

PERIODINIO VEIKIMO MAŽŲ MATMENŲ BIOREAKTORIŲ LABORATORINIAI EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI IR VERTINIMAS

Vitalij KOLODYNSKIJ¹, Pranas BALTRĖNAS²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva
El. paštas: ¹vitalij.kolodynskiy@vgtu.lt; ²pranas.baltrenas@vgtu.lt

Santrauka. Nagrinėjamas įrenginys – mažų matmenų periodinio veikimo bioreaktorių laboratorinis stendas, skirtas biodujų gamybai iš skirtingų organinės, augalinės kilmės atliekų. Stendas veikia palaikant optimalų temperatūrinį režimą ir anaerobiniam procesui reikalingą deguonies koncentraciją bioreaktorių viduje. Esant palankioms sąlygoms, vyksta įkrovos organinių medžiagų anaerobinės degradacijos procesai, auga mikroorganizmų kolonijos, ir metanogeninės bakterijos, kurios yra priskiriamos prie labai jautrių anaerobų, gamina metaną CH₄ – energijos atžvilgiu naudingas degias dujas, kurias galima panaudoti kaip gamtinių dujų analogą. Biodujos yra saugomos specialiose dujų talpyklose (angl. *gas holders*). Atliktuose tyrimuose buvo nagrinėjamos penkios skirtingos pagal sumaišymo santykį daržovių (bulvių) atliekų ir vištų mėšlo įkrovos, biodujų sudėtis ir jų kiekis. Nustatyta, kad didžiausia metano koncentracija (67,8 % buvo pasiekta naudojant įkrovą, sudarytą tik iš vištų mėšlo, tačiau įvertinus biodujų išėigą nustatyta, kad geriausias rezultatas (pagal biodujų kiekį, aukštą CH₄ koncentraciją ir įkrovos skaidymo laiką) pasiekiamas naudojant vištų mėšlo ir bulvių atliekų įkrovų mišinį (sumaišymas atitinkamai 70 ir 30 %). Mezofilinio proceso temperatūra eksperimentų metu siekė 33–35 °C, o deguonies koncentracija – 0,0–0,1 %. Laboratorinių eksperimentinių tyrimų pagrindu galima sukurti mažų matmenų periodinio veikimo bioreaktorių, kuriuos būtų įmanoma panaudoti nedideliame ūkyje arba privačiuose namuose, kur susidaro santykinai maži kiekiai mėšlo ir maisto atliekų.

Reikšminiai žodžiai: bioreaktoriai, biodujos, anaerobiniai mikroorganizmai, metanas, atliekos.

Įvadas

Vienas iš svarbiausių uždavinių šiuolaikiniame pasaulyje yra išsaugoti aplinką švarią, nepaveiktą įvairių teršalų (Pishgar *et al.* 2014). Mūsų laikais oro tarša ir klimato atšilimas yra vienos iš pagrindinių problemų, atsirandančių aplinkoje dėl žmogaus egzistavimo. Antropogeninio poveikio aplinkai rezultatas yra milžiniškas šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠEŠD), tokių kaip anglies dioksidas (CO₂), metanas (CH₄) ir azoto oksidai (NO_x) padidėjimas per pastaruosius kelis dešimtmečius dėl iškastinio kuro deginimo procesų ir didėjančios pasaulio populiacijos (Abdeshahian *et al.* 2010, 2016; Hosseini *et al.* 2013; Bansal *et al.* 2013).

Kita vertus, vis augantis energijos poreikis, naftos kainų svyravimai ir iškastinio kuro išteklių išsekimas skatina žmoniją ieškoti atsinaujinančių energijos šaltinių alternatyvos (Abdeshahian *et al.* 2014, 2016). Dabartiniu laiku visame pasaulyje organinės atliekos vis dažniau naudojamos energijai generuoti (Baltrėnas, Kvasauskas 2008).

Lietuvoje ir visame pasaulyje vis auganti pramonės apimtis ir medžiagų, iškasenų suvartojimas generuoja didelius biologiškai skaidomų atliekų kiekius (Misevičius,

Baltrėnas 2011). Kaip rezultatas susidaro biodujos – ekologiškai naudingas energijos šaltinis, kuris daugiausia susideda iš metano (apie 60 % ir anglies dioksido (35–40 %)). Be to, biodujų sudėtyje yra nedideli kiekiai kitų dujų, pavyzdžiui, amoniakas (NH₃), vandenilio sulfidas (H₂S), vandenilis (H₂), deguonis (O₂), azotas (N₂) ir anglies monoksidas (CO) (Chasnyk *et al.* 2015; Sun *et al.* 2015; Abdeshahian *et al.* 2016).

Biodujos išsiskiria vykstant anaerobinei organinių medžiagų fermentacijai, t. y. aplinkoje, kurioje yra labai mažas ir ribotas deguonies kiekis, pavyzdžiui, pelkėse, bioreaktoriuose, metantankuose arba virškinimo trakte. Priklausomai nuo metano koncentracijos viename biodujų kubiniame metre, galima gauti 20–25 MJ šiluminės energijos, kuri yra lygi energijai, gautai sudeginus 0,6–0,8 l benzino arba 1,3–1,7 kg malkų (Rukovodstvo po biogazovym... 2016). Biodujų energetinė vertė (metano kiekis ir koncentracija) tiesiogiai priklauso nuo organinės medžiagos kiekio ir mikrobiologinių procesų. Dviejų grupių mikroorganizmai (rūgštinės ir metanogeninės bakterijos) dalyvauja metaninio rauginimo procese trijuose etapuose: hidrolizėje, oksidacijoje ir susidarant

metanui. Procesuose dalyvauja daug įvairių mikroorganizmų, bet pagrindinė grupė – metanogeninės bakterijos.

Pirmojo etapo (hidrolizės) metu organinė medžiaga fermentuojama ekstraląsteliniais mikroorganizmų fermentais (ląsteliena, amilaze, proteaze ir lipaze). Bakterijos naikina ilgas sudėtingų angliavandenių, tokių kaip proteinais ir lipidais, grandines ir sudaro trumpas grandines. Rūgštinės bakterijos, kurios dalyvauja biodujų susidarymo antrajame etape, skaido sudėtingus organinius junginius (ląstelių, baltymų, riebalų ir kt.) į paprastesnius. Taigi rauginimo terpėje atsiranda pirminių rūgimo produktų – lakiosios riebalų rūgštys, vandenilis, anglies monoksidas, acto rūgštis, skruzdžių rūgštis ir kt. Metanogeninės bakterijos, kurios paverčia organines rūgštis į biodujus, naudoja šias organines medžiagas kaip maisto šaltinį. Metaną gaminančios bakterijos, dalyvaujančios trečiajame etape, skaido junginius, turinčius mažą molekulinę masę. Pažymėtina, kad rūgštinės ir metanogeninės bakterijos sąveikauja simbiotiškai. Iš vienos pusės, rūgštinės bakterijos sudaro palankią atmosferą, turinčią reikiamus metanogeninėms bakterijoms parametrus, iš kitos pusės – metanogeninės bakterijos naudoja rūgštinių bakterijų sudarytus tarpinius junginius. Be šios sąveikos reaktoriuje galėtų išsivystyti nepalankios sąlygos abiejų rūšių mikroorganizmams (Rukovodstvo po biogazovym... 2016).

Kaip jau buvo minėta, esant natūraliomis sąlygomis, metanas susidaro pelkėse ir liūnuose. Pramoninei metano gamybai naudojami specialūs rezervuarai – bioreaktoriai.

Bioreaktorius yra pagrindinis biodujų jėgainės įrenginys, kuriame nuolat ar periodiškai vyksta biomasės hidrolizės, fermentacijos bei metano gamybos procesas. Bioreaktorius turi būti sandarus, nes anaerobinės bakterijos yra jautrios deguoniui. Be to, jame surenkamos išsiskyrusios biodujos, kurios vėliau kaupiamos dujų rezervuaruose bei naudojamos energijos gamybai. Vidutinėje klimato zonoje reaktoriaus korpusą būtina gerai termiškai izoliuoti, siekiant sumažinti šilumos nuostolius. Korpuso gamybai naudojamas plienas, gelžbetonis, polietilenas ir kitos medžiagos (Kennes, Veiga 2001; Sukurto mažų gabaritų... 2016; Beteta 1995).

Pagal veikimo principą bioreaktoriai būna periodinio ir nuolatinio veikimo. Periodinio veikimo bioreaktoriai yra pakraunami ir iškraunami periodiškai. Visas jų darbinis tūris yra iš karto pripildomas apdoroti skirta įkrova. Pašildžius įkrovą, biodujų pradeda išsiskirti tik po kelių dienų. Po įkrovos degazacijos ji visa pakeičiama nauja ir procesas kartojamas. Šio tipo bioreaktorių dujų išėiga nėra pastovi. Iš pradžių biodujų išėiga laikui bėgant didėja, pasiekia maksimumą, paskui palaipsniui pradeda mažėti. Šio tipo bioreaktorių trukumas – palyginti ilgas substrato išlaikymo bioreaktoriuje

laikas bei mažas ir netolygus biodujų išėavimas. Be to, keičiant įkrovą, su ja pašalinami ir mikroorganizmai. Pagrindinis privalumas yra tas, kad juose labiau suskaidomos organinės medžiagos. Nuolatinio veikimo bioreaktoriuose įkrova pašalinama ne visa iš karto, o palaipsniui, nustatytomis dalimis: į bioreaktorių pridodama dalis paruošto naujo substrato, tiek pat pašalinama degazuoto (Sukurto mažų gabaritų... 2016; Savickas, Vrubliauskas 1997).

Biodujų gamybai gali būti naudojamas įvairios žaliavos: gyvulių mėšlas, augalų liekanos, maisto pramonės bei žemės ūkio atliekos, nuotekų dumblas, organinės komunalinės atliekos, viešojo maitinimo įstaigų atliekos ir energetiniai augalai. Būtina paminėti, kad biodujų gamyba sprendžia ne tik elektros energijos ir šilumos gamybos problemas, bet ir ekologines. Atliekų sukaupti vietose atsiranda nemalonių kvapų, pradeda veistis graužikai ir įvairūs ligų sukėlėjai. Atliekose esantys neorganiniai junginiai neretai patenka į dirvą ir neigiamai veikia jos struktūrą bei derlingumą. Be to, atliekos kelia pavojų atmosferai, paviršiniam ir gruntiniam vandeniui (Baltrėnas *et al.* 2005; Sukurto mažų gabaritų... 2016).

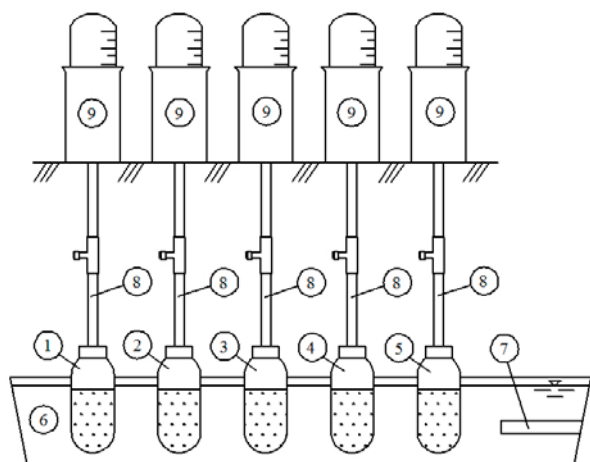
Mokslininkai Owamah, Alfa ir Dahunsi tyrė biodujų išėigą ir metano kiekį iš vištų mėšlo ir citrinžolės (*lot. Cymbopogon citratus*) substratų. Eksperimentiniams tyrimams atlikti buvo paruošta vištų mėšlo įkrova bei vištų mėšlo ir citrinžolės mišinio įkrova. Nustatyta, kad, lyginant įkrovas pagal biodujų išėigą, geresnis rezultatas gautas naudojant vištų mėšlo įkrovą (biodujų kiekis per parą siekė 1,8 l/kg/parą, o naudojant vištų mėšlo ir citrinžolės įkrovą – 1,3 l/kg/parą), tačiau kokybiškai vertinant dujas (pagal CH₄ koncentraciją), pastebėta, kad vidutinė metano koncentracija biodujose, gautose iš vištų mėšlo ir citrinžolės mišinio įkrovos po 30 eksperimento dienų, aukštesnė, negu iš vištų mėšlo įkrovos (atitinkamai 66,20 % ir 45,71 %). (Owamah *et al.* 2014). Pagal mokslininkų darbą galima padaryti išvadą, kad, maišant skirtingomis proporcijomis įvairias organines medžiagas arba tiekiant papildomus priedus į substratą, iš dalies paveikiamas biodujų gamybos procesas, t. y. didėja (arba mažėja) biodujų kiekis ir (arba) metano koncentracija jose. Pagrindinė problema – rasti tinkamas medžiagas sumaišyti ir substratui paruošti, kad, atlikus išsiskyrusių dujų kokybinę ir kiekybinę analizę, būtų gautas tik teigiamas rezultatas.

Šio darbo tikslas – ištirti biodujų sudėtį, koncentraciją ir išėigą iš penkių įvairių pagal sumaišymo santykį ir organinę apkrovą įkrovų, sudarytų iš vištų mėšlo ir bulvių atliekų, naudojant laboratorinį bioreaktorių standą ir, įvertinus tyrimo rezultatus, sukurti mažų matmenų periodinio veikimo bioreaktorių prototipus, kuriuos būtų įmanoma panaudoti nedideliame ūkyje arba privačiuose namuose, kur susidaro santykinai maži mėšlo ir maisto atliekų kiekiai.

Metodika

Laboratorinio stendo veikimo principas. Eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto Aplinkos apsaugos instituto mokslinėje laboratorijoje. Tyrimams atlikti buvo naudojamas mažų matmenų periodinio veikimo bioreaktorių laboratorinis stendas, kurį sudarė penki bioreaktoriai.

Stendo konstrukcija nėra sudėtinga, ją sudaro: šildymo talpa, elektrinis kaitinimo elementas, bioreaktorių korpusai, dujų talpyklos ir sklendės, skirtos dujų mėginiams paimti. Konstrukcijos schema pateikta 1 pav.



1 pav. Mažų matmenų periodinio veikimo bioreaktorių laboratorinio stendo schema:

1–5 – bioreaktoriai, 6 – šildymo talpa, 7 – elektrinis kaitinimo elementas, 8 – dujų tiekimo kanalas, 9 – dujų talpykla

Fig. 1. Laboratoric stand scheme of periodic operation small size bioreactors

1–5 – bioreactors, 6 – heating capacity, 7 – electric heating element, 8 – gas supply channel, 9 – gas holder

Bioreaktorių korpusai (1–5) montuojami specialioje talpoje (6), kurioje numatytas elektrinis kaitinimo elementas (7), skirtas vandens temperatūrai palaikyti. Stendas veikia esant mezofiliniam temperatūriniam režimui (35 °C). Biodujos per dujų tiekimo kanalus (8) tiekiamos į dujų talpyklas (9). Tarp bioreaktorių (1–5) ir talpyklų (9) įrengtos specialios sklendės dujų mėginiams paimti. Visų bioreaktorių tūriai yra vienodi, bet, kadangi fermentacijos metu galimas įkrovos pakilimas, rekomenduojama užkrauti bioreaktorių iki 60–70 % nuo maksimalaus tūrio. Laboratoriniame stende kiekvieno bioreaktoriaus tūris siekia 5 litrus, bet užkraunami tik 3 litrai. Biodujų sudėčiai nustatyti taikomas biodujų analizatorius INCA 4000, kurio veikimo principas pagrįstas elektrocheminiu bei nedispersiniu infraraudonųjų spindulių metodais.

Substrato paruošimas. Prieš tiekiant paruoštą substratą į bioreaktorių, nustatomas įkrovos organinių dalelių (toliau – VS) kiekis. VS – tai įkrovos organinių dalelių

kiekis, iš kurių, esant bakterijoms palankiomis sąlygomis, išsiskiria biodujos.

Mėginys džiovinamas 103–105 °C temperatūroje apie 3–4 h. Taip iš mėginio pašalinamas vanduo ir gaunama sausa masė (toliau – SM):

$$SM = m_0 - m_{H_2O}, \quad (1)$$

čia SM – mėginio sausa masė, g; m_0 – mėginio masė prieš džiovinimą, g; m_{H_2O} – pašalinto iš mėginio vandens masė, g. SM susideda iš organinių ir neorganinių dalelių. Deginus SM apie 3–4 h (esant 550 °C temperatūrai) ir pasvėrus sudegintą mėginio masę, nustatomas sausos masės neorganinių dalelių kiekis ir apskaičiuojamas organinių dalelių kiekis:

$$m_{org} = SM - m_n, \quad (2)$$

čia m_{org} – mėginio sausos masės organinių dalelių kiekis, g; SM – mėginio sausa masė, g; m_n – mėginio sausos masės neorganinių dalelių kiekis, g.

Žinant mėginio masę prieš deginimą ir po deginimo, nustatoma sudegusių organinių dalelių dalis nuo pradinės mėginio masės (prieš džiovinimą):

$$m_1 = \frac{m_{org}}{m_0} \times 100 \%, \quad (3)$$

čia m_1 – mėginio organinių dalelių dalis nuo bendros mėginio masės prieš džiovinimą, g; m_{org} – mėginio sausos masės organinių dalelių kiekis, g; m_0 – mėginio masė prieš džiovinimą, g.

Tyrimams atlikti buvo paruoštos penkios įkrovos:

- 1) Vištų mėšlo ir bulvių atliekų mišinys (sumaišymo santykis atitinkamai 10 ir 90 %).
- 2) Vištų mėšlo ir bulvių atliekų mišinys (sumaišymo santykis atitinkamai 30 ir 70 %).
- 3) Vištų mėšlo ir bulvių atliekų mišinys (sumaišymo santykis atitinkamai 50 ir 50 %).
- 4) Vištų mėšlo ir bulvių atliekų mišinys (sumaišymo santykis atitinkamai 70 ir 30 %).
- 5) Vištų mėšlo substratas (100 %).

Nustatyta, kad vištų mėšlo VS yra lygus 39,85 %, o bulvių atliekų – 19,80 %. Norint apskaičiuoti, kiek gramų mėšlo ir bulvių atliekų reikia substratui paruošti, taikomas organinės apkrovos rodiklis (toliau – VS/l), kuris parodo organinių dalelių kiekį gramais viename litre naudingojo tūrio. Atliekant tyrimus buvo nuspręsta iširti penkias įkrovas, kurių skirtingas mėšlo ir bulvių atliekų sumaišymo santykis ir skirtingi VS/l:

- 1) įkrova Nr. 1: VS/l = 100 g/l;
- 2) įkrova Nr. 2: VS/l = 130 g/l;
- 3) įkrova Nr. 3: VS/l = 160 g/l;
- 4) įkrova Nr. 4: VS/l = 190 g/l;

5) įkrova Nr. 5: VS/l = 220 g/l.

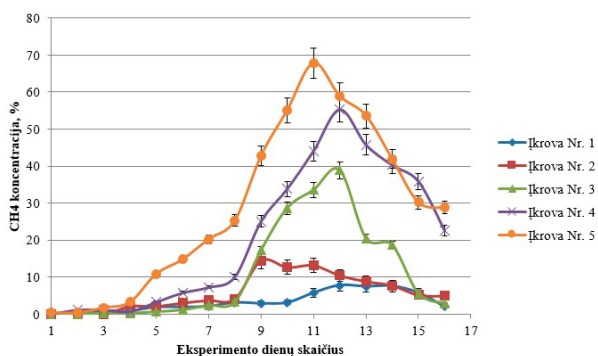
Žinant mėšlo ir atliekų sumaišymo santykį, VS bei reikalingą organikos kiekį bioreaktoriuje, apskaičiuojamos vištų mėšlo ir bulvių atliekų masės substratui paruošti. Į bioreaktorių tiekiamas reikiamas vandens kiekis, kol naudingas bioreaktoriaus įkrovos tūris pasiekia 3 litrus. Substratas sumaišomas, bioreaktoriaus dangtis uždaromas, įjungiamas kaitinimo elementas.

Analizuojant arba lyginant tyrimų rezultatus, biodujų išėiga iš skirtingų bioreaktorių įvertinama nustatčius, kiek litrų biodujų per parą susidaro iš vieno kilogramo įkrovos organinės medžiagos. Toks matavimo vienetas (l/parą/kg) naudojamas norint palyginti skirtingų pagal tūrį arba įkrovų sumaišymo santykį bioreaktorių tyrimų rezultatus.

Rezultatai ir jų analizė

Kadangi laboratorinio stendo bioreaktoriai yra mažų matmenų, eksperimento trukmė siekė tik 16 parų. Per pirmas 7 paras deguonies koncentracija visose bioreaktoriuose siekė 1–3 % o eksperimento viduryje ir pabaigoje (po bakterijų adaptacinio periodo) – 0,0–0,1 %. Substratų temperatūra siekė 34–35 °C. 2 pav. pateikta metano koncentracijos iš įvairių įkrovų priklausomybė nuo eksperimento dienų skaičiaus.

Iš 2 pav. matyti, kad didžiausia metano koncentracija (67,8 %) buvo pasiekta 5-oje įkrovoje, kurią sudarė tik vištų mėšlas. 4-oje ir 3-oje įkrovose didžiausia metano koncentracija siekė atitinkamai 55,3 ir 38,9 %. Pirmos ir antros įkrovos metano koncentracijos eksperimento metu buvo labai mažos, dėl to tokios biodujos netinka energijai išgauti.



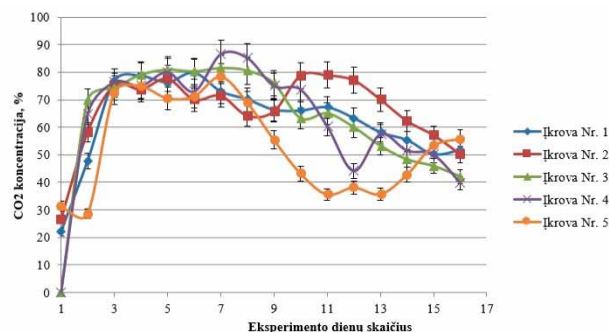
2 pav. CH₄ koncentracijos iš įvairių įkrovų kaita: įkrovos Nr. 1 VS/l = 100 g/l, įkrovos Nr. 2 VS/l = 130 g/l, įkrovos Nr. 3 VS/l = 160 g/l, įkrovos Nr. 4 VS/l = 190 g/l, įkrovos Nr. 5 VS/l = 220 g/l

Fig. 2. Change of CH₄ concentration from various loads. Load Nr. 1 VS/l = 100 g/l, load Nr. 2 VS/l = 130 g/l, load Nr. 3 VS/l = 160 g/l, load Nr. 4 VS/l = 190 g/l, load Nr. 5 VS/l = 220 g/l

Pažymėtina, kad staigus metano koncentracijos padidėjimas matomas tik praėjus 7–8 paroms. Galima daryti

išvadą, kad būtent toks minimalus laikotarpis reikalingas tam, kad bakterijos pradėtų aktyviai gaminti metaną.

3 pav. pateikta CO₂ koncentracijos iš įvairių įkrovų priklausomybė nuo eksperimento dienų skaičiaus.

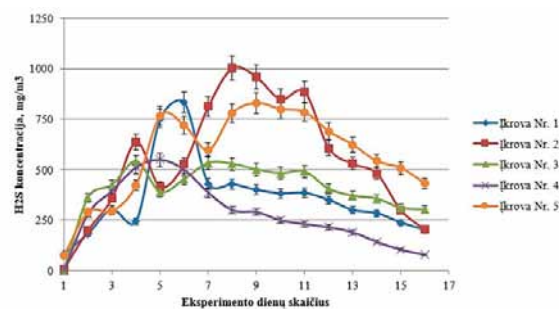


3 pav. CO₂ koncentracijos iš įvairių įkrovų kaita: įkrovos Nr. 1 VS/l = 100 g/l, įkrovos Nr. 2 VS/l = 130 g/l, įkrovos Nr. 3 VS/l = 160 g/l, įkrovos Nr. 4 VS/l = 190 g/l, įkrovos Nr. 5 VS/l = 220 g/l

Fig. 3. Change of CO₂ concentration from various loads. Load Nr. 1 VS/l = 100 g/l, load Nr. 2 VS/l = 130 g/l, load Nr. 3 VS/l = 160 g/l, load Nr. 4 VS/l = 190 g/l, load Nr. 5 VS/l = 220 g/l

Kaip buvo minėta, biodujose visada yra CO₂, kurio koncentracija turi siekti apie 35–40 %. Iš diagramos matyti, kad geriausia CO₂ koncentracija buvo pasiekta iš įkrovos Nr. 5, kurią sudarė vištų mėšlas, po 11 parų. Kitose įkrovose CO₂ koncentracija siekė iki 86,6 %.

4 pav. pateikta H₂S koncentracijos iš įvairių įkrovų priklausomybė nuo eksperimento dienų skaičiaus.



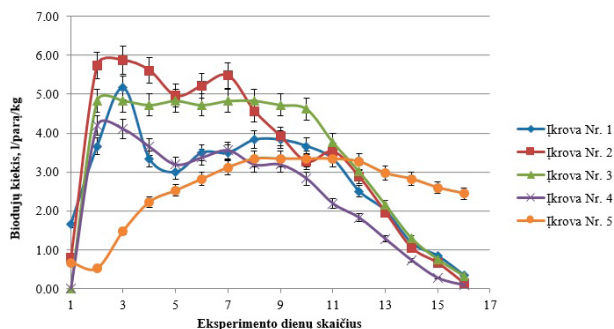
4 pav. H₂S koncentracijos iš įvairių įkrovų kaita: įkrovos Nr. 1 VS/l = 100 g/l, įkrovos Nr. 2 VS/l = 130 g/l, įkrovos Nr. 3 VS/l = 160 g/l, įkrovos Nr. 4 VS/l = 190 g/l, įkrovos Nr. 5 VS/l = 220 g/l

Fig. 4. Change of H₂S concentration from various loads. Load Nr. 1 VS/l = 100 g/l, load Nr. 2 VS/l = 130 g/l, load Nr. 3 VS/l = 160 g/l, load Nr. 4 VS/l = 190 g/l, load Nr. 5 VS/l = 220 g/l

Vandenilio sulfidas (H₂S) – nenaudingos dujos, kurios pasižymi destruktiniu poveikiu. Tokios dujos ardo vamzdyną, bioreaktorių korpusą ir kitas metalines konstrukcijas, todėl, kalbant apie pramoninę biodujų gamybą, jas būtina šalinti. Deginant H₂S susidaro SO₂, taip teršiama atmosfera. Iš 5 pav. matyti, kad didžiausia H₂S koncentracija buvo

nustatyta iš įkrovos Nr. 2, o mažiausia – iš įkrovos Nr. 4. Pažymėtina, kad H₂S koncentracija mažėja pradedant nuo 8–9 eksperimento paros, t. y. kai deguonies koncentracija siekia 0,0–0,1 %, o metano išėiga didėja.

5 pav. pateikta biodujų išėiga iš vieno kilogramo įkrovos organinės medžiagos.



5 pav. Biodujų išėiga iš vieno kilogramo įkrovos organinės medžiagos:

įkrovos Nr. 1 VS/l = 100 g/l, įkrovos Nr. 2 VS/l = 130 g/l, įkrovos Nr. 3 VS/l = 160 g/l, įkrovos Nr. 4 VS/l = 190 g/l, įkrovos Nr. 5 VS/l = 220 g/l

Fig. 5. The yield of biogas from one kilogram of loads organic material

Load Nr. 1 VS/l = 100 g/l, load Nr. 2 VS/l = 130 g/l, load Nr. 3 VS/l = 160 g/l, load Nr. 4 VS/l = 190 g/l, load Nr. 5 VS/l = 220 g/l

Iš pateiktos diagramos matyti, kad per pirmąsias 7 paras daugiausiai biodujų susidaro iš įkrovų Nr. 2, Nr. 3 ir 1. Po 7 parų biodujų kiekis tolygiai mažėja. Kadangi jau buvo minėta, kad geriausias rezultatas (pagal CH₄ koncentraciją) pasiektas įkrovoje Nr. 5, galima teigti, kad iš įkrovų Nr. 2, Nr. 3 ir 1 gautų biodujų didžiąją dalį sudaro CO₂ bei H₂S, t. y. tokios biodujos nėra naudingos energijos atžvilgiu. Be to, matyti, kad dujų kiekis iš įkrovos Nr. 5 laikui bėgant mažėja daug lėčiau negu dujų kiekis iš kitų įkrovų, ir eksperimento pabaigoje siekia 2,45 l/parą/kg.

Išvados

1. Atlikus eksperimentinius tyrimus, nustatyta, kad aukščiausia metano CH₄ koncentracija (67,8 %) pasiekta iš įkrovos, kurią sudarė vištų mėšlas (VS/l = 220 g/l). Taip pat aukšta metano koncentracija (55,3 %) pasiekta iš įkrovos, kurią sudarė vištų mėšlas ir bulvių atliekos (sumaišymo santykis atitinkamai 70 ir 30 %, o VS/l = 190 g/l). Galima teigti, kad abi įkrovos tinkamos metano gamybai. Biodujos, gautos iš kitų įkrovų, netinka naudoti dėl mažos CH₄ ir aukštos CO₂ koncentracijos. Tai gali reikšti, kad rūgštinių ir metanogeninių bakterijų pusiausvyra yra pažeista.
2. Nustatyta, kad mažiausia CO₂ koncentracija po bakterijų adaptacinio periodo (po 7–9 parų nuo bioreak-

toriaus užkrovimo) pasiekta iš vištų mėšlo įkrovos. CO₂ yra nedegus ir dėl to nenaudingas biodujų komponentas. Didžiausia CO₂ koncentracija po adaptacinio periodo buvo užfiksuota iš vištų mėšlo ir bulvių atliekų įkrovos (sumaišymo santykis atitinkamai 30 ir 70 % ir siekė apie 80 %).

3. Nustatyta, kad H₂S koncentracija bioreaktoriuose kinta nuo 0 mg/m³ eksperimento pradžioje iki 1000 mg/m³ eksperimento viduryje. Didžiausia koncentracija užfiksuota bioreaktoriuje, užkrautame vištų mėšlo ir bulvių atliekų substratu (sumaišymo santykis atitinkamai 30 ir 70 %), o mažiausia – bioreaktoriuje, užkrautame vištų mėšlo ir bulvių atliekų substratu (sumaišymo santykis 70 ir 30 %).
4. Lyginant biodujų išėigą iš vištų mėšlo bei vištų mėšlo ir bulvių atliekų (sumaišymo santykis 70 ir 30 %) įkrovų po 7–9 parų, matyti, kad biodujų kiekis iš abiejų bioreaktorių skiriasi nežymiai (atitinkamai 3,1 ir 3,5 l/parą/kg), tačiau bioreaktorių, užkrautų tik vištų mėšlu, pasižymi ilgesniu įkrovos išlaikymu bioreaktoriuje ir stabilesne biodujų išėiga dėl didesnio maistinių medžiagų kiekio (didesnės organinės apkrovos).
5. Galima padaryti išvadą: jeigu ūkyje periodiškai susidaro dideli atliekų kiekiai, geriau naudoti vištų mėšlo ir bulvių atliekų įkrovą (sumaišymo santykis 70 ir 30 %), kuri perdirbama greičiau, o jeigu pagrindinis tikslas gauti aukštesnės kokybės biodujas per ilgesnį laiką – tokiu atveju geriau naudoti vištų mėšlo įkrovą be bulvių atliekų priedo.

Literatūra

- Abdeshahian, P.; Al-Shorgani, N. K. N.; Salih, N. K. M.; Shukor, H.; Kadier, A.; Hamid, A. A.; Kalil, M. S. 2014. The production of biohydrogen by a novel strain *Clostridium* sp. YM1 in dark fermentation process, *International Journal of Hydrogen Energy* 39(24): 12524–12531. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.05.081>
- Abdeshahian, P.; Dashti, M. G.; Kalil, M. S.; Yusoff, W. M. W. 2010. Production of biofuel using biomass as a sustainable biological resource, *Biotechnology* 9: 274–282. <http://dx.doi.org/10.3923/biotech.2010.274.282>
- Abdeshahian, P.; Lim, J. S.; Ho, W. S.; Hashim, H.; Lee, Ch. T. 2016. Potential of biogas production from farm animal waste in Malaysia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60: 714–723. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.117>
- Baltrėnas, P.; Jankaitė, A.; Raistenskis, E. 2005. Natūralių biodegradacijos procesų, vykstančių maisto atliekose, eksperimentiniai tyrimai, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 13(4): 167–176.
- Baltrėnas, P.; Kvasauskas, M. 2008. Experimental investigation of biogas production using fatty waste, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 16(4): 178–187. <http://dx.doi.org/10.3846/1648-6897.2008.16.178-187>

- Bansal, S. K.; Sreekrishnan, T. R.; Singh, R. 2013. Effect of heat pretreated consortia on fermentative biohydrogen production from vegetable waste, *National Academy Science Letters* 36(2): 125–131. <http://dx.doi.org/10.1007/s40009-013-0124-4>
- Beteta, T. 1995. *Experiences with plastic tube biodigesters in Colombia*. Universidad Nacional Agraria, Managua, Nicaragua. 27 p.
- Chasnyk, O.; Sołowski, G.; Shkarupa, O. 2015. Historical, technical and economic aspects of biogas development: case of Poland and Ukraine, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52: 227–239. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.122>
- Hosseini, S. E.; Wahid, M. A.; Aghili, N. 2013. The scenario of greenhouse gases reduction in Malaysia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28: 400–409. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.045>
- Kennes, C.; Veiga, M. C. 2001. *Bioreactors for waste gas treatment*. Springer. 312 p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-0930-9>
- Misevičius, A.; Baltrėnas, P. 2011. Experimental investigation of biogas production using biodegradable municipal waste, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 19(2): 167–177. <http://dx.doi.org/10.3846/16486897.2011.576456>
- Owamah, H. I.; Alfa, M. I.; Dahunsi, S. O. 2014. Optimization of biogas from chicken droppings with *Cymbopogon citratus*, *Renewable Energy* 68: 366–371. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.02.006>
- Pishgar, R.; Najafpour, G. D.; Neyra, B. N.; Mousavi, N.; Bakhshi, Z. 2014. Effects of organic loading rate and hydraulic retention time on treatment of phenolic wastewater in an anaerobic immobilized fluidized bed reactor, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 22(1): 40–49. <http://dx.doi.org/10.3846/16486897.2013.800079>
- Rukovodstvo po biogazovym tehnologijam* [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2016 m. vasario 29 d.]. Prieiga per internetą: http://www.fluid-biogas.com/rukovodstvo/Manual%20on%20biogas_RUS.pdf
- Savickas, J.; Vrubliauskas, S. 1997. *Biodujų gamybos ir panaudojimo galimybės Lietuvoje*. Technologija. 38 p.
- Sukurto mažų gabaritų bioreaktoriaus modulinų variantų analizė, parinkimas ir taikymas kaimo ūkiuose bei maisto pramonėje* [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2016 m. kovo 6 d.]. Prieiga per internetą: http://ukmin.lrv.lt/uploads/ukmin/documents/files/imported/lt/verslo_aplinka/Pramone/Microsoft%20Word%20-%20Mokslinio%20darbo%20ataskaita_VGTU.pdf
- Sun, Q.; Li, H.; Yan, J.; Liu, L.; Yu, Z.; Yu, X. 2015. Selection of appropriate biogas upgrading technology—a review of biogas cleaning, upgrading and utilization, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51: 521–532. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.029>

EXPERIMENTAL LABORATORY RESEARCH AND EVALUATION OF PERIODIC OPERATION SMALL SIZE BIOREACTORS

V. Kolodynskij, P. Baltrėnas

Abstract

The investigation device – small size periodic operation bioreactors, which are developed for the production of biogas from different organic, vegetable waste. The device operates by maintaining optimum operating temperature and oxygen concentration required for anaerobic treatment process inside the bioreactor. Under favorable conditions, organic substance is being degraded because of anaerobic processes, colonies of microorganisms grow, and methane bacteria produce CH₄ – useful flammable gases, which can be used as natural gas analogue. The gas is stored in special tanks of gas – gas holders. A study was implemented by analyzing five different loads, according to the mixing ratio of vegetables (potatoes) and chicken manure waste. The quality and quantity of biogas was analyzed as well. It was found that the highest concentration of methane (67.8%) was achieved by using a load consisting only of chicken manure, but after evaluation of biogas yield, it was found that the best result (according to the quantity of biogas, a high concentration of CH₄ and time of load degradation) is achieved using chicken manure and potato waste mix (relatively 70 and 30%). Mesophilic process temperature during the experiment was 33–35 °C, and oxygen concentration – 0.0–0.1%. After research implementation there will be an opportunity to create small size periodic operation bioreactors, which can be used in small farms or private houses, where the small amount of organic waste and manure are formed.

Keywords: bioreactors, biogas, anaerobic microorganisms, methane, waste.