

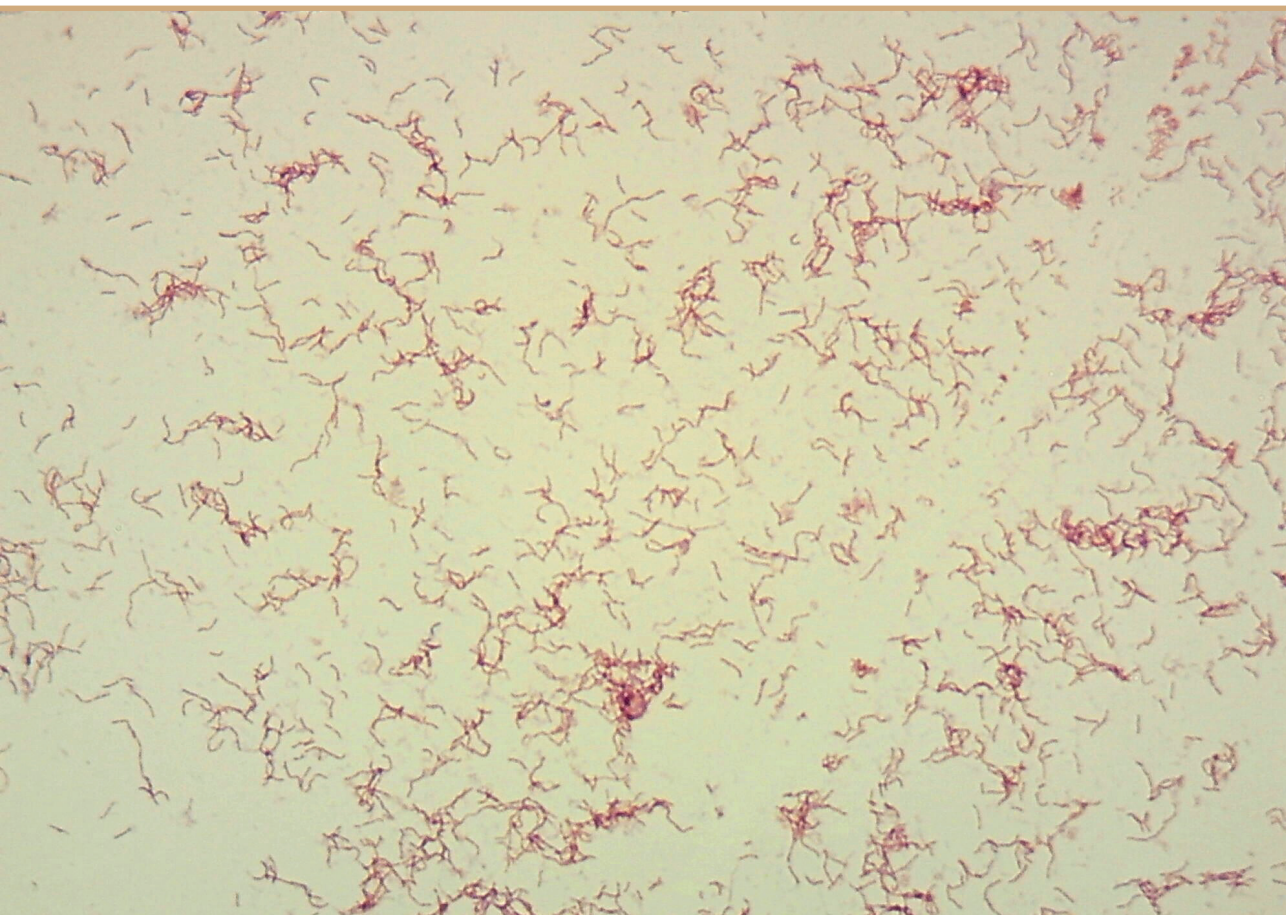


RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Zane Kušnere

NO ATKRITUMIEM VEIDOTU FILTRMATERIĀLU IZMANTOŠANA BIOMETANIZĀCIJĀ

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultāte

Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Zane Kušnere

Doktora studiju programmas “Vides inženierija” doktorante

NO ATKRITUMIEM VEIDOTU FILTRMATERIĀLU IZMANTOŠANA BIOMETANIZĀCIJĀ

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji
asociētā profesore *Dr. sc. ing.*
DACE LAUKA

Ph. D.
KRIŠS SPALVIŅŠ

Kušnere, Z. No atkritumiem veidotu filtrmateriālu izmantošana biometanizācijā. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2024. 42 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-19” 2024. gada 26. jūnija lēmumu, protokols Nr. 205.

Promocijas darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda projekta Nr. 8.8.8.0./20/I/008 “Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšanas stratēģiskās specializācijas jomās” atbalstu.

Vāka attēla autore Zane Kušnere

<https://doi.org/10.7250/9789934371165>

ISBN 978-9934-37-116-5 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2024. gada 31. oktobrī plkst. 14 Rīgas Tehniskās universitātes Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultāte fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 607. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Ainis Lagzdiņš,
Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte, Latvija

Vadošā pētniece *Ph. D.* Ilze Dzene,
Kaseles Universitāte, Vācija

Profesors *Dr. sc. (Tech.)* Timo Laukkanen,
Ålto Universitāte, Somija

APSTIPRINĀJUMS

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

Zane Kušnere (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 40 attēli, 10 tabulas, četri pielikumi, kopā 111 lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 145 nosaukumi.

SATURS

IEVADS	5
Aktualitāte	5
Darba mērķis un uzdevumi	6
Hipotēze	7
Darba zinātniskā novitāte	7
Darba praktiskā nozīme	7
Darba aprobācija	8
Promocijas darba rezultāti prezentēti zinātniskajās konferencēs	8
Promocijas darba rezultāti atspoguļoti zinātniskajās publikācijās	8
Citas zinātniskās publikācijas	9
Darba struktūra un apraksts	9
1. IZMANTOTĀ METODIKA	11
Pelnu paraugu ķīmisko elementu analīze	11
Pelnu kušanas temperatūras testi	11
Koksnes pelnu materiāla ražošanas eksperimenti	11
Filtrmateriālu izvēle biometanizācijas eksperimentiem	12
Filtrmateriālu īpašību noteikšana	13
Biometanizācijas eksperimenti	15
Anaerobās barotnes mikroorganismiem	16
Bmp tests	17
Manometriskais tests	18
Matemātiskā modelēšana - teorētiska metāna noteikšana	19
CH ₄ mērījumi ar gāzu hromatogrāfiju	21
Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīze	21
Kritēriju sviri	22
TOPSIS	23
Jutīguma analīze	24
2. REZULTĀTI UN DISKUSIJA	25
Pelnu filtrmateriāla sagatavošana	25
Fizikālķīmiskais filtrmateriālu raksturojums	25
Biometanizācijas testa rezultāti	27
Biometāna potenciāls	27
Maksimālais saražotā metāna īpatnējais tilpums dažādiem filtrmateriāliem manometriskajā testā	29
Biometanizācija paaugstinātā pH vidē ar monokultūrām un biogāzes digestātu	31
Biogāzes digestāts	32
<i>Methanobacterium alcaliphilum</i> celmi	33
Rezultātu validācija	34
Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīzes rezultāti	37
Kritēriju sviri	37
TOPSIS rezultāti	38
Kritēriju jutīguma analīze	39
3. SECINĀJUMI	41

IEVADS

Aktualitāte

Enerģētiskā autonomija pēdējā laikā ir kļuvusi par vienu no Eiropas Savienības svarīgākajiem stratēģiskajiem mērķiem. Lai līdz 2050. gadam panāktu klimatneitralitāti, Eiropas Komisijas *REPowerEU* plāna mērķis ir paātrināt atjaunojamo enerģijas avotu ieviešanu Eiropas Savienībā. Šai iniciatīvai ir potenciāls ietekmēt biogāzes nozari. Tās mērķis ir paplašināt ES emisijas kvotu tirdzniecības sistēmu, nosakot minimālo oglekļa cenu un samazinot bezmaksas kvotu skaitu. Šo politikas izmaiņu rezultātā biogāzes nozare varētu gūt ievērojamu labumu, jo tā kļūs pievilcīgāka un konkurētspējīgāka, spējot apmierināt ES enerģijas vajadzības tūrākā un ilgtspējīgākā veidā.

Veicot anaerobo fermentāciju, organiskie atkritumi un biomasas tiek pārvērsti biogāzē – ilgtspējīgā enerģijas avotā. Bioproduktiem ir izšķiroša nozīme aprites ekonomikas veicināšanā, jo tie efektīvi pārveido organiskos atkritumus videi draudzīgā un atjaunojamā enerģijā, tādējādi līdz minimumam samazinot atkritumu daudzumu, kas nonāk atkritumu poligonos. Turklāt biogāzes izmantošana var sekmēt arī darbavietu radīšanu un veicināt ekonomisko attīstību lauku apvidos, kuros ir pietiekami daudz organisko atkritumu un biomasas resursu. Biogāzes izmantošana var veicināt arī Eiropas Savienības enerģijas avotu dažādošanu un mazināt atkarību no importētā fosilā kurināmā, tādējādi uzlabojot energoapgādes drošību un stabilitāti. Tādējādi pastāvīga biogāzes nozares izaugsme Eiropas Savienībā ir būtiska, lai sasniegtu klimata neitralitātes mērķus, veicinātu ilgtspējīgu attīstību un garantētu videi draudzīgāku nākotni nākamajām paaudzēm. *RePowerEU* plānā ierosinātie emisiju tirdzniecības sistēmas grozījumi, piemēram, minimālās oglekļa cenas ieviešana, var ievērojami veicināt biogāzes nozares izaugsmi, padarot uzlabotu biogāzi par vēl pievilcīgāku un ekonomiski izdevīgāku alternatīvu tradicionālajiem fosilajiem enerģijas avotiem.

Efektīva metode, kā uzlabot biogāzes pārstrādes ražotņu ekonomisko lietderību, ir uzlabot biogāzes kvalitāti, lai tā atbilstu standartiem, kas nepieciešami tās ievadīšanai dabasgāzes tīklā. Šo uzlaboto biogāzi pēc tam var izmantot kā transportlīdzekļu degvielu vai kā izejvielu rūpnieciskiem mērķiem. Biogāzes uzlabošana ir oglekļa dioksīda likvidēšanas un gāzes enerģētiskā saturs palielināšanas process.

Vēsturiski biogāzes kvalitātes uzlabošanai parasti izmantoja fizikāli ķīmiskas metodes, kas prasa ievērojamu enerģijas daudzumu un rada lielus izdevumus. Tāpēc biotehnoloģijās balstītu uzlabošanas metožu izmantošana piedāvā iespēju ievērojami samazināt gan enerģijas patēriņu, gan izmaksas, kas saistītas ar biogāzes uzlabošanu. Par daudzsološu biogāzes uzlabošanas metodi plaši atzīta apsmidzināmo biofiltra reaktoru izmantošana biometanizācijai. Filtrmateriāls šajos reaktoros ir izšķirošs, lai radītu piemērotu vidi mikroorganismu vairošanās un augšanas procesam, tādējādi maksimāli palielinot metanoģenēzes efektivitāti. Ir pētīti dažādu sastāvu un paaudžu materiāli, lai uzlabotu biometanizācijas efektivitāti, taču nepieciešami izdevīgāki un efektīvāki risinājumi. Izmantojot ilgtspējīgus materiālus šai tehnoloģijai, ir iespējams palielināt metanoģenēzes efektivitāti, vienlaikus mazinot ietekmi uz

vidi. Paredzams, ka, turpinot pētniecību un izstrādi, drīzumā būs pieejamas ekonomiskākas un videi draudzīgākas filtrmateriālu alternatīvas.

Viena no alternatīvām iespējām ietver atkritumu izmantošanu, lai izveidotu filtrēšanas materiālus. Ņemot vērā ievērojamo cieta atkritumu uzkrāšanos un dabas resursu izsīkšanu, rūpniecisko blakusproduktu un atkritumu otrreizēja pārstrāde ir kļuvusi par būtisku atkritumu apsaimniekošanas elementu nākotnē. Pasaulē 2018. gadā saražotais stikla atkritumu daudzums sasniedza aptuveni 130 miljonus tonnu, un 80 % no šī daudzuma nonāk atkritumu poligonos.

Atkritumu poligonos tiek noglabāta arī ievērojama daļa koksnes pelnu atkritumu. Lai palielinātu šo atkritumu materiālu atkārtotas ekonomiskas iekļaušanas iespējas aprītē, ir svarīgi pēc iespējas vairāk izpētīt to pārstrādes un izmantošanas iespējas. Iesaistīšanās atkritumu pārstrādē un atkārtotā izmantošanā veicina aprites ekonomikas izveidi, ko raksturo materiālu un resursu efektīva izmantošana un atkritumu samazināšana līdz minimumam. Šis ir viens no Eiropas Zaļā kursa pamataspektiem, un tam ir būtiska nozīme ilgtspējīgākas sabiedrības veicināšanā, mazinot ietekmi uz vidi un optimizējot resursu izmantošanu.

Pētījumi ar filtrmateriāliem, kas izgatavoti no pelnu un stikla atkritumiem, ļauj apzināt jaunus atkritumu izmantošanas veidus un palīdz noteikt precīzas īpašības, kas nepieciešamas, lai šos materiālus varētu efektīvi izmantot biometanizācijas procesos. Pētnieki var noteikt vispiemērotākos filtrēšanas materiālus biometanizācijai, veicot eksperimentus, lai atklātu iespējas, kurām ir efektīvākai izmantošanai nepieciešamās īpašības. Šie pētījumi ne tikai palīdz atkritumu apsaimniekošanā, bet arī veicina ilgtspējīgu un efektīvu enerģijas ražošanas tehnoloģiju attīstību, kā arī nodrošina zināšanu un pieredzes nodošanu, veicinot tehnisko progresu un uzņēmumu paplašināšanos.

Darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir pārbaudīt no stikla atkritumiem un koksnes pelnu atkritumiem pagatavotu materiālu piemērotību biometanizācijas veikšanai pilienvēda reaktoros, veicot eksperimentālo izpēti un datu analīzi.

Mērķa sasniegšanai bija jāīsteno vairāki uzdevumi.

1. Izpētīt un noteikt svarīgākos parametrus, kas nosaka filtrmateriāla piemērotību biometānu ģenerējošo baktēriju imobilizēšanai.
2. Izstrādāt koksnes pelnu filtrmateriālu, testēt un raksturot to kopā ar putu stiklu materiālu un citiem industrijā izmantojamiem filtrmateriāliem.
3. Eksperimentāli novērtēt filtrmateriālu piemērotību *ex situ* biometanizācijai.
4. Veikt stehiometriskos aprēķinus, lai novērtētu teorētisko biometāna iznākumu.
5. Validēt eksperimentā iegūtos rezultātus, salīdzinot tos ar gāzu analīžu rezultātiem.
6. Izpētīt mikroorganismu lomu biometanizācijas efektivitātē, izmantojot konkrētos filtrmateriālus.
7. Veikt daudzkritēriju analīzi, lai izvēlētos ilgtspējīgākos filtrmateriālus biometanizācijai, ņemot vērā gan vides, gan ekonomiskos aspektus.

Hipotēze

No stikla atkritumiem un koksnes pelnu atkritumiem pagatavoti filtrmateriāli ir piemēroti biometanizācijas veikšanai apsmidzināmo biofiltru reaktoros, un to izmantošana var nodrošināt efektīvu biometāna ražošanu, kas ir salīdzināma vai ir labāka par tradicionāli izmantotajiem filtrmateriāliem.

Darba zinātniskā novitāte

Apsmidzināmo biofiltru reaktoru tehnoloģiskās sistēmas kā perspektīvas bioloģiskās biogāzes uzlabošanas mūsdienās tiek intensīvi pētītas, lai noteiktu optimālākos parametrus efektīvai biometanācijai. Viens no būtiskākajiem parametriem, kas ietekmē sistēmas efektivitāti, ir katalizatoru atbalstam izmantotais filtrmateriāls. Lai gan ir pētīti dažādi organiski un neorganiski materiāli, literatūrā nav informācijas par pelnu agregātu izmantošanu pilienvēda bioreaktoros. Šajā pētījumā pirmo reizi tiek apskatīts pelnu filtrmateriālu un putu stikla materiāla izmantošanas potenciāls apsmidzināmo biofiltru reaktoros.

- Pētījumā iegūtie rezultāti varētu paplašināt zināšanas par biometanācijas procesiem un veicināt turpmākus pētījumus šajā jomā, kas savukārt varētu radīt jaunas inovācijas un uzlabojumus biogāzes ražošanas tehnoloģijās.
- Tiek testēti un raksturoti jauni ilgtspējīgi filtrmateriāli, kas pagatavoti no stikla un koksnes pelnu atkritumiem.
- Putu stikla un pelnu filtrmateriāla izmantošanas potenciāls apsmidzināmajiem bioreaktoriem.
- *Methanobacterium alcaliphilum* mikroorganismu lomas izpēte biometanizācijas efektivitātē.
- Izstrādāta daudzkritēriju analīzes metodoloģija, lai izvēlētos ilgtspējīgākos filtrmateriālus biometanācijai.

Darba praktiskā nozīme

- Izstrādāti un raksturoti jauni filtrmateriāli no industriāliem atkritumiem, kas veicina resursu atkārtotu izmantošanu un atkritumu samazināšanu.
- Uzlaboto biogāzi ar augstu metāna saturu var tieši pievienot dabasgāzes tīklam, veicinot enerģētisko neatkarību un atjaunojamo enerģijas avotu izmantošanu.
- Pētītā tehnoloģija piedāvā alternatīvu tradicionālajām biogāzes uzlabošanas metodēm, izmantojot bioloģisko metanizāciju.
- Pētījumā iegūtie rezultāti veicina jaunas inovācijas un uzlabojumus biogāzes ražošanas tehnoloģijās.

Promocijas darbā veiktie pētījumi sniedz ne tikai datus, bet arī jaunas atziņas, kā arī nodrošina zināšanu un pieredzes nodošanu, veicinot tehnisko progresu un uzņēmumu paplašināšanos.

Darba aprobācija

Zinātniskās konferences, kurās prezentēti promocijas darba rezultāti

1. Kusnere, Z., Spalvins, K., Blumberga, D., Veidenbergs I., Biogas upgrading by biomethanation - review of various packing materials for biotrickling filters: The conference of Biosystems Engineering, **BSE 2021**, May 5–7, Tartu, Estonia (participated Online with poster presentation).
2. Kusnere, Z., Spalvins, K., Testing new packing materials for trickling biofilters used for biomethanation: The conference of Environmental and Climate Technologies, **CONNECT 2021**, May 12–14, Riga, Latvia (participated Online with poster presentation).
3. Kusnere, Z., Spalvins, K., Bataitis M., Wood ash filter material characterization as a carrier material for ex-situ biomethanation of biogas in biotrickling filter reactors. **CONNECT 2022**, May 11–13, Latvia (poster presentation).
4. Kusnere, Z., Rupeika, D., Spalvins, K., Turning Trash into Treasure: The use of Vulcanized Ash Filters for Renewable Energy. The conference of Environmental and Climate Technologies, **CONNECT 2023**, May 10–12 (oral presentation).
5. Kusnere, Z., Lauka, D., Spalvins, K., Multi criteria Analysis of Wood Waste Ash and Glass Foam: Toward Sustainable Material Selection for Biomethanation. The conference of Biosystems Engineering, **BSE 2024**, May 8–10, Tartu, Estonia (poster presentation).
6. Kusnere, Z., Laipniece, L., Lauka, D., Spalvins, K., pH-Optimized Biomethane Production: Evaluating Carrier Materials, The conference of Environmental and Climate Technologies, **CONNECT 2024**, May 15–17, Riga Latvia (poster presentation).

Zinātniskās publikācijas, kurās atspoguļoti promocijas darba rezultāti

1. Kusnere, Z., Spalvins, K., Blumberga, D., Veidenbergs I., Packing materials for biotrickling filters used in biogas upgrading – biomethanation. *Agronomy Research*, 19 (S1), 819–833, 2021, <https://doi.org/10.15159/AR.21.082>.
2. Kusnere, Z., Spalvins, K., Bataitis M., Wood Ash Filter Material Characterization as a Carrier Material for Ex-Situ Biomethanation of Biogas in Biotrickling Filter Reactors., *Environmental and Climate Technologies* 27 (1), pp. 92–102, 2022, <https://doi.org/10.2478/rtuect-2023-0008>.
3. Kusnere, Z., Rupeika, D., Spalvins, K., Mika, T., Turning Trash into Treasure: The use of Vulcanized Ash Filters for Renewable Energy., *Environmental and Climate Technologies* 27 (1), pp. 1049–1060, 2023, <https://doi.org/10.2478/rtuect-2023-0076>.
4. Kusnere, Z., Lauka, D., Spalvins, K., Multi criteria Analysis of Wood Waste Ash and Glass Foam: Toward Sustainable Material Selection for Biomethanation. *Agronomy Research*, 2024, <https://doi.org/10.15159/AR.24.056>.
5. Kusnere, Z., Laipniece, L., Lauka, D., Spalvins, K., pH-Optimized Biomethane Production: Evaluating Carrier Materials, melnraksts.

Citas zinātniskās publikācijas

1. Waste Cooking Oil as Substrate for Single Cell Protein Production by Yeast *Yarrowia Lipolytica*. Spalviņš, K., Geiba, Z., Kusnere, Z., Blumberga, D. *Environmental and Climate Technologies*, 2020, Vol. 24, No. 3, pp. 457–469.
2. Optimization of Yeast Cultivation Factors for Improved SCP Production. Raita, S., Kusnere, Z., Spalvins, K., Blumberga, D. *Environmental and Climate Technologies* 26(1), pp. 848–861, 2022.
3. Sustaining a Mars Colony through Integration of Single-Cell Oil in Biological Life Support Systems Spalvins, K., Kusnere, Z., Raita, S. *Environmental and Climate Technologies* 27 (1), pp. 339–367, 2023.
4. Microbial Carotenoids Production: Strains, Conditions, and Yield Affecting Factors Raita, S., Feldmane, L., Kusnere, Z., Spalvins, K., Kuzmika, I., Berzina, I., Mika, T. *Environmental and Climate Technologies* 27 (1), pp. 1027–1048, 2023.
5. Herbicide-Based Selection of Mutants for Improved Single Cell Protein Synthesis: Amino-acid Inhibitor Application, Mutagenesis Procedures and Applicable Microbial Strains. Kusnere, Z., Raita, S., Berzina, I., Kalnins, M., Kuzmika, I., Spalvins, K. *Agronomy Research*, 2024.

Darba struktūra un apraksts

Promocijas darbā ir ievads un trīs galvenās nodaļas:

- literatūras apskats;
- metodoloģija;
- rezultāti un diskusija.

Promocijas darba ievadā atspoguļota darba aktualitāte un novitāte, definēts pētījuma mērķis un hipotēze, kā arī sniegta informācija par pētījuma struktūru, metodiku un darba praktisko lietojumu.

Pirmā nodaļa ietver literatūras apskatu, kurā analizētas industriālo atkritumu praktiskā lietojuma iespējas, biogāzes sektors un biogāzes uzlabošanas tehnoloģijas, īpaši izmantojot apsmidzināmos biofiltru reaktorus, izskaidrots enerģijas pārveides gāzē koncepts. Nodaļā apskatīti arī galvenie industrijā izmantojamie filtrmateriāli biometanizācijas kontekstā, kā arī analizētas to īpašības, kas ietekmē biometanizācijas efektivitāti.

Otrajā nodaļā aprakstītas darbā izmantotās metodes un materiāli, sākot no filtrmateriālu pagatavošanas un īpašību noteikšanas līdz dažādām mikrobioloģiskām metodēm laboratorijas testos ar mikroorganismiem. Nodaļā izklāstīta manometriskās metodes gaita biometanizācijas eksperimentiem, datu analīzei, matemātiskai modelēšanai un daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīzei filtrmateriāla izvēlē.

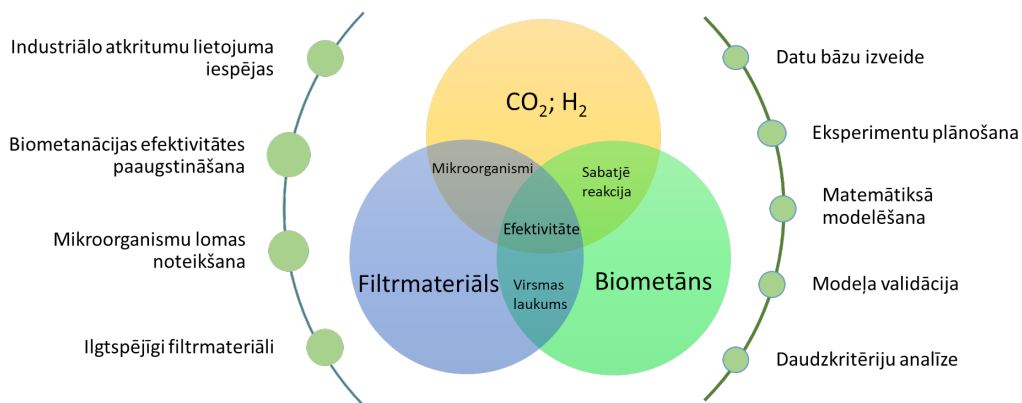
Trešajā nodaļā prezentēti un analizēti darba rezultāti, aprakstīta diskusija par to, kas izriet no veiktajiem pētījumiem un eksperimentiem, salīdzināti un analizēti iegūtie dati. Nodaļas sākumā prezentēti dati par koksnes pelnu filtra izgatavošanu un filtrmateriālu īpašībām. Tālāk, analizējot eksperimentos iegūtos datus, aplūkota vulkanizētu pelnu materiāla un putu stikla materiāla piemērotība biometanizācijai *ex situ* apsmidzināmo bioreaktoru kontekstā, validēti šie

rezultāti. Nodaļas noslēgumā sniegts apskats, kā dažādi kritēriji ietekmē filtrmateriāla izvēli biometanizācijai.

Promocijas darba beigās prezentēti secinājumi, kas ir definēti, pamatojoties uz pētījuma datiem un analīzi. Pētījuma rezultāti salīdzināti ar darba hipotēzi, sniedzot secinājumus, kas formulēti pēc veiktajiem darba uzdevumiem.

Izpētes jautājumi

Darbā izmantotās metodes



1. att. Promocijas darba struktūra.

Promocijas darbā aplūkoti vairāki jautājumi, kas saistīti ar pētīto biometanizācijas tehnoloģiju. Darbā pētītās tehnoloģijas procesa galvenie parametri redzami 1. attēla centrā, un tie būtiski ietekmē biometanizācijas efektivitāti. Apsmidzināmā biofiltra reaktorā atrodas filtrmateriāls, uz kura virsmas laukuma tiek imobilizēti metanogēnie mikroorganismi. Reaktorā pievadot ogļskābo gāzi un ūdeņraža gāzi, notiek Sabatjē (*Sabotier*) reakcija, kurā mikroorganismi veic katalizatora lomu. Šīs reakcijas rezultātā rodas galaprodukts biometāns.

Promocijas darba gaitā pētīti vairāki jautājumi, kas saistīti ar biometanizācijas tehnoloģiju:

- industriālo atkritumu lietojuma iespējas;
- biometanizācijas efektivitātes paaugstināšana;
- mikroorganismu nozīmes noteikšana;
- ilgtspējīgu filtrmateriālu izvēle.

Promocijas darba izmantotas vairākas metodes: datu bāzu izveide; eksperimentālā plānošana, izpēte un matemātiskā modelēšana; modeļa validācija; daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīze.

1. IZMANTOTĀ METODIKA

PELNU PARAUGU ĶĪMISKO ELEMENTU ANALĪZE

Paraugu sagatavošanai tika izmantoti pelni, kas radušies salmu un šķeldas sadedzināšanas procesā. Salmu pelni tika iegūti Rīgas Tehniskās universitātes Vides monitoringa laboratorijā, veicot salmu sadedzināšanu, savukārt šķeldas pelni bija smagie ārdū pelni, kas tika savākti no AS “Jūrmalas siltums” katlumājas. Pelnu paraugu ķīmisko elementu sastāva analīzei tika izmantoti starptautiski akreditētās laboratorijas “Virisma”, kas specializējas atkritumu un degvielas pētniecībā un testēšanā, pakalpojumi. Šī laboratorija ir akreditēta saskaņā ar *ISO/IEC 17025* standartu, kas nodrošina augstu analīžu precizitāti un uzticamību. Analīzei tika sagatavoti trīs paraugi – koksnes šķeldas pelni, kviešu salmu pelni un šķeldas pelni, kas iegūti no siltumenerģijas ražotāja “Jūrmalas siltums”. Analīzes laikā tika noteikts pelnu mitruma saturs, oksīdu sastāvs un dažādu ķīmisko elementu koncentrācija sausajā materiālā, ieskaitot smago metālu saturu. Visi testi tika veikti atbilstoši starptautiski atzītiem metodēm un standartiem, tostarp *ISO/TS 16996:2015*, *LVS EN 15309:2007*, *ISO/TS 16996:2015* un *LVS EN ISO 16968:2015*.

PELNU KUŠANAS TEMPERATŪRAS TESTI

Lai izpētītu korelāciju starp pelnu ķīmisko sastāvu un to kušanas temperatūru, tika veikta virkne eksperimentu laboratorijas apstākļos. Šie eksperimenti tika īstenoti ar mērķi izprast, kā pelnu ķīmiskās īpašības ietekmē filtra materiālu izgatavošanas procesu, kurā izmanto augstu temperatūru, lai vulkanizētu koksni vai salmus. Pelnu paraugi, tostarp koksnes šķeldas un kviešu salmu pelni, tika izmantoti kušanas temperatūras noteikšanai, izmantojot *Carbolite CAF G5* mufelkrāsnī. Testēšanas notika, izmantojot standarta *EN ISO 21404:2020* metodoloģiju. Metode ietvēra pelnu paraugu granulēšanu un to ievietošanu krāsnī, kurā pakāpeniski tika paaugstināta temperatūra līdz brīdim, kad tika novērota pelnu granulas deformācija. Deformācijas sākuma temperatūra tika fiksēta, lai gan precīzu deformācijas brīdi ir sarežģīti noteikt, tādēļ iegūtā kušanas temperatūra tiek izteikta kā temperatūras diapazonu.

Koksnes pelnu materiāla ražošanas eksperimenti

Pirms turpmākas apstrādes pelni tika izsijāti caur 2 mm sietu, lai atdalītu lielākas daļiņas un piemaisījumus. Pēc sijāšanas pelni tika samalti, izmantojot laboratorijas dzirnaviņas, lai nodrošinātu viendabīgu daļiņu izmēru. Pēc malšanas pelni tika precīzi nosvērti, izmantojot *KERN 572* laboratorijas svarus, lai nodrošinātu atbilstošu parauga masas proporciju. Nosvērtais pelnu paraugs tika sajaukts ar ūdeni laboratorijas traukā, līdz tika iegūta viendabīga masa, no kuras manuāli tika izveidotas lodītes. Izveidotās lodītes tika atstātas istabas temperatūrā žāvēties līdz cepšanas procesam. Pēc tam lodītes tika izvietotas tīģeļos pa 6–8 vienībām katrā un 3,5 stundas ceptas mufelkrāsnī *Nabertherm LT 5/13*. Lai nodrošinātu vienmērīgu temperatūras plūsmu, tīģeļi tika izkārtoti vienmērīgi pa cepšanas pannu, kas ievietota mufelkrāsnī tā, lai pēc iespējas mazāk ietekmētu krāsns siltumizolācijas materiālu. Šādā veidā sagatavotie materiālu paraugi tika izmantoti turpmākajos eksperimentos.

Lai noteiktu aptuveno temperatūru testu veikšanai, tika veikti vairāki sākotnējie testi, tostarp kušanas temperatūras noteikšana, kā arī paraugu mitruma un ķīmiskā sastāva analīze, kas tika veikta atkritumproduktu un kurināmā izpētes un testēšanas laboratorijā “Virsmā”. Eksperimentā tika sagatavoti šķeldas un salmu pelnu paraugi dažādās proporcijās – 100 : 0, 80 : 20 un 50 : 50. Tika testēta dažāda maksimālā cepšana temperatūra, lai novērtētu pelnu sakušanas īpašības, un visos cepšanas posmos tika izmantota precīza temperatūras programma.

FILTRMATERIĀLU IZVĒLE BIOMETANIZĀCIJAS EKSPERIMENTIEM

Promocijas darbā biometanizācijas eksperimenta testiem tika izvēlēti divi filtrmateriāli, kas izgatavoti no industriālajiem atkritumiem – koksnes šķeldas pelniem un stikla atkritumiem. Eksperimenta mērķis bija pārbaudīt šo filtrmateriālu piemērotību biometanizācijai, kurā tas veiktu metanogēno mikroorganismu sūnu imobilizāciju. Apakšpelni, kas paliek katlumājās pēc šķeldas sadedzināšanas, bieži vien tiek uzskatīti par atkritumu materiāliem, ja tiem nav plašas lietojuma iespējas, tāpēc šāda veida pētījumi var sniegt iespēju valorizēt šādus atkritumu materiālus. Ņemot vērā to, ka filtrmateriāliem bioreaktorā jānodrošina gāzes-šķidrums pārnese starp vielām, materiālam ir nepieciešams liels virsmas laukums, kas to nodrošinātu. Pelnu pārstrāde agregātos palielina materiāla virsmas laukumu.

Putu stikla materiāls ir viela, kas izgatavota no pārstrādāta stikla, un tās ražošanas process ir līdzīgs kā šķeldas pelnu filtra materiālam. Šis materiāls ir izrādījies ļoti universāls un pielāgojams, padarot to par vērtīgu priekšrocību dažādās nozarēs. Turklāt tā ilgtspējīgs ražošanas process atbilst mūsdienīgām vides tendencēm, padarot to par pievilcīgu risinājumu uzņēmumiem, kas vēlas samazināt oglekļa dioksīda emisijas nospiedumu.

Keramzīts ir neorganisks materiāls, kas sastāv no māla minerāliem. To galvenokārt izmanto kā drenāžas un siltumizolācijas materiālu dārzkopībā. Keramzīts ir komerciāli plaši pieejams un ekonomiski izdevīgs. Līdzīgi keramzītam, putu stikls tiek ražots no pārstrādāta stikla materiāla, un pēdējos gados ir pieaugusi interese par to ražošanu un izmantošanu. Putu stikls ir īpaši pieprasīts, pateicoties tā īpašībām, piemēram, lielam virsmas laukumam, augstai caurlaidībai (ja poras ir savstarpēji saistītas), zemam blīvumam, zemei īpatnējai siltumvadītspējai, augstai siltuma un skaņas izolācijai, kā arī augstai ķīmiskajai izturībai. Turklāt putu stikls ir ugunsizturīgs un izturīgs pret ūdens un ūdens tvaiku iedarbību. Keramzīts, piemēram, *Leca*®, ir rentabls un viegli pieejams dabīgs materiāls, kam ir daudzveidīgs lietojums dārzkopībā un ko arvien vairāk izmanto arī būvniecībā.

Poliuretāna putas tika izvēlētas salīdzināšanai ar atšķirīgas izcelsmes un kvalitātes materiāliem. Poliuretāna putas, kas ir organisks materiāls, tiek izmantotas dažādos lietojumos, tostarp izolācijai, iepakojšanai, polsterēšanai un citos. Tas ir izturīgs un daudzfunkcionāls materiāls. Poliuretāna putas (*PUF*) ir mākslīga viela, kas iegūta no fosilā kurināmā, tā ir rentabla, tai raksturīga augsta porainība, kas nodrošina ievērojamu virsmas laukumu. Poliuretāna putu un māla keramzīta, kas abi ir plaši pētīti un izmantoti līdzīgos lietojumos, izmantošanas priekšrocība ir tā, ka šajā darbā ir pieejams lielāks datu kopums salīdzinošajai analīzei. To izcelsme ir dažāda – viens ir dabīgs materiāls, otrs – sintētisks materiāls, kam ir fosilas izcelsmes izejvielas. Datu pieejamība par poliuretāna putām un māla keramzītu ļauj vispusīgāk novērtēt to darbību dažādos lietojumos. Šī salīdzinošā analīze var sniegt vērtīgu

ieskatu par katra materiāla stiprajām un vājajām pusēm, palīdzot lēmumu pieņemšanas procesā turpmākajos pētījumos.



1.1. att. Darbā izmantotie filtrmateriāli.

PUF – poliuretāna putas, *EC* – māla keramzīts, vulkanizēts pelnu materiāls (*FA* – sijātu un *CA* – nesijātu pelnu), *GF* – putu stikls.

1.1. attēlā redzami materiālu paraugi, kas tika testēti un izmantoti biometanizācijas eksperimentos – poliuretāna putas (*PUF*), māla keramzīts (*EC*), divu dažāda veida vulkanizētu pelnu materiāli (*VAM*) – sijātu un maltu pelnu lodītes (*FA*), sijātu un nemaltu pelnu lodītes (*CA*) – un putu stikls (*GF*).

FILTRMATERIĀLU ĪPAŠĪBU NOTEIKŠANA

Visiem filtrmateriālu paraugiem tika noteikti vairāki būtiski fizikāli un ķīmiski parametri, tostarp blīvums, ūdens aiztures spēja, ārējā porainība un pH līmenis, kā arī īpatnējais virsmas laukums. Sausās masas blīvums (1.1. vienādojums) *CP* un *VAM* materiālam tika aprēķināts kā sausā materiāla masas (svara) attiecība pret mitrā materiāla kopējo tilpumu. 2 L vārglāze līdz malām tika piepildīta ar filtrmateriālu, un tad materiāls tika nosvērts.

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_t}, \quad (1.1.)$$

kur

M_s – sauso daļiņu masa, kg;

V_t – daļiņu kopējais tilpums, m³.

Materiāla īpatnējā virsmas laukuma (m^2/m^3) noteikšanai tika izmantota metode, kuras pamatā ir 30 filtrējošā materiāla daļiņu trīs perpendikulāro diametru mērījumi. Ar bīdes mērinstrumentu tika izmērīti diametri $d_{1,i}$, $d_{2,i}$, $d_{3,i}$ bumbiņām, no kurām katrai bija trīs dažādu filtrmateriāla granulas. Pēc tam izmērītie dati tika izmantoti, lai aprēķinātu īpatnējo virsmas laukumu (1.2. vienādojums) un vidējo daļiņu blīvumu (1.3. vienādojums), pieņemot, ka daļiņu forma ir elipsoīda forma.

$$a = \rho_b \cdot \frac{\sum_1^{30} \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot \left((d_{1,i}^{1,6} \cdot d_{2,i}^{1,6}) + (d_{1,i}^{1,6} \cdot d_{3,i}^{1,6}) + (d_{2,i}^{1,6} \cdot d_{3,i}^{1,6}) \right)}{3} \right)^{\frac{1}{1,6}}}{M_{tot}}, \quad (1.2.)$$

$$\rho_p = \frac{\sum_1^{10} \left(\frac{1}{6} \pi d_{1,i} d_{2,i} d_{3,i} \right)}{M_{tot}}, \quad (1.3.)$$

kur

a – īpatnējais virsmas laukums, $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$;

ρ_b – tilpuma blīvums, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

$d_{1,i}$, $d_{2,i}$, $d_{3,i}$ – i -tās daļiņas perpendikulārais diametrs, m;

M_{tot} – 30 filtrmateriāla daļiņu masa, kg.

Filtrmateriāla ūdens aizturēšanas spēja (%) tika noteikta, izmantojot 100 mL seruma pudeles, pielāgojot tās biometanizācijas eksperimentiem. Šī parametra mērīšana ir būtiska, jo tā norāda, vai reaktors spēj saglabāt pietiekamu mitruma līmeni, kas nepieciešams mikroorganismu augšanai un attīstībai, tādējādi nodrošinot metanoģenēzes procesa efektivitāti. Seruma pudeles tika piepildītas ar filtrējošo materiālu un ūdeni, lai materiāls būtu pilnībā pārklāts ar šķidrums. Pēc stundu ilgas iedarbības, kuras laikā filtrējošais materiāls kļuva vienmērīgi mitrs, ūdens tika izlaists. Izlaistā ūdens daudzums tika mērīts pēc 1 minūtes, 10 minūtēm un 30 minūtēm, un, pamatojoties uz šiem mērījumiem, tika aprēķināta vidējā ūdens aizturēšanas spēja.

Materiāla pH tika noteikts, mērot ūdens pH līmeni, kurā filtrējošais materiāls bija mērcēts vienu stundu. Šis mērījums ir būtisks, lai novērtētu filtrmateriāla ietekmi uz mikroorganismu dzīvotspēju un metanoģenēzes procesu, jo optimāls pH līmenis ir būtisks veiksmīgai biometanizācijai.

Filtrmateriāla ārējā porainība (%) ir vēl viens nozīmīgs parametrs, kas norāda, cik liela daļa no filtrējošā materiāla tiks aktīvi iesaistīta biometanizācijas procesā. Bioplēve, kas veidojas uz materiāla poru virsmām, var aizsprostot poras, tādējādi samazinot materiāla efektivitāti. Lai noteiktu ārējo porainību, tika izmantoti iepriekš samitrināti filtrmateriāli. Vispirms materiāls tika iemērīts ūdenī, un pēc tam tika mērīts gaisa daudzums, kas izspiedies no 500 mL mērglāzes, kurā iepriekš atradās ūdeni absorbējošais filtrmateriāls. Materiāls tika ievietots mērglāzē un mērcēts ūdenī 10 minūtes. Pēc mērcēšanas mērglāzei tika piestiprināts siets, un tā tika apgāzta uz 10 minūtēm, lai ļautu ūdenim pilnībā notecēt no materiāla. Ārējā porainība tika aprēķināta, dalot ūdens tilpumu, kas var tikt pievienots samitrinātajam filtrējošajam materiālam, ar trauka kopējo tilpumu, izmantojot 1.4. vienādojumu.

$$\varepsilon_{ex} = \frac{V_w}{V_v}, \quad (1.4.)$$

kur

ε_{ex} – ārējā porainība, %;

V_w – ūdens tilpums, L;

V_v – trauka tilpums, L.

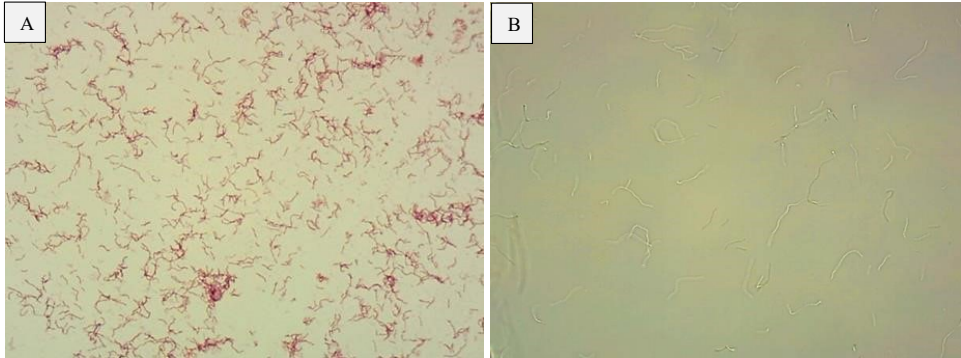
Biometanizācijas eksperimenti

Eksperimentos tika izmantoti dažādi filtrēšanas materiāli: poliuretāna putas (*PUF*); māla keramzīts (*EC*); divu dažādu veidu vulkanizētu pelnu materiāli (*VAM*) – sijātu un homogenizētu pelnu lodītes (*FA*) un sijātu pelnu lodītes (*CA*) – un putu stikls (*GF*). Kā bioreaktori atsevišķos eksperimentos tika izmantotas 100 mL un 250 mL laboratorijas stikla pudeles. Katram parauga tipam testos tika sagatavoti trīs atkārtojumu bioreaktori, lai vēlāk tiktu veikta statistikas datu analīze. Turklāt tika izveidoti arī kontroles bioreaktori bez materiāliem, lai novērotu, vai filtrmateriālu izmantošana, salīdzinot ar reaktoru bez materiāla, palielina biometanizācijas efektivitāti.

IZMANTOTIE MIKROORGANISMI

Digestāts satur daudz metanogēno mikroorganismu, kas ir būtiski biometanizācijas procesam. Šie mikroorganismi veic galveno lomu organisko materiālu pārveidošanā metānā, kas ir galvenā biogāzes sastāvdaļa. Digestāts nodrošina stabili mikrobiālo kopienu, kas ir pielāgota anaerobiem apstākļiem un spēj efektīvi veikt metanogēni. Turklāt digestāts ir blakusprodukts no esošām biogāzes ražošanas iekārtām, padarot to par viegli pieejamu un rentablu inokulāta avotu. Tas arī atspoguļo reālos apstākļus, kuros biometanizācijas process norisinās komerciālās iekārtās. Eksperimentos tika izmantots inokulāts, kas iegūts no SIA “Agro Iecava” biogāzes ražošanas stacijas digestāta. Pēc digestāta savākšanas tas tika inkubēts 37 °C temperatūrā septiņas dienas, katru dienu noņemot lieko saražoto gāzi. Šī gāzes noņemšana bija nepieciešama, lai atbrīvotu digestātu no bioloģiski noārdāmajiem organisko vielu atlikumiem, kas tajā vēl atradās. Pēc tam, kad digestāts tika atgāzēts, tas tika izsijāts caur sietu, lai atbrīvotos no frakcijām, kas lielākas par 2 mm. Digestāta sausnes saturs (*TS*) tika noteikts, to žāvējot 105 °C temperatūrā *Ecocell* žāvskapī 24 stundas un nosakot masas izmaiņas pirms un pēc žāvēšanas.

Lai palielinātu biometāna koncentrāciju galaproduktā, līdz ar biogāzes digestātu kā inokulātu tika novērtēti arī divi *Methanobacterium alcaliphilum* celmi. No Leibniza institūta *DSMZ* (Vācija) kolekcijas pasūtītie celmi – alkalifilie metanogēni ir izolēti no ezeru nogulumiem Ēģiptē – *Wadi el Natrun* reģionā. Tie bija H₂ oksidējoši, CO₂ reducējoši, metanogēni, kas tika iegūti no ezeriem ar zemu izšķīdušo sāļu koncentrāciju un pH līmeni no 8 līdz 10. *Methanobacterium alcaliphilum* celmi ir monokultūras, kas tika atlasītas, ņemot vērā to spēju attīstīties sārmainā vidē. Metanogēni ir daudzveidīgi obligāti anaerobi mikroorganismi, kas plaši sastopami dažādās skābekļa trūkuma vidēs, piemēram, pārmitrās augsnēs, nogulsnēs, notekūdeņu dūņu fermentieros, kā arī dažu dzīvnieku gremošanas traktā.



1.2. att. Metanogēnās baktērijas.

A) – 200× palielinājumā, krāsotas baktēriju šūnas; B) – 400× palielinājumā nekrāsotas baktēriju šūnas.

Metanogēnās baktērijas ir neliela izmēra un caurspīdīgas, kā redzams 1.2. B attēlā, tāpēc, lai tās skaidri redzētu un izšķirtu to struktūras, ir nepieciešama krāsošana. Šādi apstrādātus paraugus ir vieglāk monitorēt eksperimenta gaitā, kad ir nepieciešams novērtēt baktēriju kultūras augšanas attīstību pēc to pavairošanas.

ANAEROBĀS BAROTNES MIRKOORGANISMIEM

Metanogēni, kas spēj augt tikai ar H_2/CO_2 kā substrātu, tiek audzēti barotnēs, kas ir sagatavotas ar H_2/CO_2 gāzu maisījumu bezskābekļa vidē. Flakoniem, kuros audzē šos celmus, tiek uzturēts spiediens no 0,5 līdz 1 bāram, pievienojot 80 % H_2 un 20 % CO_2 gāzu maisījumu. Lai nodrošinātu optimālus augšanas apstākļus, šiem celmiem regulāri tiek piegādāts svaigs gāzu maisījums, kas novērš spiediena samazināšanos H_2/CO_2 patēriņa rezultātā un atvieglo mikroorganismu izveidotā CH_4 izvadīšanu.

Baktērijām tika izmantotas anaerobās pavairošanas metodes, kas nozīmē, ka arī barotnes pagatavošanas procesā ir nepieciešams ievērot dažus svarīgus aspektus, lai metanogēniem mikroorganismiem nodrošinātu augšanai piemērotus apstākļus. Viens no tiem ir zems oksidēšanās-reducēšanās potenciāls (0,33 V), otrs – zems skābekļa parciāls spiediens. Lai to panāktu, barotne pagatavošanas laikā jāreducē, ko iespējams veikt trīs veidos. Pirmais no tiem ir vārīšana, kas palīdz atbrīvoties no barotnē izšķīdušā skābekļa. Nākamais nosacījums ir barotnes turēšana anaerobas gāzes vidē, kas neļauj barotnei atkārtoti piesātināties ar skābekli. Visbeidzot, barotnei pievienojot reducētāju un oksidēšanās-reducēšanās indikatoru, ir iespējams reducēt barotni un vienlaikus novērot barotnes oksidatīvo stāvokli. Pētījumā izmantotajām barotnēm tika pievienots oksidēšanās-reducēšanās indikators – resazurīns, kas oksidētā vidē barotnei dod rozā nokrāsu, bet, reducējot barotni, rozā krāsa pazūd, un barotne iegūst dzeltenīgu nokrāsu, kas veidojas no tajā izšķīdinātiem minerāliem, sāļiem un vitamīniem. Resazurīns ir visbiežāk izmantotais oksidēšanās-reducēšanās indikators, jo tas parasti nav toksisks mikroorganismiem un ir efektīvs ļoti zemā koncentrācijā – 0,5 līdz 1 mg/L.

Lai sagatavotu *Methanobacterium alcaliphilum* mikroorganismus eksperimentam, nepieciešams sekot ražotāja noteiktajām instrukcijām. Barotne metanogēnām monokultūrām tika pagatavota no iepriekš sagatavotiem šķīdumiem – A, B un C. Pabeidzot barotnes

sagatavošanu, tika noregulēts pilnās barotnes pH līdz 8,3–8,4. Pēc tam, kad barotnes pagatavotas un ir salietas pa reaktoriem, tie tiek skaloti ar sterilu H₂/CO₂ gāzu maisījumu, līdz barotnes ir reducētas pirms mikroorganismu pievienošanas. Pēc tam, kad barotnes reducētas, tiek pievienoti mikroorganismi un sterils H₂/CO₂ gāzu maisījums līdz 1,5 bar spiedienam.

Savukārt eksperimentos ar biogāzes digestātu kā inokulātu tika izmantota pamata anaeroba barotne. Barotne tika sagatavota un saturēja mikroorganismiem nepieciešamos makroelementus, mikroelementus un vitamīnus. Barotnei tika pievienots 0,5 g cisteīna hidrohlorīda un 2,6 g NaHCO₃, kas izšķīdināts 10 mL ūdens, lai stabilizētu pH līmeni. Pēc tam barotne tika skalota ar slāpekli un sterilizēta autoklāvā. Pēc sterilizēšanas autoklāvā H₂/CO₂ oksidēšanās-reducēšanās indikators pārveidojās rozā krāsā, kas liecināja par veiksmīgu barotnes skābekļa reducēšanos, pēc tam barotne tika skalota ar H₂/CO₂ gāzu maisījumu pirms mikroorganismu pievienošanas.

BMP TESTS

Lai noskaidrotu filtrmateriālu piemērotību hidrogenatrofo mikroorganismu bioplēves attīstībai, viens no galvenajiem veidiem ir to testēšana laboratorijas apstākļos. Bioplēves attīstība raksturo to, cik ātri mikroorganismi spētu saražot metānu, jeb efektivitāte, ar kādu bioreaktors spēj veikt oglekļa dioksīda un ūdeņraža konversiju, un laiks, cik ilgi gāzei ir atļauts atrasties reaktorā. Veicot filtrmateriālu testēšanu, viens no galvenajiem mērķiem ir noteikt, vai attiecīgais materiāls ir vai nav piemērots bioplēves un hidrogenotrofā metanogēna attīstībai.

Parauga bioķīmiskais metāna potenciāls (BMP) ir maksimālais CH₄ daudzums, ko var iegūt no noteikta substrāta. Izgūtā CH₄ daudzuma aprēķināšanai izmanto metodi, kas balstās substrāta piemērotības un kvalitātes testos, kas norāda parauga BMP. BMP pētījumi ir viens no izplatītākajiem lietojumiem, ko izmanto arī biogāzes ražošanas iekārtu projektēšanā un pārvaldībā, bioreaktoru iekārtu efektivitātes novērtēšanā, dažādu substrātu kvalitātes novērtēšanā un anaerobās fermentācijas procesu līdzsvara uzturēšanā. Ņemot vērā šo faktu, BMP testus var izmantot arī biogāzes ražošanas un apstrādes procedūru efektivitātes novērtēšanai.

BMP testa veikšanai 100 mL tilpuma reaktori (seruma pudeles) tika piepildīti ar vienāda tilpuma filtrējošiem materiāliem – 50 mL, 1 mL NaHCO₃ bufera šķīduma, 0,386 g substrāta (vīna darītavas rauga atlikumi) un 30 mL ūdens. Tad reaktoros tika pievienots inokulāts (20 mL). Kā inokulāts tika izmantots biogāzes digestāts. Slāpekļis tika ievadīts reaktoros 5 minūtes, tos izskalojot no skābekļa. Pēc tam reaktori tika hermētiski noslēgti ar gumijas aizbāžņiem un nostiprināti ar alumīnija vāciņiem. Inkubatorā, kurā tika ievietoti reaktori, tika uzturēta stabila temperatūra – 37 °C.

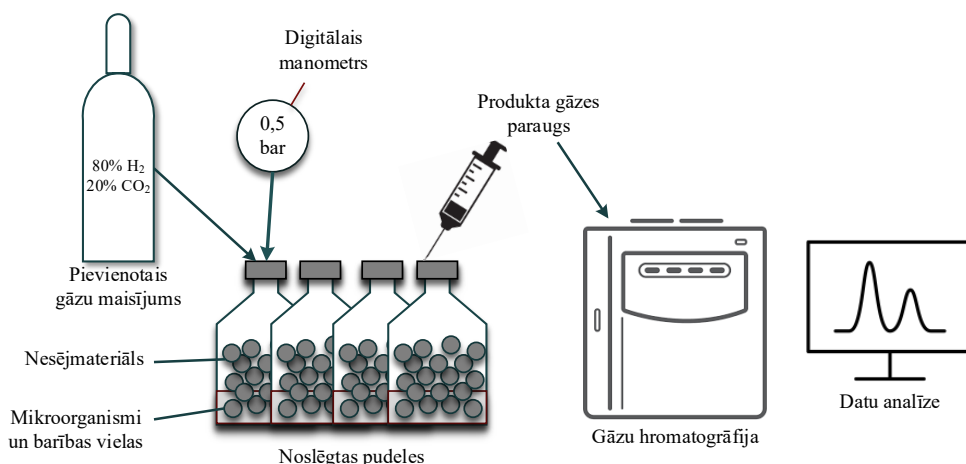
Izmantojot 20 mL šļircēs, silikona caurules, adatas un knaģus, no reaktoriem tika savākta iegūtā biogāze. CO₂ izšķīdināšanai tika izmantots 3 M NaOH šķīdums, katrā šļircē iepildot 5 mL. Šļirce tika pievienota pie adatas otrā gala ar silikona caurulīti, kas aprīkota ar knaģi. Adata tika ievadīta reaktoros caur gumijas korķīti, pēc tam tika atvērts aizspiedošais knaģis, tādējādi reaktorā esošai gāzei iekļūstot šļircē un paceļot tās virzuli. Kad virzuļa kustība apstājās, tika konstatēts, ka visa gāze ir pilnībā izvadīta no reaktora. Pēc tam tika izmērīts un dokumentēts

gāzes tilpums un adata tika izņemta no reaktora. Pudeles viegli tika samaisītas un ievietotas atpakaļ inkubatorā.

MANOMETRISKAIS TESTS

Manometriskajā testā reaktori tika piepildīti ar 100 mL mitra filtrējošā materiāla, 1 mL inokulāta un 15 mL pamata anaerobās barotnes. Mikroorganismu metabolisma nodrošināšanai reaktors tika izmantots gāzu maisījums, kas sastāvēja no CO₂ un H₂ attiecībā 1 : 4. Seruma pudeles tika hermētiski aizvērtas, izmantojot gumijas aizbāžņus, kas tika nostiprināti ar alumīnija vāciņiem.

Lai nodrošinātu eksperimenta datu precizitāti, katram filtrējošā materiāla tipam tika sagatavoti trīs atkārtējumi, savukārt pieci kontroles reaktori tika sagatavoti pēc tādas pašas procedūras, bet bez materiāla pievienošanas. Lai koriģētu spiediena kritumu, ko varētu izraisīt gāzes noplūde reaktoru caurduršanas laikā, tika izmantoti papildu kontroles reaktori bez inokulāta. Pēc reaktoru noslēgšanas caur gumijas aizbāžņiem tika ievadītas adatas, lai iepildītu gāzu maisījumu līdz aptuveni 1,5 bāru absolūtajam spiedienam. Spiediena mērīšanai tika izmantots *Additel 672* manometrs, kas ar adatu caur gumijas korķi tika savienots ar reaktoru (1.3. att.).



1.3. att. Manometriskais tests. Seruma pudeļu pildīšana ar gāzes CO₂ un H₂ maisījumu un paraugu analīze.

Seruma pudelēs caur gumijas vāciņu tika ievietotas adatas, kas mērinstrumentiem pievienotas ar silikona caurulītēm. Silikona caurulītes savieno seruma pudelē ievietotās mērinstrumentu adatas ar manometru un CO₂ un H₂ gāzu maisījumu. CO₂ un H₂ gāzu maisījums tika ievadīts līdz aptuveni 1,5 bāru absolūtajam spiedienam. Pēc inkubācijas 37 °C temperatūrā tika veikti periodiski spiediena mērījumi ar digitālo manometru. Testa beigās ar šļircēm tika savākti gāzu paraugi, kas pēc tam tika izmantoti gāzu sastāva analīzēs ar gāzu hromatogrāfu, un tika veikta datu analīze.

Pēc sagatavošanas seruma pudeles tika ievietotas inkubatorā, uzturot tajā nemainīgu temperatūru – 37 °C, un tās tika novietotas otrādi. Mērījumi tika veikti katru dienu, nosakot saražotā biometāna tilpumu BMP testā un reģistrējot spiediena kritumu manometriskajā testā. Šādi mērījumi nodrošina precīzus datus par biometanizācijas procesu un palīdz noteikt filtrmateriāla piemērotību konkrētajam procesam. Seruma pudelēs caur gumijas vāciņiem tika

ievietotas mērinstrumentu adatas, kas ar silikona caurulītēm savienotas ar manometru un CO₂ un H₂ gāzu maisījuma avotu. Gāzu maisījums, kas sastāv no CO₂ un H₂, tika ievadīts pudelēs, līdz tika sasniegts aptuveni 1,5 bāru absolūtais spiediens.

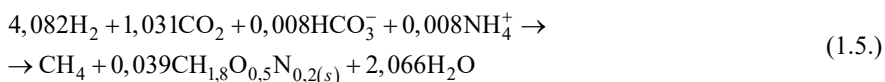
Manometriskais tests sastāv no diviem darbības posmiem: pirmais posms – bagātināšana; otrais posms – testēšana. Gan pirmajā gan otrajā posmā regulāri tika veikti spiediena mērījumi, kas uzrādīja spiediena samazināšanās ātruma tendenci, kas savukārt liecina par CH₄ ražošanas ātrumu reaktoros. Izmantojot spiediena krituma ātrumu, kas liecina par hidrogenotrofiskās metanoģenēzes reakcijas gaitu, ir iespējams veikt dažādu filtrmateriālu CH₄ ražošanas potenciāla salīdzināšanu.

Pirmajā posmā notiek mikroorganismu bagātināšanās un bioplēves veidošanās uz filtrmateriāla virsmas. Šīs fāzes mērķis ir izveidot un bagātināt metanoģēno mikroorganismu bioplēvi uz filtrmateriāla jeb pavairot tos pēc iespējas vairāk. Šajā posmā spiediena mērījumi tika veikti reizi dienā, izmantojot digitālo manometru, mērījumus turpinot līdz brīdim, kad spiediena rādījumi ir nemainīgi divas dienas pēc kārtas. Šī spiediena vērtība tika reģistrēta kā minimālais spiediens. Pēc tam pudeles atkārtoti tika piepildītas ar CO₂ un H₂ gāzu maisījumu līdz aptuveni 1,5 bāru absolūtajam spiedienam un ievietotas atpakaļ inkubatorā. Mērījumi tika turpināti katru dienu, un pudeles atkārtoti piepildītas ar gāzu maisījumu, līdz spiediena kritums 24 stundu laikā atkārtoti sasniedza minimālo vērtību. Šajā brīdī tika uzskatīts, ka bioplēve uz filtrmateriāla ir pilnībā izveidojusies un stabilizējusies, tādējādi noslēdzot pirmo posmu.

Otrajā posmā seruma pudeles atkārtoti tika piepildītas ar CO₂ un H₂ gāzu maisījumu līdz aptuveni 1,5 bāru absolūtajam spiedienam un atkal ievietotas inkubatorā. Šajā posmā mērījumi tika veikti biežāk, piemēram, ik pēc vienas vai divām stundām, lai precīzi novērotu metanoģenēzes procesa dinamiku īsāka laikā. Mērījumi tika veikti dažādos laika intervālos, piemēram, 1 stundu, 2 stundas, 3 stundas, 5 stundas, 7 stundas, 10 stundu un 24 stundas pēc gāzes maisījuma ievadīšanas, lai detalizēti izpētītu biometāna ražošanas procesu.

MATEMĀTISKĀ MODELĒŠANA – TEORĒTISKA METĀNA NOTEIKŠANA

Pētījumu rezultātā radīta iepriekš aprakstītā manometriskā metode dažādu filtrēšanas materiālu salīdzināšanai laboratorijas apstākļos, kas ir gan vienkārši lietojama, gan ekonomiski pieejama metode. Turklāt, izmantojot šo metodi, ir iespējams lietot līdzīgus palīgmateriālus, kādi tika izmantoti BMP eksperimentos. Metodes vienkāršība un rentabilitāte padara to ideāli piemērotu filtrmateriālu efektivitātes salīdzināšanai *ex situ* biometanizācijā. Izmantojot šo metodi, var iegūt hidrogenotrofās metanoģenēzes ātruma manometrisko novērtējumu. Lai noteiktu saražotā metāna daudzumu, tika veikts stehiometriskais aprēķins saskaņā ar jau zināmo metabolisko reakciju. Hidrogenotrofisko metanoģēnu bagātināšanās pakāpe bioreaktoros nosaka saražotā metāna daudzumu. Pēc Sabatjē reakcijas vienādojuma ir zināms, ka bagātināti metanoģēnie mikroorganismi spēj radīt 0,2445 molu metāna uz vienu molu ūdeņraža (1.5. vienādojums).



Radušos metāna daudzumu var noteikt, izmantojot šo stehiometrisko vienādojumu kopā ar ideālas gāzes likumu. Pieņemot, ka radītais ūdens paliek šķidrā veidā bioplēvē, reakcijas rezultātā reaktorā samazinās 4,113 molu kopējā gāzes daudzuma ($1,031 \text{ mol CO}_2 + 4,082 \text{ mol H}_2 - 1 \text{ mol CH}_4$). Ir paredzama skaidra korelācija starp šo samazinājumu un vienlaikus kopējā spiediena samazināšanos bioreaktorā. Tāpēc ir iespējams aprēķināt hidrogenotrofiskās metanoģenēzes dinamiku, periodiski uzraugot spiediena krituma ātrumu reaktorā. Veiktie spiediena mērījumu dati tika izmantoti teorētiskā metāna daudzuma noteikšanā.

Pirms datu standartizācijas un apstrādes tika veikts rūpīgs datu tīrīšanas process, kura laikā tika identificēti un novērsti trūkstošie dati, ekstrēmās vērtības un dubļējumi, kā arī veikta nepieciešamās mērvienību un datu formātu pārveidošanas. Pēc datu sakārtošanas un attīrīšanas tie tika standartizēti, lai nodrošinātu precīzu rezultātu salīdzināmību – izmērītais gāzes spiediens tika pielāgots atbilstoši temperatūrai, gāzes tilpumam un ūdens tvaika spiedienam, izmantojot 1.6. vienādojumu.

$$V_{std} = V_{meas} \cdot \frac{(p_{meas} - p_{H_2O})}{101,325 \text{ kPa}} \cdot \frac{273,15 \text{ K}}{(T_{meas} + 273,15 \text{ K})}, \quad (1.6.)$$

kur

p_{meas} – izmērītais gāzes spiediens, kPa;

T_{meas} – gāzes temperatūra tilpuma noteikšanas laikā, °C;

p_{H_2O} – ūdens tvaika parciālais spiediens, kPa;

273,15 K – temperatūra (0 °C);

101,325 kPa – standartspiediens (1 atm);

V_{std} – standartizēts gāzes tilpums, NmL.

Spiediena mērījumi tika veikti, sākot ar manometriskā spiediena noteikšanu, kas pēc tam tika pārvērsts absolūtā spiediena vērtībās, pieskaitot katrā mērījumu punktā nolasīto apkārtējā spiediena vērtību izmērītajam spiedienam. Lai korekti novērtētu gāzes zudumus, kas var rasties reaktoru caurduršanas rezultātā, tika mērīts spiediena kritums kontroles reaktoros, un šī spiediena korekcija tika iekļauta aprēķinātajās absolūtā spiediena vērtībās. Saražotā metāna daudzums tika aprēķināts, izmantojot ideālās gāzes likumu un stehiometrisko vienādojumu (1.5. vienādojums), kas raksturo hidrogenotrofiskā metanoģēna metabolismu un ir balstīts eksperimentālos datos. Šis vienādojums precīzē metāna iznākumu attiecībā uz izmantoto ūdenražā molfrakcijas vienību. Pēc tam kopējais saražotās gāzes molu daudzums tika aprēķināts, izmantojot 1.7. vienādojumu.

$$n_j = \frac{P_j V}{RT}, \quad (1.7.)$$

kur

n_j – saražotie gāzes molī, mol;

P_j – izmērītais spiediens, bar;

V – reaktora tilpums, L;

R – ideālas gāzes konstante, $L \cdot \text{bar} \cdot K^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$;

T – temperatūra, K.

Aprēķinātais molu daudzums tika standartizēts atbilstoši normāliem apstākļiem (1 atm spiediens, 0 °C temperatūra), un tika noteikts saražotā metāna molu skaits (1.8. vienādojums), kā arī saražotā metāna tilpums (1.9. vienādojums).

$$n_{CH_4} = \frac{n_{j, std} - n_{j-1, std}}{4,113}, \quad (1.8.)$$

$$V_{CH_4} = n_{CH_4} \cdot V_M, \quad (1.9.)$$

kur

n_{CH_4} – metāna gāzes daudzums, mol;

n_{std} – standartizētas gāzes daudzums, mol;

V_M – ideālas gāzes moltilpums, $L \cdot \text{mol}^{-1}$;

V_{CH_4} – metāna molu tilpums, $L \cdot \text{mol}^{-1}$.

CH₄ MĒRĪJUMI AR GĀZU HROMATOGRĀFIJU

Eksperimenta pēdējā mērījuma laikā gāzu paraugi no bioreaktoriem tika savākti, izmantojot šļirces, un pēc tam tās hermētiski noslēgtas ar aizspiedējiem, lai novērstu jebkādu gāzu noplūdi pirms analīžu veikšanas. Iegūtie gāzu paraugi tika analizēti, izmantojot gāzu hromatogrāfu *Shimadzu Nexis GC-2030*. Tas aprīkots ar divām paralēlām analīzes līnijām, kā arī liesmas jonizācijas detektoru (*FID*) un siltumvadītspējas detektoru (*TCD*). Oglūdeņražu savienojumu analīzei tika izmantota *Restek Rt-Q-Bond* kolonna (30 m, 0,53 mm iekšējais diametrs, 20 μm plēves biezums) kopā ar *FID* detektoru, kas nodrošina augstu jutīgumu un precizitāti ogļūdeņražu noteikšanā. Lai analizētu H₂, N₂, CO, CH₄ un CO₂, tika izmantots *TCD* detektors, kas bija savienots ar trīs kolonnu sistēmu. Šī sistēma ietvēra izmēru izslēgšanas priekškolonnu (*Restek Porapak Q 80/100*), izmēru izslēgšanas kolonnu (*Restek Porapak Q 80/100*) un molekulārā sieta kolonnu (*Restek Molsieve 5A 60/80*). Šāda sarežģīta kolonnveida sistēma nodrošina efektīvu un precīzu dažādu gāzu komponentu atdalīšanu un kvantitatīvu noteikšanu, ļaujot iegūt detalizētus datus par gāzu sastāvu.

Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīze

Pēc veiktajiem eksperimentiem un iegūtajiem datiem tika veikta daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīze. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīze balstās literatūras analīzē, aptverot gan vēsturiskos, gan aktuālos aspektus un jauniegūtos filtrmateriālu parametrus, kā arī biometanizācijas eksperimentu datus. Analīzē izmantotais algoritms iekļauts 1.4. attēlā, kurā redzams, ka turpmākajos posmos tiek veikta materiālu (alternatīvu) atlase, kas ietver vulkanizētu koksnes pelnu materiālu, putu stikla materiālu no stikla atkritumiem un citas alternatīvas, izvēloties tās, pamatojoties uz kritērijiem, kas noteikti literatūrā. Vērtēšanas kritēriju definēšana veikta, ievērojot sistemātisku literatūras analīzi. Šajā pētījumā tiek

izmantota priekšrocību secības pēc līdzības ideālajam risinājumam (*TOPSIS*) metode. Papildus tiek veikta jutīguma analīze, lai nostiprinātu rezultātu ticamību.



1.4. att. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīzes darba algoritms.

Izvēlētie kritēriji tika sadalīti četrās kategorijās: vides aspekti; ekonomiskie aspekti; tehnoloģiskie aspekti; veiktspējas aspekti. Visi kritēriji ir kvantitatīvi, un attiecīgie dati tika iegūti no literatūras avotiem un veiktiem pētījumiem. Kritēriji, kas tika izmantoti biometanizācijas materiālu lietojuma daudzkritēriju analīzei, apkopoti 1.1. tabulā.

1.1. tabula

Daudzkritēriju analīzes kritēriji materiālu izmantošanai biometanizācijā

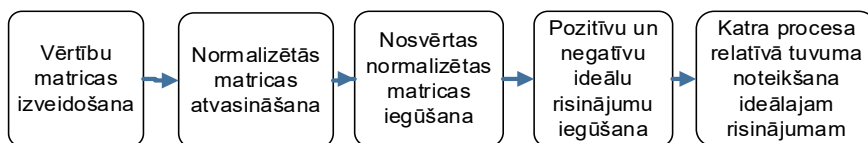
Kritēriju kategorija	Kritēriji
Vides aspekti	Materiāla ražošanai nepieciešamā enerģija, °C Materiāla izcelsme (fosilie vai nē) 0–1 punkti
Ekonomiskie aspekti	Izejvielu izmaksas EUR m ⁻³ Materiāla pieejamība, Mt/gadā
Tehniskie aspekti	Materiāla pH Ārējā porainība % Tilpuma blīvums kg m ⁻³ Īpatnējais virsmas laukums m ² m ⁻³
Veiktspējas aspekti	Vidējais biometāna iznākums NmL/L _{materiāla} Ūdens aizture %

KRITĒRIJU SVARI

Daudzkritēriju matricas materiālu svērumi tika noteikti, izmantojot ekspertu novērtējumu. Šim nolūkam tika atlasīti speciālisti ar plašām zināšanām bioloģijas, vides inženierijas, biotehnoloģijas, ķīmijas, kā arī civilās, rūpnieciskās un mašīnbūves jomās. Kopumā aptaujā piedalījās 30 eksperti, no kuriem 11 bija doktora grāds, 15 – maģistra grāds un četriem – bakalaura grāds. Aptauja tika veikta, izmantojot *Google* veidlapas platformu. Katra kritērija svērumi tika noteikti, izmantojot anketēšanas metodi, kurā dalībniekiem tika lūgts novērtēt katru kritēriju skalā no 1 līdz 5. Pēc tam katram kritērijam piešķirto vērtējumu summa tika dalīta ar visu kritēriju kopējo vērtējumu summu, nodrošinot, ka visu kritēriju svērumu summa ir vienāda ar 1. Šāda pieeja radīja normētu pamatu salīdzinājumiem un lēmumu pieņemšanai, garantējot kritēriju objektīvu novērtēšanu.

TOPSIS

Priekšrocību līdzības ideālajai situācijai (*TOPSIS*) metode ir metode, ko var izmantot, lai atrastu optimālo risinājumu, kas ir visciešāk saistīts ar vēlamu izvēli. Izmantojot *TOPSIS* metodi, šī pieeja izmanto iepriekš noteikto kritēriju skaitliskās vērtības. *TOPSIS* analīzi veido piecu procesu secība, kas tiek veikti cits pēc cita. Šo darba algoritmu var izmantot, lai noteiktu risinājumu, kas ir vislīdzīgākais ideālajam risinājumam (1.5. att.).



1.5. att. *TOPSIS* metodes darba gaita.

Sākotnējie soļi ietver vērtību matricas izveidi. Tai ir izvēlēts kritēriju kopums. Tiklīdz vērtību matrica ir iegūta, tiek izveidota normalizēta matrica, dalot katru vērtību ar visu attiecīgo kritēriju saistīto kvadrātsakņu summu. Tas tiek veikts, izmantojot 1.10. vienādojumu.

$$r_{ai} = \frac{x_{ai}}{\sqrt{\sum_{a=1}^n x_{ai}^2}}, \quad (1.10.)$$

kur

r_{ai} – normalizētā vērtība;

x_{ai} – indikatora vērtība;

i – kritērijs;

a – alternatīva.

Tālāk normalizētās matricas vērtības tiek izmantotas, konstruējot svērtu normalizēto matricu. Lai iegūtu svērtās normalizētās matricas vērtības, katru normalizēto vērtību reizina ar svara vērtību, tādējādi iegūstot vēlamos rezultātus. Ir obligāti nepieciešams, lai kopējā svēruma vērtība būtu konsekventa visos kritērijos. *TOPSIS* daudzkritēriju analīzes normalizēšanas pieejā katram kritērijam tiek piešķirts svars. Kad normētā svērtā matrica ir iegūta, tiek noteikti risinājumi, kas tiek uzskatīti par ideāliem un ideāliem pretējā virzienā. Lai to paveiktu, no iepriekš iegūtajām normalizētajām svērtajām vērtībām tiek iegūtas maksimālās un minimālās vērtības. Lielākā skaitliskā vērtība no svērtās normalizētās matricas tika uzskatīta par pozitīvo ideālo vērtību. Minimālā skaitliskā vērtība tika uzskatīta par negatīvo ideālo vērtību.

Pēc tam tiek aprēķināts attālums starp katras alternatīvas skaitlisko vērtību un ideālo risinājumu, kas ir pozitīvs, un ideālo risinājumu, kas ir negatīvs. Lai noteiktu attālumu līdz ideālajam risinājumam, kas ir pozitīvs, tika izmantots 1.11. vienādojums, savukārt, lai noteiktu attālumu līdz ideālajam risinājumam, kas ir negatīvs, tika izmantots 1.12. vienādojums.

$$d_a^+ = \sqrt{\sum (v_i^+ - v_{ai})^2}, \quad (1.11.)$$

$$d_a^- = \sqrt{\sum (v_i^- - v_{ai})^2}, \quad (1.12.)$$

kur

d_a^+ – attālums līdz pozitīvajam ideālajam risinājumam;

d_a^- – attālums līdz negatīvajam ideālajam risinājumam;

v_i^+ – pozitīva ideālā vērtība;

v_i^- – negatīva ideālā vērtība;

v_{ai} – svērtā vērtība.

Lai aprēķinātu relatīvā tuvuma koeficientu, pamatojoties uz attālumiem, kas iegūti no pozitīvajām un negatīvajām vērtībām, tika izmantots 1.13. vienādojums.

$$C_a = \frac{d_a^-}{d_a^+ + d_a^-}, \quad (1.13.)$$

kur

C_a – relatīvā tuvuma koeficients.

Relatīvā tuvuma koeficienta vērtība var būt no nulles līdz vienībai, un lielāka vērtība liecina par labvēlīgāku alternatīvu, ko varētu uzskatīt par ilgtspējīgāku. Pēc tam iegūtās vērtības tiek izmantotas, lai noteiktu gan pozitīvās, gan negatīvās ideālās vērtības, kas pēc tam tiek piemērotas, lai iegūtu relatīvā tuvuma koeficientu. Šis process tiek atkārtots, līdz vērtības ir pilnībā raksturotas. Relatīvā tuvuma koeficienta ilustrācija sniegta grafika veidā, lai rezultātu pārbaudi padarītu vienkāršāku. Pēc tam rezultāti tiek salīdzināti, lai izlemtu, kura alternatīva ir videi draudzīgāka.

JUTĪGUMA ANALĪZE

Pēc *TOPSIS* daudzkritēriju analīzes tika veikta jutīguma analīze, lai pārlicinātos par kritēriju stabilitāti. Jutīguma analīze parāda, cik lielā mērā *TOPSIS* katras alternatīvas sniegums mainās, reaģējot uz kritērija svara svārstībām. Lai parādītu katras alternatīvas relatīvās tuvības koeficientu, mainoties svērumam, katram kritērijam tika izveidota matrica. Saskaņā ar prasībām visu kritēriju kopējam svērumam jābūt vienādam ar 1. Tas nozīmē, ka, mainot viena kritērija svērumu, atlikusī svēruma vērtība tiks vienmērīgi sadalīta starp deviņiem kritērijiem, kas joprojām ir spēkā. Katra kritērija svērtā vērtība pakāpeniski palielinājās no 0,1 līdz 0,9 par 0,1 vienību. Lai noteiktu atlikušo kritēriju svērtā vērtību, tika izmantots 1.14. vienādojums. Šajā vienādojumā katra kritērija vērtība tika atņemta no 1 un tad dalīta ar 10, kas bija kopējais kritēriju skaits. Tādējādi atlikusī svērtā vērtība tika vienādi sadalīta starp visiem kritērijiem.

$$w = \frac{1-w_0}{10}, \quad (1.14.)$$

kur

w – katra atlikušā kritērija svēruma;

w_0 – jutīguma analīzes kritērija svars.

Pēc jutīguma analīzes pabeigšanas, izmantojot katra kritērija atjaunināto matricu, tiek izveidotas grafiku līknes. Šo grafiku mērķis ir ilustrēt, kā mainās alternatīvu rezultātu secība kritēriju svaru izmaiņu rezultātā. Saskaņā ar jutīguma analīzes secinājumiem vispiemērotākajam rezultātam ir vislielākais augšupvērsto līkņu skaits, un tas pozitīvi reaģē uz kritēriju izmaiņām. Lai iegūtu rezultātu, no iegūto lejuvērsto līkņu skaita katram variantam tika atņemts augšupvērsto līkņu skaits katram variantam.

2. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

Pelnu filtrmateriāla sagatavošana

Promocijas darbā biometanizācijas eksperimenta testiem tika izvēlēti divi filtrmateriāli, kas izgatavoti no industriāliem atkritumiem – filtrmateriāls no koksnes šķeldas pelniem un filtrmateriāls no stikla atkritumiem. Filtrmateriāls no stikla atkritumiem – putu stikls – un materiāli salīdzināšanai bija jau nodrošināti, taču bija nepieciešams izstrādāt vulkanizētu pelnu materiālu. Paraugu sagatavošanai tika izmantoti pelni, kas radušies salmu un šķeldas sadedzināšanas procesā. Lai izpētītu korelāciju starp pelnu ķīmisko sastāvu un to kušanas temperatūru, tika veikta virkne eksperimentu laboratorijas apstākļos.

Balstoties kušanas testa rezultātos, dažādu proporciju koksnes un salmu pelnu paraugi tika veidoti un testēti temperatūru diapazonā no 1200 °C līdz 1250 °C. Tika novērots, ka relatīvi zemā temperatūrā 1210–1220 °C no 100 % šķeldas sadedzināšanas pelniem ir iespējams iegūt piemērotus filtrmateriāla paraugus, kas nesabrūk un saglabā formu, tāpēc turpmākajiem testiem tika izmantoti agregāti, kas gatavoti no šķeldas pelniem, neizmantojot salmu pelnus. Šāds lēmums tika pieņemts, jo rūpnieciski vienas izejvielas pelnus, kas plašāk pieejami, varētu būt vieglāk pārstrādāt filtrmateriālā, jo tas neprasītu papildu izejvielu piejaukšanu, kā arī salmu pelni kā atkritumi ir mazāk pieejami nekā koksnes šķeldas pelni. Tika arī salīdzināti arī priekšapstrādes procesi vulkanizēta pelnu materiāla pagatavošanā. Balsoties rezultātos, turpmākajiem biometanizācijas eksperimentiem tika izvēlēts materiāls ar vienu vai diviem priekšapstrādes procesiem, kas pagatavoti 1220 °C temperatūrā. Vulkanizētu pelnu filtrmateriāls, kas nav pagatavots no neapstrādāta pelnu izejmateriāla, turpmāk filtrmateriāla testēšanai netika izmantots.

Fizikālķīmiskais filtrmateriālu raksturojums

Filtrmateriālu paraugu fizikālķīmisko īpašību veikto testu rezultāti apkopoti 2.1. tabulā. No aprēķinātajiem vislielāko īpatnējo virsmas laukumu uzrāda māla keramzīts (*EC*), vismazāko – no nesmalcinātiem pelniem veidots filtrmateriāls (*CA*).

2.1. tabula

Filtrmateriālu fizikālķīmiskās īpašības

Filtrmateriāls	Īpatnējais virsmas laukums, m ² /m ³	Tilpuma blīvums, kg/m ³	Ūdens aiztures spēja, %	Ārējā porainība, %	pH
<i>FA</i> smalcināti pelni	120,9	607,5	31,3	51	10,7
<i>CA</i> nesmalcināti pelni	107,4	460,8	33,7	52	11,8
<i>EC</i> keramzīts	242,5	292,8	11,8	50	7,6
<i>GF</i> stikla putas	200,9	175,2	13,8	55	7,2
<i>PUF</i> poliuretāna putas	350,4	12,2	9,6	79	7,0

No aprēķinātajiem rezultātiem vislielāko īpatnējo virsmas laukumu uzrāda *EC*, vismazāko – *CA*. Lai arī, aprēķinot īpatnējo virsmas laukumu, tiek ņemta vērā ārējā porainība, ir jāņem vērā arī vispārējā materiāla porainība vai virsmas raupjums, jo tas tomēr var radīt būtisku ietekmi uz aprēķinu rezultātu, jo iekšējās poras vai jebkurš cits virsmas nelīdzenums un raupjums var veidot papildu laukumu, kur mikroorganismiem ir iespējams akumulēties. Tādā gadījumā tiek palielināts mikroorganismu kontakta laukums ar gāzi, kas ir bioreaktorā, un tas nodrošinātu efektīvāku metāna ražošanas procesu. Salīdzinot īpatnējo virsmas laukumu materiāliem, kas jau tiek izmantoti apsmidzināmo biofiltru reaktoru testos, šajā pētījumā jaunizveidotajiem abu vulkanizētu pelnu filtrmateriāliem (*VAM*) tas ir optimāls, bet ne pietiekami konkurētspējīgs. Taču pārējo testēto filtrmateriālu virsmas laukums ir līdzīgs, piemēram, *EC* un poliuretāna putām (*PUF*) tas var svārstīties no 250 m²/m³ līdz 580 m²/m³.

Viens no veidiem, kā uzlabot filtrmateriālu virsmas laukumu, ir porainības un poru lieluma palielināšana. Koksnes pelnu paraugus vulkanizējot, poru veidošanos veicina CO₂ un citu gāzu atbrīvošanās, palielinot materiāla porainību un poru lielumu. Veidojot porainus materiālus, to porainību ir iespējams palielināt, materiālam pievienojot putojošos līdzekļus. Tādi var būt sintētiski vai dabīgas izcelsmes virsmaktīvas vielas. To uzdevums ir samazināt materiāla virsmas spraigumu vai vielas, kas tiek atbrīvotas ķīmisko reakciju ceļā. Biometalizācijas reaktoros liela nozīme ir arī filtrmateriāla poru lielumam. Pietiekami lielas poras materiālā kalpo kā patvērumi metanogēnajiem mikroorganismiem, tādējādi pasargājot tos no maisīšanas laikā radītās plūsmas vai bēdzes spēku ietekmes. Taču pārāk mazas poras bioplēves augšanas laikā var aizdambēties ar mikroorganismiem, turpretī pārāk lielas poras var samazināt filtrmateriāla blīvumu, tādējādi samazinot tā mehānisko izturību.

Vēl viena no metodēm, kā uzlabot virsmas laukumu, ir izstrādāt mazāka izmēra vai diametra materiāla paraugus. Tomēr ir svarīgi ievērot piesardzību, jo pārāk maza izmēra daļiņas var radīt pretestību gāzes plūsmai, kas var rezultēties spiediena kritumā bioreaktorā. Līdz ar to rodas lielāks enerģijas patēriņš, jo ir nepieciešams vairāk darbināt gāzes sūkni reaktorā.

Filtrmateriāla ārējā porainība raksturo atvērumu, poru klātbūtni uz materiāla virsmas. Šī īpašība attiecas uz poru sadalījumu un daudzumu, kas lokalizēts tieši materiāla virsmas slānī, nevis tā iekšējā struktūrā. Ārējā porainība ir būtiska, jo tā var ietekmēt filtrmateriāla mijiedarbību ar apkārtējo vidi, tostarp gāzu vai šķidrums adsorbciju. Tā ir filtrmateriāla tukšā frakcija, pa kuru var plūst gāze reaktorā. Jo lielāka vieta gāzes plūsmai reaktorā, jo mazāka ir pretestība šai plūsmai un tās iespējama izraisītā spiediena kritums reaktorā. Porainība ietekmē ne tikai gāzu plūsmu apsmidzināmo biofiltru reaktoros, bet arī šķidrums plūsmu.

No testētajiem materiāliem lielākais tilpuma blīvums novērojams *VAM*, salīdzinot ar pārējiem filtrmateriāliem. Filtrmateriālu blīvumu galvenokārt nosaka tā sastāvs, jo neorganiski materiāli bieži vien ir blīvāki nekā organiski materiāli. Blīvums lielā mērā ir atkarīgs arī no daļiņu formas, kas pelnu lodītēm ir apaļa. Tādas formas materiāla agregāti mēdz izkārtoties traukā vienmērīgāk nekā neregulāras formas filtrmateriāla daļiņas. Abu pelnu filtru materiālu – gan *CA*, gan *FA* – blīvums liecina par mazāku poru lielumu un zemāku porainību nekā citiem materiāliem, taču tas liecina arī par materiāla lielāku mehānisko izturību. Tas liecina arī par to, ka filtrmateriāli eksploatācijas laikā nesablīvēsies un nesamazinās gāzes konversācijai

nepieciešamo virsmas laukumu. Šajā gadījumā filtrmateriāliem, kuriem ir lielāks tilpuma blīvums, nav nepieciešama materiāla nostiprināšana reaktoros, jo filtrmateriāla blīvumam jābūt pietiekami lielam, lai tas reaktorā nepeldētu pa šķidruma virsu.

Starp testētajiem filtrmateriāliem lielākā ūdens aiztures spēja piemīt *CA* un *FA*, kam seko *GF*, *EC* un *PUF*. Ūdens aiztures spējai uz metanizācijas efektivitāti bioreaktorā var būt gan pozitīva, gan negatīva ietekme. Lielas ūdens aizturēšanas spējas priekšrocība ir tā, ka tā ļauj reaktorā ievietot lielāku kopējo šķidruma daudzumu, kas savukārt palielina kopējo šūnu skaitu, kas atrodas bioplēvē. Tas savukārt nodrošina lielāku metāna ražošanas ātrumu. Materiāliem, kuriem ir lielāka spēja saglabāt šķidrumu, ir nepieciešams mazāks šķidruma daudzums, kas samazina sūkņa darbināšanai nepieciešamo enerģijas daudzumu. Trūkumiem lielākai ūdens aiztures spējai ir spiediena kritums, ko rada plūsmas pretestība, un pārmērīga biomasas uzkrāšanās, kas ar to saistīta.

Būtiska filtrmateriālu īpašība ir tā ietekme uz vides pH reaktorā. *CA* un *FA* uzrāda ievērojami lielāko vides pH, salīdzinot ar pārējiem filtrmateriāliem, kuru pH ir tuvu neitrālam. Vides pH var būtiski ietekmēt metanogēno mikroorganismu dzīvotspēju un aktivitāti bioreaktorā.

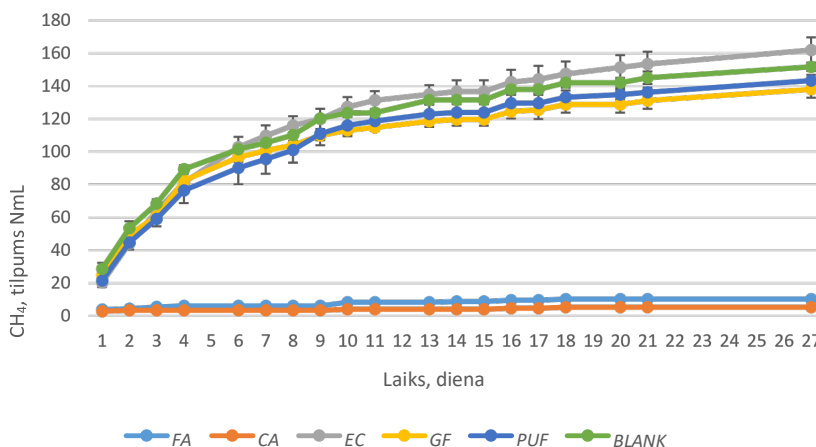
Mikroorganismi spēj vairoties un saglabāt savu vielmaiņas aktivitāti nemainīgu, ja tie tiek pakļauti īpašām pH vērtībām, kas tiem ir ideāli piemērotas. Turklāt filtrmateriāla pH var ietekmēt nelabvēlīgu vai inhibējošo savienojumu klātbūtni bioreaktorā, kā arī šo vielu daudzumu.

Biometanizācijas testa rezultāti

BIOMETĀNA POTENCIĀLS

Parauga bioķīmiskais metāna potenciāls (BMP) ir maksimālais CH_4 daudzums, ko var iegūt no noteikta substrāta. Noņemtā CH_4 daudzuma aprēķināšanai izmanto metodi, kas balstās substrāta piemērotības un kvalitātes testos, kas norāda parauga BMP. Pētījumā veiktā BPM eksperimentā visiem reaktoriem tika izmantots identisks daudzums tā paša substrāta un inokulāts no biogāzes digestāta, līdz ar to atšķīrās tikai reaktorā ievietoto filtrmateriālu veids. Tas dod iespēju salīdzināt un redzēt, vai ir iespējams izgūt lielāku metāna daudzumu no reaktoriem atkarībā no pievienotā filtrmateriāla. BMP testēšana ir izplatīta un apgūta metode, kas indikatīvi var norādīt labākos biometanizācijas risinājumus.

BMP eksperimentā saražotā metāna daudzuma vērtības bija savstarpēji līdzīgas trim filtru materiāliem – *EC*, *GF* un *PUF* (2.1. att.). Šīs vērtības tika standartizētas normālos apstākļos, 1 atm spiedienā un 273,15 K temperatūrā. Redzams, ka kontroles reaktori “*BLANK*”, kuros vispār nebija ievietots filtrmateriāls, rada līdzīgu rezultātu, kas būtiski neatšķiras no *EC*, *GF* un *PUF* filtrmateriāliem. Tikai reaktoriem ar pelnu filtrmateriāliem – *CA* un *FA* – rezultāti būtiski atšķīrās, tie praktiski gandrīz neuzrādīja saražoto metāna daudzumu, ko parāda arī 2.1. attēla grafikā redzamās līknes.



2.1. att. Vidējais metāna ražošanas apjoms un standartnovirze pieciem dažādiem materiālu paraugiem un kontrolei.

FA – sijātu un homogenizētu pelnu lodītes; *CA* – sijātu pelnu lodītes; *EC* – māla keramzīts; *GF* – putu stikls; *PUF* – poliuretāna putas; *BLANK* – kontrole.

BMP testa rezultāti parādīja, ka reaktori, kuros kā filtrmateriāls izmantots māla keramzīts, rada vislielāko metāna daudzumu. Māla keramzīts, salīdzinot ar pārējiem filtrmateriāliem, izcēlās ar lielāko īpatnējo virsmas laukumu un vienu no zemākajām ūdens aiztures spējām, taču vismazāko ārējo porainību. Vislielākais metāna apjoms tika iegūts no reaktoriem ar keramzīta filtrmateriālu. Fizikālķīmiskajos testos keramzīts uzrādīja vislielāko īpatnējo virsmas laukumu, vienu no zemākajām ūdens saistīšanas spējām un vismazāko ārējo porainību. Šie testa rezultāti liecina, ka keramzīta lielais īpatnējais virsmas laukums varētu būt veicinājis lielāku metāna veidošanos. Pārējiem filtrmateriāliem maksimālais saražotais CH₄ daudzums samazinās šādā secībā: *EC* > *BLANK* > *PUF* > *GF* > *FA* > *CA*.

Starp pirmajiem trīs materiāliem (izņemot kontroles reaktorus) nevar novērot tiešu sakarību ar fizikālķīmiskajiem parametriem. Sakarā ar to, ka BMP tests tika izstrādāts tieši substrātu kvalitātes kontrolei, to var izmantot, lai ātri un viegli noteiktu, vai substrāts ir vai nav pieņemams noteiktai mikroorganismu kultūrai, kā arī lai noteiktu, vai substrāts spēj vai nespēj ražot CH₄. Substrāts šajos reaktoros tiek sadalīts mazākās organiskās molekulās, līdz mikroorganismu vielmaiņas procesos rodas metāns. BMP tests ir vērtīgs instruments dažādu substrātu potenciālās metāna ražošanas novērtēšanai anaerobās fermentācijas procesos, un tas var palīdzēt optimizēt biogāzes ražošanu un uzlabot kopējo procesa efektivitāti.

Ņemot vērā to, ka kontroles reaktorus bez filtrmateriāla bija augstāki metāna iznākumi nekā reaktorus ar putu stiklu un poliuretāna putām, var secināt, ka BMP testā uzstādītajos reaktorus filtrmateriāli neietekmē metāna ražošanas efektivitāti. Taču ir redzams, ka divi materiāli, kuriem ir visaugstākais pH, salīdzinot ar pārējiem materiāliem, uzrādīja būtiski atšķirīgus rezultātus. Sārmaina vide varēja ietekmēt digestātā esošo metanogēno mikroorganismu dzīvotspēju un augšanu, jo to augšanas pH optimālās robežas ir vidēji no 6,8 līdz 7,2. Ņemot vērā augsto pH, mikroorganismi šādos apstākļos nevarētu veiksmīgi katalizēt metāna ražošanu.

MAKSIMĀLAIS SARAŽOTĀ METĀNA ĪPATNĒJAIS TILPUMS DAŽĀDIEM FILTRMATERIĀLIEM MANOMETRISKAJĀ TESTĀ

Pirmais posms. Bioplēves attīstība

Pēc eksperimenta sagatavošanas sākās testa pirmā daļa, kad reaktorā sākās bioplēves augšana un attīstība. Bioplēvi uzskata par nobriedušu, ja spiediena kritums vai saražotā metāna daudzums vienas dienas laikā sasniedz maksimumu. Eksperimentā katram filtrmateriālam maksimālais spiediena kritums sākotnēji tika sasniegts atšķirīgās dienās. Keramzīts to sasniedza ceturtajā dienā, savukārt stikls un poliuretāna putas – septītajā. dienā. Šie rezultāti ir svarīgi arī tāpēc, ka tie norāda, cik ātra būtu bioreaktora sagatavošana, līdz tas sasniedz maksimālo efektivitāti. Vēlāk, kad reaktori tika atkārtoti piepildīti ar gāzi, maksimālā spiediena krituma ātrums *EC*, *GF* un *PUF* kļuva vienāds, un pēc 18 dienām bija iespējams sākt testa otro posmu.

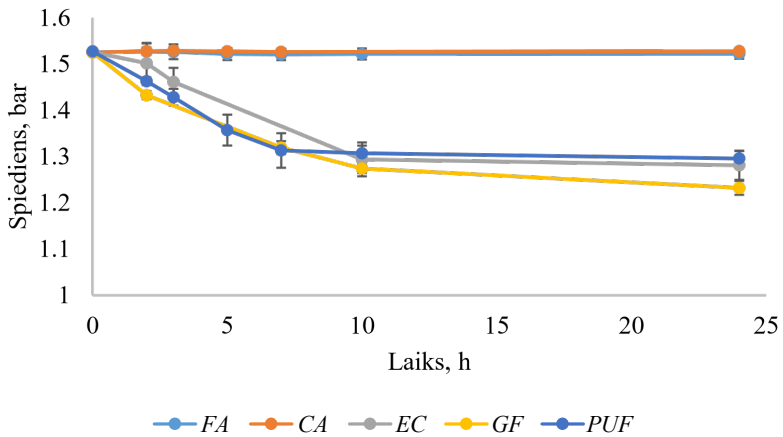
EK kontroles pudelēs bija vērojams spiediena kritums, kas, izņemot citus faktoros, varētu būt saistīts ar gāzu šķīdību šķīdumā vai materiāla pārmērīgu sablīvēšanos. Gāzu šķīdība šķīdumā ir atkarīga no daudziem un dažādiem apstākļiem – temperatūras, spiediena, gāzu polaritātes un molekulmasas, šķīduma sāļuma, pH, maisīšanas ietekmes un pieejamā šķīduma virsmas laukuma. No ievadītajām gāzēm CO_2 ir daudz augstāka šķīdība ūdenī. Inkubācijas temperatūra, spiediens, izmantotās gāzes un maisīšana visos reaktoros bija vienāda. Atšķirības nevarēja rasties pat tad, ja šķīduma sāļumu būtu ietekmējis paplašinātās māla keramzīta granulas, jo CO_2 šķīdība samazinās, palielinoties sāļumam. Galvenā ietekme uz šķīdību šādā gadījumā būtu pH un virsmas laukumam. Fizikāli ķīmiskie testi parādīja, ka keramzītam ir vislielākais virsmas laukums, kas nozīmē lielāku pieejamo ūdens virsmas laukumu, kurā izšķīdināt CO_2 , samazinot gāzes molu skaitu reaktorā un tādējādi arī spiedienu. Līdzīgu secinājumu var definēt arī par to, kur radās atšķirības starp aprēķināto un gāzu hromatogrāfijā izmērīto CH_4 saturu gāzē, kas liecina, ka turpmākajos pētījumos būtu jāizvērtē pH ietekme uz pievadīto gāzu šķīdību. Eksperimenta beigās tika izmērīts šķīduma pH, kas parādīja, ka vide māla keramzīta kontroles reaktoros patiešām bija skābāka (5,41) nekā citos reaktoros (8,27), kas liecina par lielāku izšķīdušā CO_2 daudzumu. Materiāla sablīvēšanās varēja izraisīt arī turpmāku spiediena kritumu. Materiāla sablīvēšanās samazina tukšo telpu apjomu, caur kuru var plūst šķīdums un gāze, tādējādi palielinot plūsmas pretestību un izraisot spiediena kritumu reaktorā. Šo faktoru būtu iespējams noteikt tikai nepārtrauktas darbības reaktoros, nosakot spiedienu ieplūstošajā un izplūstošajā plūsmā. Materiāla sablīvēšanās ietekmē arī enerģijas daudzumu, kas nepieciešams plūsmas uzturēšanai reaktorā.

Otrais posms. Testēšana

Pēc maksimālā spiediena krituma sasniegšanas reaktoros 24 h laikā tika iesākts eksperimenta otrais posms. Spiediena kritums tika mērīts biežāk – ik pēc pāris stundām diennaktī. Pēdējais mērījums tika veikts 24 h pēc otrā posma sākuma.

Šajā eksperimenta posmā iegūtās spiediena krituma izmaiņas redzamas 2.2. attēlā, kur parādīts spiediena krituma profils. Jau pēc spiediena krituma profila var redzēt, kuros bioreaktoros metaģenēze notiek aktīvāk. Pēc Sabatjē stehiometriskā vienādojuma tika aprēķināts īpatnējais saražotais metāna daudzums reaktoros, kas redzams 2.3. attēlā. Salīdzinot lielāko saražotā metāna daudzumu otrā posma beigās vai minimālo spiedienu, kas sasniegts

24 stundas pēc gāzes ievadīšanas, ir iespējams analizēt katra filtra materiāla kopējo metāna ražošanas potenciālu.

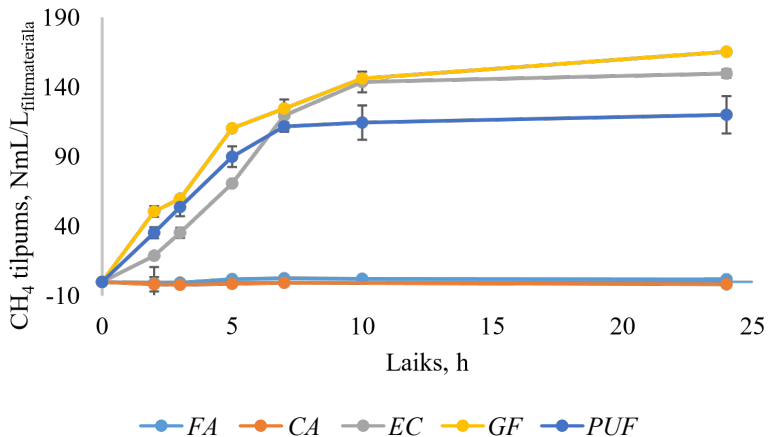


2.2. att. Spiediena kritums 100 mL bioreaktoros 24 h laikā.

FA – sijātu un homogenizētu pelnu lodītes; *CA* – sijātu pelnu lodītes; *EC* – māla keramzīts; *GF* – putu stikls, *PUF* – poliuretāna putas.

Pēc aprēķiniem manometriskajā testā visvairāk metāna tika saražots bioreaktoros ar putu stikla filtrmateriālu, vismazāk – bioreaktoros ar vulkanizētu pelnu filtrmateriāliem.

Maksimālais saražotā metāna daudzums, salīdzinot filtrēšanas materiālus, samazinājās šādā secībā: $GF > EC > PUF > FA > CA$.



2.3. att. Aprēķinātais kumulatīvais saražotā biometāna daudzums 100 mL bioreaktoros 24 h.

FA – sijātu un homogenizētu pelnu lodītes; *CA* – sijātu pelnu lodītes; *EC* – māla keramzīts; *GF* – putu stikls; *PUF* – poliuretāna putas.

Manometriskā testa rezultāti atbilst izmantoto materiālu ūdens aizturēšanas spējai, izņemot materiālus, kas tika veidoti no koksnes pelniem – *CA* un *FA*. Saskaņā ar iepriekš izdarīto secinājumu iemesls, kāpēc reaktoros, kuros izmantoti vulkanizētu pelnu materiāli, metāns neveidojās tādā pašā apjomā kā BMP testā, ir materiāla ķīmisko īpašību ietekme uz tajos esošo mikroorganismu populāciju. Fakts, ka ūdens aizturēšanas spēja, šķiet, korelē ar manometriskā testa rezultātiem, sniedz izskaidrojumu tam, kāpēc BMP testā tika iegūti atšķirīgi rezultāti. Turpretī BMP testā izmantotajos reaktoros bija ciets substrāts, bet manometriskajā testā izmantotajos reaktoros kā substrāts tika izmantota gāze. Ūdens daudzumu, kas paliek uz filtrējošā materiāla pēc plūsmas apturēšanas, nosaka ūdens aiztures spēja. Tā rezultātā veidojas virsma, kas nodrošina masas pārneši starp gāzi un šķidrumu. Tā kā BMP testos filtrmateriāls bija iegremdēts, gāzes un šķidruma saskares virsmu veidoja tikai augšējais šķidruma slānis, kas palika reaktora augšā. Manometriskā testa rezultātā šķidruma un gāzes saskarsmes virsma bija ievērojami lielāka, kas varētu būt iemesls augstākam metanoģenēzes aktivitātes līmenim, salīdzinot ar BMP testu. Šī atšķirība starp saskares virsmu, iespējams, ir galvenais faktors, kas veicināja dažādus abu testu rezultātus, norādot, ka filtrmateriāla struktūra un saskares apstākļi būtiski ietekmē mikroorganismu aktivitāti un gāzu apmaiņu.

Līdzīgā pētījumā bioreaktors ar poliuretāna iesaiņojumu bija visproduktīvākais metāna iznākums, savukārt ar māla materiāliem pildītajos bioreaktoros tika saražots vismazāk metāna. Tomēr nav iespējams secināt atšķirību iemeslus, jo nav zināmas otra pētījuma materiālu fizikāli ķīmiskās īpašības. Manometriskā metode ir piemērotāka filtrmateriālu testēšanai apsmidzināmo reaktoru biometanizācijas kontekstā, jo tajā kā substrāts tiek izmantota gāze, kas atbilst tehnoloģijai. Salīdzinoši, filtrmateriāla klātbūtne būtiski neietekmēja metanoģenēzes efektivitāti BMP testā, jo kontroles bioreaktoros bez filtrmateriāla bija līdzīgi metāna iznākumi.

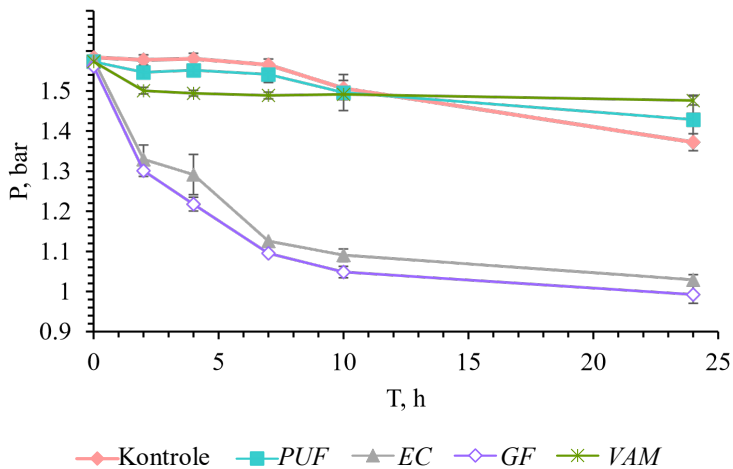
Biometanizācija paaugstinātā pH vidē ar monokultūrām un biogāzes digestātu

Pēc sākotnējiem biometanizācijas manometriskajiem testiem tika pieņemts lēmums atkārtoti pārbaudīt filtrmateriālus, šoreiz īpašu uzmanību pievēršot mikroorganismu nozīmei biometanizācijas efektivitātē un izmantojot lielākus bioreaktorus, lai samazinātu mērījumu kļūdu gumijas korķīšu caurduršanas brīdī. Eksperiments tika sadalīts divās daļās. Pirmajā daļā kā inokulāts tika izmantots biogāzes digestāts, jo tas satur dažādas mikroorganismu sugas, kas ir iesaistītas visos četros anaerobās fermentācijas posmos un arī citos zinātnieku pētījumos bieži vien tiek izmantots biogāzes digestāts. Digestāta mikroorganismu daudzveidība palielina to spēju pielāgoties dažādiem apstākļiem, jo tie jau ir pielāgojušies biogāzes ražošanas procesā. Otrajā eksperimenta daļā tika izmantotas *Methanobacterium sp.* monokultūras, kas iepriekš tika pavairotas striktā anaerobā vidē, izmantojot CO_2/H_2 gāzu maisījumu. *Methanobacterium alcaliphilum* celmi šādā kontekstā iepriekš nav pētīti. Šo mikroorganismu spēja augt, ja ir augsts pH līmenis, piedāvā potenciālu to izmantošanai biometanizācijas procesā ar vulkanizētu pelnu filtrmateriāliem, kas līdz šim eksperimentos neuzrādīja labus rezultātus ar digestātu. Digestātā esošie mikroorganismi var nodrošināt plašāku metabolo ceļu klāstu, kas savukārt var veicināt efektīvāku biogāzes ražošanu. Tajā pašā laikā *Methanobacterium sp.* monokultūras

izmantošana dod iespēju precīzāk kontrolēt fermentācijas procesu, ļaujot detalizētāk izvērtēt konkrētu mikroorganismu ietekmi uz biometanizācijas efektivitāti, īpaši kombinācijā ar dažādiem filtrmateriāliem. Šie rezultāti sniedz lielāku izpratni par mikroorganismu un filtrmateriālu nozīmi biometanizācijā. *Methanobacterium* sp. mikroorganismi izceļas ar spēju izturēt augstu pH līmeni un attīstīties pat ļoti sārmainos apstākļos. Šajās baktēriju kopienās dominē hidrogenotrofā metanoģenēze, kas kļūst par galveno metanoģenēzes veidu, kad pH vērtības pārsniedz 9. Šie mikroorganismi ne tikai spēj pielāgoties ievērojami augstam pH līmenim, bet arī spēj ilgu laiku izdzīvot tik sārmainā vidē. Šādu monokultūru izmantošana pētījumā, kas iztur augstu pH, paplašina izpratni par potenciālajiem to lietojumiem biometanizācijas kontekstā, kā arī dažādās citās nozarēs.

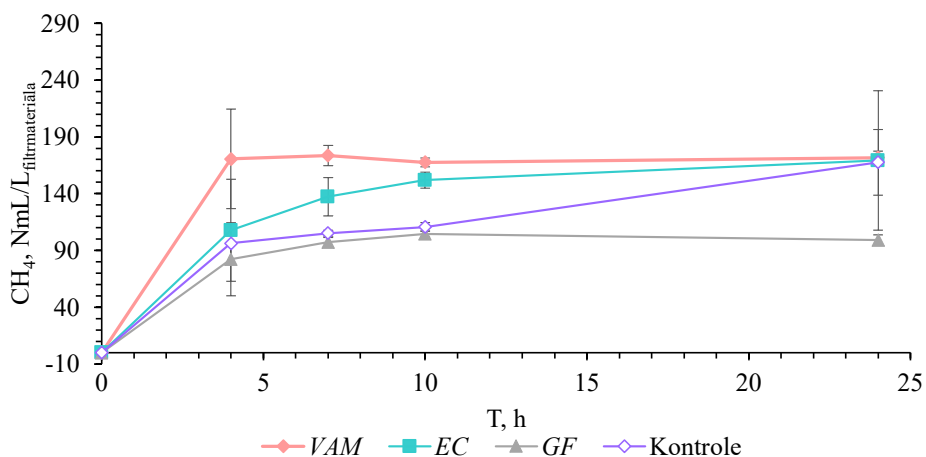
BIOGĀZES DIGESTĀTS

Šajā eksperimenta posmā iegūtās spiediena krituma izmaiņas redzamas 2.3. attēlā, kurā parādīts spiediena krituma profils. Jau pēc spiediena krituma profila var redzēt, kuros bioreaktoros metanoģenēze notiek aktīvāk. Pēc Sabatjē stehiometriskā vienādojuma tika aprēķināts īpatnējais saražotais metāna daudzums reaktoros (2.4. att.). Rezultātos ar digestātu kā inokulātu redzams, ka bioreaktoros ievērojami labus rezultātus var novērot paraugos, kur kā filtrmateriāls tika izmantots putu stikls un mala keramzīts. Grafikā (2.3. att.) redzamas spiediena izmaiņas manometriskā testa otrajā fāzē, kur redzams, ka *VAM* neuzrāda lielu spiediena kritumu, līdzīgi kā iepriekšējos eksperimentos, kuros tika izmantoti pelnu filtri.



2.3. att. Spiediena kritums 250 mL bioreaktoros ar digestātu. Kontrolē – bez materiāla; *PUF* – poliuretāna putas; *EC* – keramzīts; *GF* – stikla putas; *VAM* – vulkanizēts pelnu materiāls.

Salīdzinot kontroles bioreaktoros, kas bija bez filtrmateriāla un ar *EC* un *GF* materiāliem, var secināt, ka to klātbūtnē spiediena kritums ir būtiski lielāks nekā kontroles bioreaktoros bez filtrmateriāla. Tas liecina, ka *EC* un *GF* būtiski veicina biometanizācijas efektivitāti *ex situ* apsmidzināmo biofiltru reaktoros.



2.4. att. Aprēķinātais saražotā CH₄ īpatnējais tilpums 250 mL reaktoros ar digestātu. Kontrolle – bez materiāla; EC – keramzīts; GF – putu stikls; VAM – vulkanizēts pelnu materiāls. Kļūdas stabiņi – standartnovirze. Maksimālais saražotā metāna daudzums samazinājās starp GF > EC > Kontrolle > PUF > VAM filtrēšanas materiāliem.

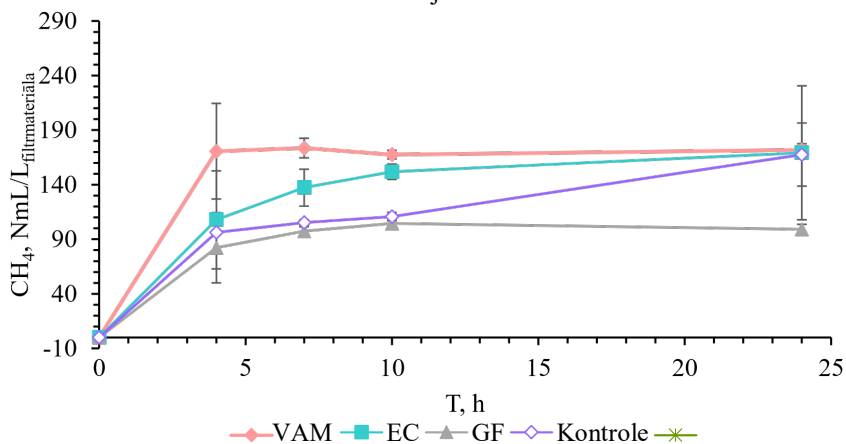
Pēc stehiometriskajiem aprēķiniem tika aprēķināts kumulatīvais CH₄ daudzums bioreaktoros, un tas parāda, ka vislielāko tilpumu metāna izdevās iegūt bioreaktoros ar GF un EC materiāliem. To rezultāti eksperimenta beigās bija ļoti līdzīgi, atšķirās tikai pirmo stundu rezultāti, kur EC materiālam metanoģenēze notika nedaudz lēnākā gaitā nekā GF materiāla reaktoros (2.4. att.).

Nākamais augstākais biometāna saturs pēc aprēķiniem novērojams reaktoros bez filtrmateriāla. Tas gan bija trīs reizes mazāks nekā paraugos ar EC un GF. Zemākie aprēķinātā metāna rezultāti attiecīgi bija bioreaktoros, kuros tika izmantots VAM materiāls, līdzīgi kā līdz šim veiktajos eksperimentos. Tas izskaidrojams ar augsto vides pH reaktoros, kas traucē mikroorganismu attīstību tajos. Aprēķinātais kumulatīvais saražotā metāna daudzums reaktoros samazinājās starp GF > EC > Kontrolle > PUF > VAM filtrmateriāliem.

METHANOBACTERIUM ALCALIPHILUM CELMI

Eksperimenta otrajā daļā tika izmantoti divi *Methanobacterium alcaliphilum* celmi ar domu, ka to spēja pielāgoties sārmainai videi sniegtu iespējas VAM filtrmateriāla izmantošanā biometanizācijā. Manometriskā testa pirmajā posmā, kur tiek veidota bioplēve un maksimāli pavairoti mikroorganismi reaktoros, jau tika secināts, ka rezultāti būs zemāki, jo piebarošanas posms noritēja 40 dienas, kas bija divas reizes ilgāk, nekā izmantojot biogāzes digestātu. Arī tad spiediena maksimālais kritums nebija tik liels kā ar digestātu. Tika pieņemts lēmums sākt otro posmu manometriskajā testā, lai varētu salīdzināt vismaz filtrmateriālu iedarbību uz metanoģenēzi, izmantojot *Methanobacterium alcaliphilum* celmus. Jau pirmajā fāzē bija lielas

atšķirības starp digestātu un monokultūrām, tāpēc ir skaidrs, ka tie savstarpēji nekonkurē un digestāta izmantošana ir daudz efektīvāks risinājums.



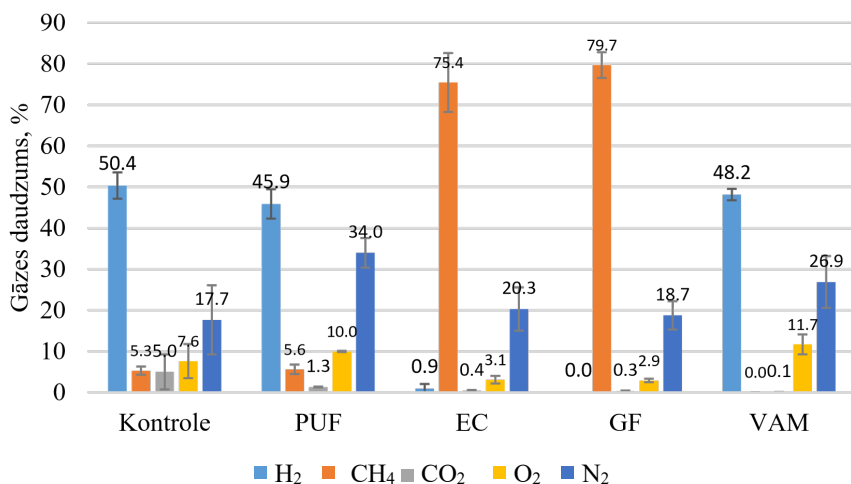
2.5. att. Aprēķinātais saražotā CH_4 īpatnējais tilpums 250 mL reaktoros ar digestātu.

Kontrolē – bez materiāla; *EC* – keramzīts; *GF* – stikla putas; *VAM* – vulkanizēts pelnu materiāls.

Testa otrajā fāzē, kad sākas mērījumu veikšana 24 h ietvaros, redzams, ka līdzīgs spiediena kritums bija visos reaktoros, arī reaktoros bez materiāla, taču kopumā tas bija neliels. Pēc stehiometriskajiem aprēķiniem tika aprēķināts kumulatīvais CH_4 daudzums bioreaktoros, un tas parāda, ka vislielāko vidējo metāna daudzumu izdevās iegūt visos bioreaktoros ar *VAM*, *EC*, *GF* materiāliem un kontroles bioreaktoros (2.5. att.). Jāņem vērā, ka, jo mazāks saražotā metāna daudzums, jo lielāka ir iespējama mērījumu kļūda manometriskajā testā. Tas skaidrojams ar to, ka pie lielāka spiediena ir iespējama lielāka gāzes noplūde mērījumu veikšanas brīdī. Taču indikatīvi jau var redzēt, vai reakcija bioreaktorā aktīvi notiek, vai nenotiek.

Rezultātu validācija

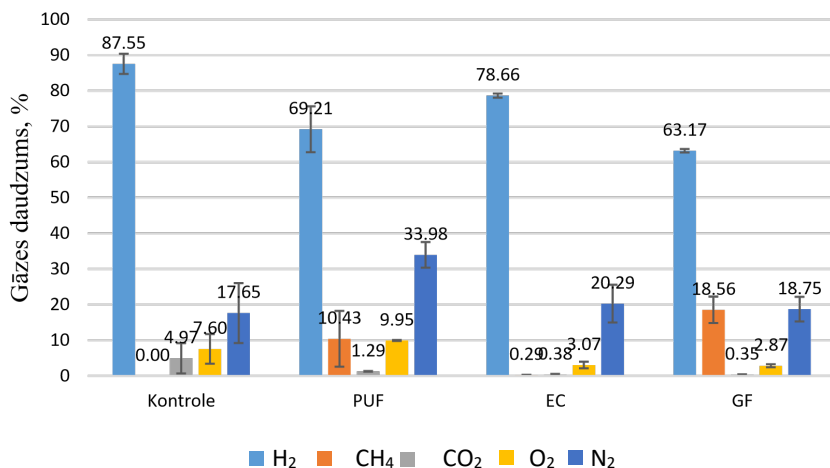
Lai validētu manometriskā testa *ex situ* biometanizācijas eksperimentā aprēķinātos rezultātus, iegūtie galaprodukta gāzu paraugi tika testēti ar gāzu hromatogrāfu, lai noteiktu to ķīmisko sastāvu. Ar gāzu hromatogrāfa palīdzību ir iespējams analizēt H_2 , N_2 , CO , CH_4 un CO_2 , sastāvu paraugos. Analīžu rezultāti no paraugiem, kuros kā inokulāts tika izmantots biogāzes digestāts, lielākais metāna daudzums bija reaktoros ar *EC* un *GF* filtrmateriāliem. Pārējos reaktoros metāna daudzums bija zems, *VAM* reaktoros metāns gāzu paraugos netika konstatēts. Paraugos no reaktoriem ar putu stiklu bija vislielākais vidējais CH_4 daudzums – 79,7 %, nākamais lielākais vidējais CH_4 daudzums bija ar *EC* pildītos reaktoros – 75,4 %. Šajā eksperimentā netipiski zems CH_4 iznākums tika konstatēts *PUF* materiālam – 5,6 %, kas ir gandrīz tik pat, cik kontroles reaktoros bez filtrmateriāla – 5,3 % (2.6. att.).



2.6. att. Gāzu paraugu ķīmiskais sastāvs paraugos, kuros izmantots biogāzes digestāts. PUF – poliuretāna putas; EC – keramzīts; GF – stikla putas; VAM – vulkanizēts pelnu materiāls.

H₂ daudzums reaktoros ar lielāko CH₄ daudzumu ir viszemākais, kas liecina par to, ka mikroorganismi ir to izmantojuši. Paraugos, kuros bija zema CH₄ koncentrācija, bija ievērojams daudzums neizmantota H₂. Ja iepriekšējos eksperimentos PUF uzrādīja labākus rezultātus, tad šis iznākums varētu būt izņēmums. Mikroorganismu dzīvotspēju varēja ietekmēt augšanas apstākļi un barības vielu daudzums. Ja bioreaktorā mikroorganismi ir savairojušies lielā daudzumā, tad tiem ir nepieciešamas papildu barības vielas.

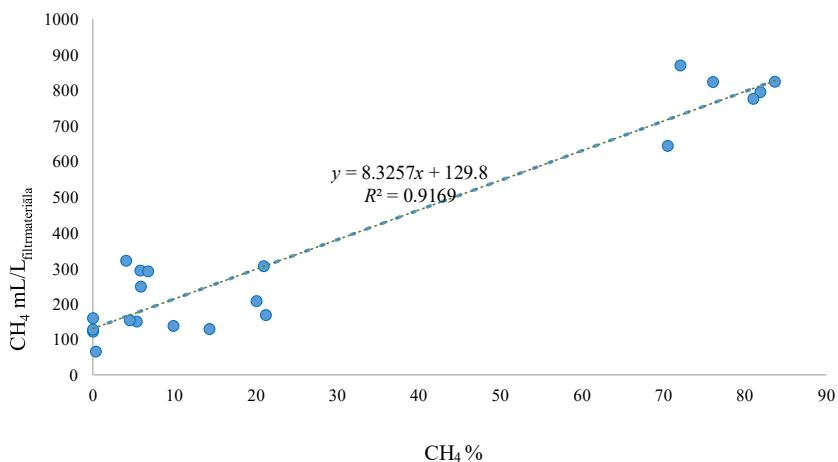
Gāzu analīžu rezultāti testā ar *Methanobacterium alcaliphilum* monokultūrām uzrādīja nelielu metāna klātbūtni (2.7. att.).



2.7. att. Gāzu sastāvs paraugiem, kuros izmantota mikroorganismu monokultūra.

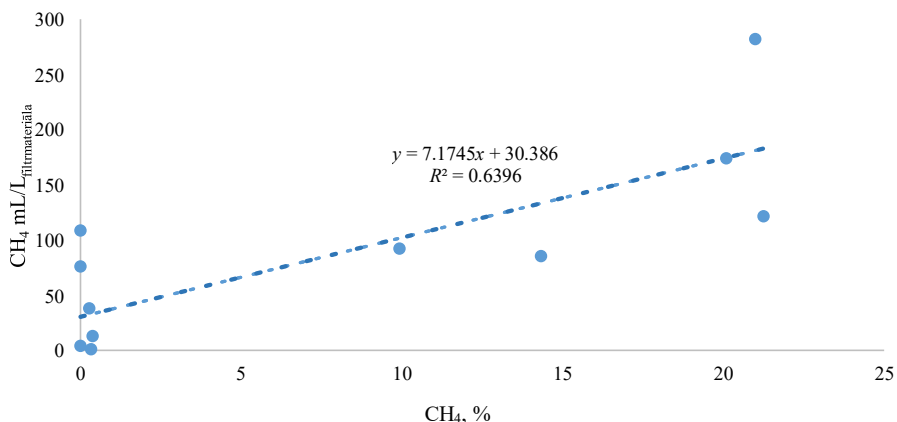
Lielākais CH₄ daudzums bija *GF* materiālam – 18,56 %, otrs lielākais CH₄ daudzums bija *PUF* materiālam – 10,43 %, savukārt mazākais daudzums konstatēts reaktoros ar *EC* materiālu – 0,29 %. Kontroles reaktors netika konstatēts CH₄. Pēc H₂ daudzuma paraugos var redzēt, ka gāzes nav izreaģējušas. CO₂ daudzums visos paraugos ir zems, kas liecina par to, ka tas varētu būt izšķīdis šķidrā barotnē. Salīdzinot gāzu sastāvu tikai šajā testā, var redzēt, ka ar *Methanobacterium alcaliphilum* monokultūrām inokulētos reaktoros ir notikusi efektīvāka metanoģenēze nekā kontroles reaktorā bez materiāla. Var secināt, ka *Methanobacterium alcaliphilum* monokultūrām filtrmateriālu izmantošana veicina metāna ražošanas efektivitāti.

Lai noteiktu saistību starp aprēķināto un analizēs noteikto CH₄ daudzumu eksperimentā, kurā kā inokulāts izmantots digestāts, pēc eksperimentiem un hromatogrāfijas tika veikta datu regresijas analīze. Analīzes rezultātā noteikta sakarība starp aprēķināto un noteikto CH₄ daudzumu paraugos. Pamatojoties uz regresijas analīzi, kuras rezultātā iegūts determinācijas koeficients 0,92, var secināt, ka starp aprēķināto un analizēs noteikto CH₄ daudzumu pastāv ļoti spēcīga lineāra sakarība. Tas nozīmē, ka aptuveni 92 % no metāna daudzuma (x) variācijas paraugos var izskaidrot ar aprēķināto CH₄ daudzumu (y). Aprēķinātais CH₄ daudzums precīzi prognozē faktiski noteikto metāna daudzumu, kas liecina par augstu modeļa uzticamību un atbilstību. Regresijas modelis parāda lineāru sakarību, kas liecina, ka tas labi atbilst novērotajiem datu punktiem. Atšķirība starp izmērītajiem un aprēķinātajiem datiem redzama 2.8. attēla grafikā.



2.8. att. Attiecība starp aprēķināto CH₄ daudzumu (mL/L_{materiāla}) un noteikto CH₄ daudzumu (%) paraugiem, kuriem izmantots digestāts.

Lai noteiktu saistību starp aprēķināto un analizēs noteikto CH₄ daudzumu eksperimentā, kurā kā inokulāts izmantotas monokultūras, pēc eksperimentiem un hromatogrāfijas arī tika veikta datu regresijas analīze. Kā redzams 2.9. attēlā, iegūta lineāra saistība, un determinācijas koeficients ir 0,64. Tas ir mazāks, salīdzinot ar datiem, kas iegūti eksperimentā ar digestātu. Šādi rezultāti ir skaidrojami ar to, ka spiediena mērījumos iegūtās skaitliskās vērtības ir zemākas un neprecīzākas, jo iespējama lielāka mērījumu kļūda.



2.9. att. Attiecība starp aprēķināto CH₄ daudzumu (mL/L_{materiāla}) un noteikto CH₄ daudzumu (%) paraugiem, kuriem izmantotas monokultūras.

Tas var būt izskaidrojams ar lielāku mērījumu neprecizitāti, īpaši, ja paraugos bija mazāk metāna. Lai uzlabotu modeļa ticamību, būtu nepieciešams paplašināt datu kopu, uzlabot mērījumu precizitāti un veikt papildu analīzes. Taču abos gadījumos – gan ar digestātu, gan monokultūrām – sakarība ir lineāra, kas apliecina modeļa ticamību un apstiprina to, ka manometriskais tests ir piemērots, lai noteiktu metanoģenēzes aktivitāti šāda tipa reaktoros, kas uzstādīti laboratorijas apstākļos. Tas paver plašākas iespējas veikt dažādus citus pētījumus līdzīgos apstākļos. Filtrmateriālu piemērotību ir iespējams testēt mazos bioreaktoros, neveicot lielus ieguldījumus rūpnieciskos testos biometāna ražotnēs.

Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīzes rezultāti

KRITĒRIJU SVARI

Lai noteiktu katra kritērija svarus, kas atspoguļo katra izvēlētā kritērija relatīvo nozīmi pētījumā, tika veikta aptaujas rezultātu apkopošana un analīze. Lai aprēķinātu katra kritērija svaru, tika izmantota anketa. Dalībniekiem tika lūgts novērtēt vairāku kritēriju nozīmīgumu, un rezultāti tika izmantoti, lai noteiktu katra kritērija svaru. Pēc tam vērtējumi tika normalizēti tā, lai visu kritēriju kopējais svars būtu vienāds ar 1.

2.2. tabula

Kritēriju svari			
Kritērija numurs	Kritērijs	Mērvienība	Svars
C1	Vidējais biometāna iznākums	NmL/L _{materiāla}	0,125
C2	Ūdens aizture	%	0,084
C3	Materiāla ražošanai nepieciešamā enerģija	°C	0,102
C4	Izejvielu izmaksas	EUR m ⁻³	0,112
C5	Materiāla pieejamība	t/gadā	0,101

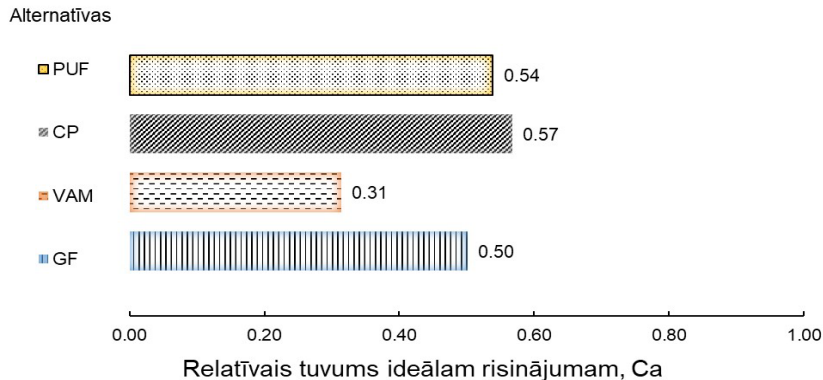
2.2. tabulas turpinājums

C6	Materiāla izcelsme	0–1	0,091
C7	pH	0–14	0,099
C8	Ārējā porainība	%	0,099
C9	Tilpuma blīvums	kg m ⁻³	0,081
C10	Īpatnējais virsmas laukums	m ² m ⁻³	0,105

Lai aprēķinātu katra kritērija svarus, kas raksturo to relatīvo nozīmīgumu izpētē, tika apkopoti un analizēti anketas rezultāti. Šie rezultāti apkopoti 2.2. tabulā. Katra kritērija svars tika noteikts, izmantojot aptaujas metodi, kurā dalībniekiem tika lūgts novērtēt dažādu kritēriju nozīmīgumu. Pēc tam iegūtie novērtējumi tika normalizēti, lai visu kritēriju svaru summa būtu vienāda ar 1, tādējādi nodrošinot to, ka kopējā vērtējumā katrs kritērijs ir pārstāvēts proporcionāli. Vidējai biometāna iznākuma vērtībai tika piešķirts visaugstākais svars – 0,125, tādējādi izceļot tās būtisko nozīmi materiāla kopējā iznākuma noteikšanā.

TOPSIS REZULTĀTI

TOPSIS daudzkritēriju analīzes aprēķinu rezultāti, kas veikti, lai novērtētu biometanizācijai paredzētos materiālus, redzami 2.10. attēlā.



2.10. att. TOPSIS analīzes rezultāti.

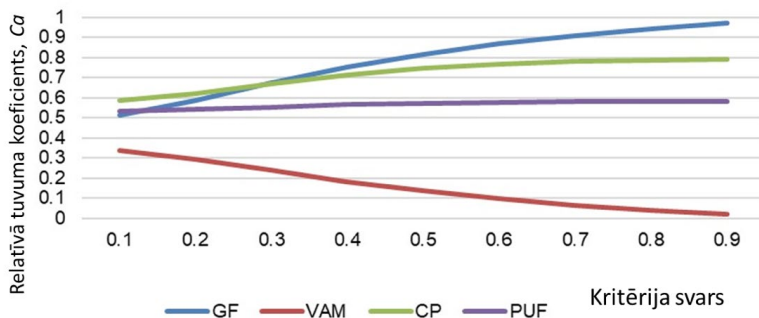
Relatīvās tuvības koeficients ir no nulles līdz vienai vienībai, un augstāka vērtība liecina par labvēlīgāku alternatīvu. *PUF* – poliuretāna putas; *CP* – keramzīta granulas; *VAM* – vulkanizēts pelnu materiāls; *GF* – stikla putas.

Ņemot vērā relatīvās tuvības koeficienta vērtības (2.10. att.), ir redzams, ka keramzīta paletes un poliuretāna putas atrodas vistuvāk ideālajam rezultātam. No visām analizētajām alternatīvām keramzīta paletēm tika aprēķināts koeficients 0,57, kas liecina par šī materiāla vislielāko piemērotību, izmantojot to kā filtrmateriālu biometanizācijas procesā, ņemot vērā

pētījumā noteiktos kritērijus. Būtiski ir atzīmēt, ka relatīvās tuvības koeficienti ir līdzīgi arī diviem citiem materiāliem – poliuretāna putām un stikla putām. Poliuretāna putu vērtība atšķiras no keramzīta paletēm tikai par 0,03, savukārt stikla putas ir trešajā vietā ar koeficienta atšķirību 0,07, salīdzinot ar māla keramzīta granulām. Šie rezultāti liecina, ka visas trīs alternatīvas – māla keramzīta granulas, poliuretāna putas un stikla putu materiāls – ir tuvu ideālajam risinājumam, kas nozīmē, ka šie materiāli var demonstrēt labas īpašības kā biometanizācijas filtrmateriāls *ex situ* apstākļos. Tomēr jāatzīmē, ka stikla putu un māla keramzīta granulām iegūtās vērtības ir ļoti tuvas poliuretāna putu vērtībām, kas liecina, ka materiālu ilgtspējas novērtējuma hierarhija var mainīties, attīstoties šo materiālu ražošanas metodēm un tehnoloģijām.

KRITĒRIJU JUTĪGUMA ANALĪZE

Lai nodrošinātu pētījuma secinājumu lielāku precizitāti, tika veikta visaptveroša jutīguma analīze, aptverot visus kritērijus katrā no izpētītajām aspektu kategorijām. Šī analīze sniedza iespēju precīzi novērtēt katra kritērija ietekmi uz pētījuma galarezultātiem. Izmantojot dažādus piešķirto svaru scenārijus, tika identificēti būtiskākie parametri, kas visvairāk ietekmēja iznākumu. Šāda rūpīga pieeja ievērojami uzlaboja secinājumu stabilitāti un ticamību, kā arī padziļināja izpratni par iegūtajiem rezultātiem. 2.11. attēlā redzams piemērs, kurā ir izmaiņas, kas rodas, mainoties kritēriju svaram no 0,1 līdz 0,9 Attēlā parādīta ietekme uz rezultātiem, mainoties biometāna ekstrakcijas kritērija svaram. Lai arī relatīvās tuvuma koeficientu izmaiņas dažādām alternatīvām ir atšķirīgas, putu stikla gadījumā rezultāti liecina par kritērija pieaugumu, kas savukārt liecina, ka stikla putas varētu būt piemērota izvēle biometanizācijas procesiem šajā gadījumā.



2.11. att. C1 – Rezultātu izmaiņas, mainot biometāna iznākuma svaru no 0,1 līdz 0,9

Palielinot izejvielu izmaksu kritērija svaru, keramzīta granulu koeficienta vērtība krasi samazinās. Tomēr, palielinot materiāla pieejamības kritērija svaru, samazinās visu alternatīvu relatīvās tuvības koeficienti, izņemot keramzīta granulas. Samazinot materiāla ražošanai nepieciešamās enerģijas svara nozīmi materiāla ražošanā, samazinās visu alternatīvu koeficientu vērtība, izņemot poliuretāna putas. Pretēji rezultāti rodas, ja tiek palielināts

materiāla avota kritērija svars. Samazinās visu alternatīvu relatīvās tuvības koeficienti, izņemot poliuretāna putas.

Palielinot pH vērtības, ārējās porainības, tilpummasas blīvuma un īpatnējās virsmas laukuma svarus, poliuretāna putu vērtība palielinās, savukārt vulkanizēto pelnu materiāla vērtība krasi samazinās visiem šiem kritērijiem. Šos tehniskos parametrus varētu uzlabot dažiem no izstrādes procesā esošajiem materiāliem.

Pamatojoties uz jutīguma analīzi, optimālais rezultāts uzrāda vislielāko augšupvērsto līkņu skaitu un demonstrē spēcīgu spēju pielāgoties kritēriju izmaiņām. Pozitīvo līkņu skaits katram variantam tika atņemts no negatīvo līkņu skaita visos grafikos. Optimālajai izvēlei ir lielākais skaitliskais rezultāts. Šis skaitliskais rezultāts liecina, ka optimālā izvēle ir viselastīgākā un spēj ātri pielāgoties dažādiem kritērijiem piešķirto svaru izmaiņām.

2.3. tabula

Jutības analīzes rezultāti				
	Putu stikls	Vulkanizēts pelnu materiāls	Māla keramzīts	Poliuretāna putas
Augšupejošu līkņu skaits	4	1	4	8
Lejupejošu līkņu skaits	6	9	6	2
Starpība	-2	-8	-2	6

Jutīguma analīzes rezultāti (2.3. tab.) sniedz vērtīgu ieskatu par katra alternatīvā materiāla veiktspēju. Pamatojoties uz augšupvērsto līkņu skaitu, poliuretāna putas kļūst par labāko izvēli. Pēc tam seko stikla putas un keramzīta granulas, kas uzrāda daudzsološus rezultātus. Tomēr vulkanizēto pelnu materiāls, salīdzinot ar tām, ir sliktāks, liecinot, ka ir nepieciešami uzlabojumi tehniskajos un veiktspējas aspektos, lai to varētu uzskatīt par dzīvotspējīgu risinājumu.

Saskaņā ar relatīvās tuvības koeficienta vērtībām ir skaidrs, ka māla keramzīts un poliuretāna putas ir vislīdzīgākās ideālajam risinājumam. *CP* koeficients ir 0,57, kas padara to par vispiemērotāko filtrmateriālu biometanizācijai, pamatojoties uz norādītajiem kritērijiem. Atšķirība starp *PUF* un *CF* ir 0,03, bet *GF*, kas ierindojas trešajā vietā, atšķiras no *CP* par 0,07. No četriem izvēlētajiem variantiem *PUF* sniedz vislabvēlīgākos rezultātus jutīguma analīzē, parādot tā stabilu spēju pielāgoties kritēriju svaru izmaiņām. Arī *GF*, kas izgatavots no pārstrādāta stikla, uzrāda izcilu veiktspēju.

Vairākas nevēlamas īpašības un faktori kavē vulkanizētu koksnes pelnu kā filtrmateriāla izmantošanu biometanizācijas vajadzībām. Patlaban tas tiek pilnveidots, un to var uzlabot, lai tas labāk atbilstu biometanizācijas tehnoloģijas prasībām. Vulkanizēto koksnes pelnu materiālu ir iespējams atlasīt biometanizācijai, uzlabojot specifiskās vērtības. Piemēram, mainot pH vērtību, var uzlabot mikroorganismu augšanu un biometāna ieguvī. Pievienojot putojošās vielas, var mainīt porainību, palielinot īpatnējo virsmas laukumu. Tas uzlabo materiāla efektivitāti. Turpinot pētījumus un materiāla pilnveidi, vulkanizētam koksnes pelnu materiālam ir potenciāls kļūt arī par ļoti efektīvu un ilgtspējīgu risinājumu biometanizācijas procesos. Attīstot un pilnveidojot tādus inovatīvus materiālus kā vulkanizēti koksnes pelni un stikla putas, ir iespējams atkārtoti izmantot koksnes pelnu atkritumus un stikla atkritumus biometanizācijas vajadzībām.

SECINĀJUMI

1. Sākotnējā hipotēze, ka no pelnu un stikla atkritumiem pagatavotu filtrmateriālu izmantošanai biometanizācijas veikšanā pilienvēda bioreaktors ir potenciāls, ir apstiprinājies daļēji. Putu stikla materiāls ir piemērots filtrmateriāls biometanizācijai *ex situ* bioreaktors, bet no pelnu atkritumiem veidots materiāls neuzrādīja labus rezultātus.
2. Pētījumi par biometanizācijas tehnoloģiju izstrādi liecina, ka būtiska nozīme ir piemērota filtrmateriāla izvēlei, jo tas tieši ietekmē mikroorganismu imobilizāciju un metanoģenēzes efektivitāti apsmidzināmo biofiltru reaktoros. Šajā pētījumā tika testēti tādi no atkritumiem iegūti materiāli kā putu stikls un vulkanizēts koksnes pelnu materiāls, kā arī salīdzināšanai pētīti tādi materiāli kā poliuretāna putas un māla keramzīta granulas, lai noteiktu to piemērotību biometanizācijai.
3. Pētījuma rezultāti parāda, ka stikla putas ir īpaši efektīvs filtrmateriāls, nodrošinot līdz pat 84 % CH₄ saturu galaproduktā, kas apliecina to potenciālu būt piemērotiem biometanizācijas tehnoloģijās.
4. Pelnu atkritumu pārstrāde saistīta ar to specifiskajām ķīmiskajām īpašībām. Lai gan pelnu agregāti uzrāda labus fizikālos parametrus, tie ir sārmaini un satur dažādus smagos metālus, kas, samazinot vides pH, var izskaloties un negatīvi ietekmēt dzīvos organismus. Tāpēc nav nostabilizējušies tālākie pelnu atkritumu pārstrādes tehnoloģijas un izmantošanas mērķi. Šajā pētījumā tika noskaidrots, ka pelnu filtrmateriāli pagaidām nav piemēroti arī metanoģenēzes nodrošināšanai.
5. Putu stiklu var uzskatīt par inovatīvu filtrmateriālu, ko var izmantot biometanizācijai. Turklāt stikla putām piemīt lieliskas īpašības, piemēram, augsta porainība, laba siltumizolācija un zems blīvums, kas padara tās par ideālu izvēli apsmidzināmo biofiltru filtru reaktoriem. Turklāt stikla putu inovatīvā kvalitāte uzsver iespēju radīt vērtību no citādi izmestiem resursiem, ievērojot aprites ekonomikas idejas. Tādējādi stikla putas, pateicoties to priekšrocībām un pozitīvajai ietekmei uz vidi, ir piemērots risinājums apsmidzināmo biofiltru reaktoriem. Atkritumu materiālu izmantošana biometanizācijā *ex situ*, kur tie kalpo kā nesējmateriāls, ne tikai uzlabo procesa vispārējo efektivitāti, bet arī veicina ilgtspējīgu praksi.
6. Veicot biogāzes digestāta inokulāta un *Methanobacterium alcaliphilum* celmu salīdzinājumu, tika konstatēts, ka biogāzes digestāta inokulāts saražo vairāk biometāna nekā *Methanobacterium alcaliphilum* celmi. Šie rezultāti liecina par nepieciešamību veikt turpmākus pētījumus par mikroorganismu kultūru sastāvu, īpaši lielākos reaktoros, kur mikroorganismu kopienas var ievērojami ietekmēt metanoģenēzes procesu.
7. Neatkarīgi no izmantotā inokulāta (digestāts vai mikroorganismu monokultūra) pelnu filtrmateriāli neuzrāda labus rezultātus metanoģenēzē. Mazākos reaktoros precizitāte samazinās gāzu noplūdes dēļ, kas apgrūtina precīzu gāzu sastāva noteikšanu un var ietekmēt eksperimentālos rezultātus.
8. Manometriskā metode ir piemērotāka filtrmateriālu testēšanai pilienvēda bioreaktors, jo tajā par substrātu tiek izmantota gāze. Gāzes kā substrāta izmantošana ir svarīgs priekšnoteikums, jo viens no būtiskākajiem metanoģenēzes efektivitāti ietekmējošajiem

faktoriem ir gāzes-šķidrums masas pārnese spēja. Manometriskais tests, kas tika veikts ar regresijas analīzes palīdzību, salīdzinot ar gāzu hromatogrāfijas analīzi, precīzi kvantitatīvi noteica CH₄ veidošanās ātrumu, mērot biometāna ražošanu.

9. Eksperimentu skaitliskie rezultāti nav tieši salīdzināmi ar komerciālu biometāna ražošanas reaktoru potenciālu, tomēr tie sniedz vērtīgu informāciju par filtrmateriālu ietekmi uz biometanizācijas efektivitāti noteiktos apstākļos. Tādēļ ir būtiski detalizēti aprakstīt visus izmantotos palīgmateriālus un eksperimentālo konfigurāciju, lai nodrošinātu rezultātu atkārtojamību un mērogojamību rūpnieciskajā ražošanā.
10. Kā daļa no sistemātiskas lēmumu pieņemšanas pieejas šajā pētījumā tiek izmantota daudzkritēriju lēmumu analīze un priekšrocību secības metode pēc līdzības ideālajam risinājumam, lai noteiktu, kurš no izvēlētajiem materiāliem būtu labāks risinājums apsmidzināmo biofiltru reaktoriem, ko izmanto *ex situ* biometanizācijā.
11. Biometanizācijas procesu optimizācija var veicināt efektīvāku biogāzes ražošanu, īpaši izmantojot ilgspējīgus un pieejamus filtrmateriālus. Šo pētījumu rezultāti sniedz papildu informāciju, kas ir būtiska ne tikai biometanizācijas jomā, bet arī citās nozarēs, kurās šādi materiāli varētu būt noderīgi. Turklāt tie palīdzēs pētniekiem un inženieriem pieņemt informētus lēmumus par filtrmateriālu izvēli bioreaktoru konfigurācijā, lai optimizētu biometanizācijas procesus un veicinātu ilgspējīgāku ražošanas procesu izstrādi.



Zane Kušnere dzimusi 1990. gadā Ludzā. Latvijas Universitātē ieguvusi dabaszinātņu bakalaura grādu bioloģijā (2013), Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) – maģistra grādu vides zinātnēs (2019), Viļņas Ģedimīna tehniskajā universitātē – maģistra grādu vides inženierzinātnēs (2019). Kopš 2020. gada ir RTU Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta pētniece. Zinātniskās intereses saistītas blakusproduktu izmantošanu un biotehnoloģijām.