/en15072685.
- [214] F. Büning, M. Wetter, M. Fuchs, and D. Müller, "Bidirectional low temperature district energy systems with agent-based control: Performance comparison and operation optimization," *Appl. Energy*, pp. 502–515, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.10.072.
- [215] H. Averfalk, P. Ingvarsson, U. Persson, M. Gong, and S. Werner, "Large heat pumps in Swedish district heating systems," 2017, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2017.05.135.
- [216] A. Ansoni, L. Rozentale, and D. Blumberga, "Decision-Support Analysis of Biomethane Infrastructure Options Using the TOPSIS Method," *Manuscript submitted for publication*, 2025.
- [217] E. Chomać-Pierzecka, B. Błaszczak, S. Godawa, and I. Kęsy, "Human Safety in Light of the Economic, Social and Environmental Aspects of Sustainable Development—Determination of the Awareness of the Young Generation in Poland," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 17, no. 13, Jul. 2025, doi: 10.3390/su17136190.
- [218] H. Hegazy, N. M. C. Saady, and S. Zendehboudi, "Safety in biogas plants: An analysis based on international standards and best practices," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 200, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.psep.2025.107390.
- [219] R. A. Estévez, V. Espinoza, R. D. Ponce Oliva, F. Vásquez-Lavín, and S. Gelcich, "Multi-criteria decision analysis for renewable energies: Research trends, gaps and the challenge of improving participation," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 6, Mar. 2021, doi: 10.3390/su13063515.
- [220] S. D. Pohekar and M. Ramachandran, "Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning - A review," Aug. 2004. doi: 10.1016/j.rser.2003.12.007.
- [221] T. Llano, E. Dosal, J. Lindorfer, and D. C. Finger, "Application of multi-criteria decision-making tools for assessing biogas plants: A case study in Reykjavik, Iceland," *Water (Switzerland)*, vol. 13, no. 16, Aug. 2021, doi: 10.3390/w13162150.
- [222] 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.



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.