

ŽALIAVŲ, NAUDOJAMŲ BIODUJŲ JĖGAINĖSE, SĄVYBIŲ TYRIMAS

Simona NORGELIENĖ, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: simona.norgeliene@vdu.lt

Kęstutis VENSŁAUSKAS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: kestutis.venslauskas@vdu.lt

Santrauka

Pasaulinei energijos paklausai augant, tvarus perėjimas prie atsinaujinančių šaltinių, tokių kaip biomasė, tampa vis svarbesnis. Šiame tyrime nagrinėjama biodujų gamyba iš biodujų jėgainėse naudojamų skirtingų žaliavų. Tyrimo tikslas yra ištirti ir palyginti biodujų jėgainėse naudojamų žaliavų: gliukozės sirupo valymo liekanų, cukrinių runkelių silosų ir galvijų mėšlo, fizikines ir chemines savybes bei energetinį potencialą. Eksperimentiniai tyrimai atlikti taikant vienkartinės įkrovos biocheminio metano potencialo nustatymo metodą, procesą stebint ne trumpiau kaip 30 dienų. Tyrimo rezultatai atskleidė skirtingą žaliavų skaidymo kinetiką. Cukrinių runkelių silosai išsiskiria didžiausiu biodujų gamybos potencialu (135 m³/t) ir greičiausia skaidymo pradžia be adaptacinio periodo, tačiau pasižymi mažiausia metano koncentracija (49,1 %). Tuo tarpu galvijų mėšlas ir gliukozės sirupo liekanos demonstruoja tolygesnį biodujų išsiskyrimą ir stabilų mikrobiologinį aktyvumą. Apskaičiavus santykinius žaliavų kiekius, galima optimizuoti biodujų gamybos technologinius procesus.

Reikšminiai žodžiai: biodujos, metanas, organinės atliekos, gyvulių mėšlas.

Įvadas

Pasaulinei energijos paklausai nuolat augant, reikia didinti tvarią energijos gamybą. Siekiant sušvelninti pasaulinio atšilimo pasekmes, pasaulis turi gerokai sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) išmetimą kiekviename sektoriuje, ypač iš iškastinių šaltinių (Jurgutis ir kt., 2021). Perėjimas nuo iškastinio kuro pagrindu pagamintos energijos prie atsinaujinančios energijos gamybos iš dalies gali būti pasiektas padidinus biokuro pagrindu pagamintos energijos gamybą. Vienas iš būdų įveikti energetikos ir atliekų tvarkymo krizes yra organinių atliekų panaudojimas gaminti tvarią energiją – biokurą ar biodujas. Anaerobinio biomasės skaidymo metu organinės medžiagos paverčiamos biodujomis, kurios vėliau gali būti naudojamos biometanui, elektros energijai ar šilumai gaminti. Išvalytos nuo CO₂, H₂S ir drėgmės priemaišų, biodujos gali būti tiekiamos į gamtinių dujų tinklą arba naudojamos kaip kuras transporto priemonėse. Anaerobinės fermentacijos metu susidarantis biodujų jėgainės digestatas yra vertingas, nes jame yra būtinų augalų mitybai maistinių medžiagų (azoto (N), fosforo (P), kalio (K) ir kt.).

Norint išlaikyti pasaulinį vidutinį 1,8 t naftos ekvivalento energijos suvartojimą vienam gyventojui, reikalingas didesnis energijos kiekis, o tam reikia nustatyti tvarius energijos šaltinius. Biodujoms gaminti naudojamos įvairios organinės atliekos, tokios kaip grūdų išvalos, kukurūzų silosai ar likučiai iš gamybos įmonių. Pastarąjį dešimtmetį žemės ūkio atliekos kaip biomasės energijos šaltiniai sulaukė didelio tyrimų dėmesio ir tapo reikšminga bioenergijos tyrimų dalimi (Adhirashree Vannarath et al., 2022), nes gamybos tvarumas labai priklauso nuo tinkamos žaliavos prieinamumo (Farobie et al., 2025) ir jos kiekio.

Galvijų mėšlas, cukrinių runkelių išspaudos ir gliukozės sirupo valymo liekanos (GFL) sudaro tarpusavyje papildančią anaerobinio skaidymo substratų sistemą. Būtent šios žaliavos buvo pasirinktos, nes viena iš jų yra skystos frakcijos ir gaunama kaip liekana po gamybos (GFL). Mėšlas pasižymi geromis buferinėmis savybėmis ir aktyvia mikroorganizmų populiacija, taip stabilizuodamas procesą. Cukrinių runkelių išspaudos yra lėčiau skaidoma lignoceliuliozinė medžiaga, užtikrinanti ilgalaikį organinės anglies tiekimą, tuo tarpu gliukozės sirupo liekanos greitai fermentuojasi ir gali sukelti rūgštėjimą. Ir nors cukrinių runkelių išspaudos paprastai naudojamos kaip pašaras gyvuliams – naudoti tam tikrą dalį biodujų gamyboje jas irgi galima. Galvijų mėšlas – produktas, kuris žemės ūkyje yra vienas pagrindinių metano išmetimo į aplinką produktas, o cukrinių runkelių silosai pasirinkti, nes didelis kiekis žaliavos lieka nepardavus gamykloms produkto ūkininkams. Dėl to šių žaliavų naudojimas biodujoms vienu metu leidžia suderinti skaidymo greitį, palaikyti stabilų pH bei padidinti biodujų gamybos efektyvumą, lyginant su vienos žaliavos naudojimu.

Tyrimo tikslas – ištirti žaliavų, naudojamų biodujų jėgainėse, fizikines-chemines savybes.

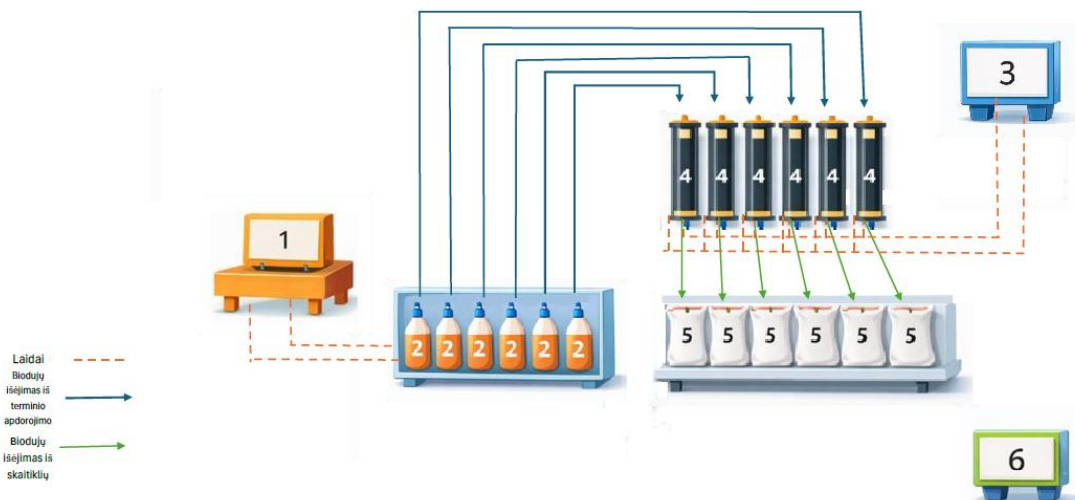
Iškeltam tikslui pasiekti sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Nustatyti ir įvertinti pasirinktų biodujų jėgainėse naudojamų žaliavų cheminę sudėtį.
2. Taikant vienkartinės įkrovos metodą ištirti biodujų ir metano išėgą iš skirtingų žaliavų rūšių.
3. Atlikti lyginamąją analizę tarp žaliavų energetinės vertės ir gautos metano koncentracijos rodiklių.

Tyrimų objektas ir metodai

Eksperimentiniams tyrimams buvo pasirinktos 3 medžiagos, kurios kaip žaliavos naudojamos biodujų jėgainėse: GFL, cukrinių runkelių išspaudos ir galvijų mėšlas. Eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami Vytauto Didžiojo universiteto Žemės ūkio akademijos (VDU ŽŪA) Biodujų laboratorijoje. Nacionalinėje aplinkos ir žemės ūkio tyrimų laboratorijoje buvo atliekami mėginių sausosios masės ir sausosios organinės medžiagos tyrimai. Biodujų laboratorijoje

buvo atliekami vienkartinės įkrovos biocheminio metano potencialo nustatymo tyrimai naudojant BPC Blue Anaerobic standą, kurio schema pateikta 1 paveiksle. Biodujų gamybos metu išsiskyrusioms biodujoms kaupti naudoti 25 l talpos „Restek“ specializuoti biodujų kaupimo maišai. Sukauptos biodujos išanalizuotos po kiekvieno tyrimo iš kiekvieno reaktoriaus biodujų analizatoriumi „Awite Awiflex“, kuriuo matuota CH₄, CO₂, H₂S koncentracijos. Visų eksperimentų metu tiriami mėginiai buvo dedami į vienkartinės įkrovos reaktorių ir 30 dienų stebimas biodujų gamybos intensyvumas.



1 pav. Tyrimų stendo schema: 1 – reaktoriaus temperatūros valdiklis; 2 – fermentacijos talpos; 3 – skaitiklių duomenų registratorius; 4 – biodujų kiekio skaitikliai; 5 – biodujų kaupimo maišai; 6 – biodujų sudėties analizatorius.

Fig. 1. Scheme of the research stand: 1 – reactor temperature controller; 2 – heat treatment reactor with raw materials tanks; 3 – meter data recorder; 4 – biogas quantity counters; 5 – biogas storage bags; 6 – biogas composition analyzer.

Kiekviena reaktoriuje (2) esanti talpa buvo prijungta prie biodujų skaitiklio (4), kur gaminantis biodujoms buvo apskaitomas jų kiekis. Kai skaitiklyje susikaupia 10 ml biodujų, skaitiklis išleidžia biodujas į biodujų kaupimo maišus (5), tuo pačiu metu siųsdamas signalą į loginį valdiklį (3), kuris užfiksuoja gautų biodujų kiekį duomenis. Biodujų gamybos fermentacijos talpos buvo 500 ml bendrosios talpos. Tyrimui naudotas mišrių atliekų inokuliumas paimtas iš laboratorijoje veikiančio 37 °C temperatūroje nuolatinės įkrovos reaktoriaus.

Tirtų žaliavų sausoji medžiaga nustatyta naudojant LST EN 13040:2008 standartą, o sausa organinė medžiaga - LST EN 13039:2012. Tyrimų duomenys pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Tirtų medžiagų cheminės sudėties suvestinė

Table 1. Summary of the chemical composition of the tested substances

Tyrimų parametras / Research parameter	Tyrimo rezultatai / Test results		
Natūralioje medžiagoje / In natural material	GFL	Galvijų mėšlas / Cattle manure	Cukrinių runkelių silosas / Sugar beet silage
Sausa medžiaga % / Dry matter, %	6,90	24,52	16,60
Organinė medžiaga % / Organic matter, %	6,46	17,14	17,81

Pagal (1) lygtį buvo apskaičiuotas kiekvienos žaliavos tyrimams reikalingas kiekis:

$$M_{mėginio} = \frac{M_{inoculmo} \cdot SOM\%_{inoculmo}}{2 \cdot SOM\%_{mėginio}}, \quad (1)$$

čia: $M_{mėginio}$ – mėginio masė įkrauta į bioreaktorių, g;

$M_{inoculmo}$ – į reaktorių dedamo inokulumo masė, g;

$SOM\%_{inoculmo}$ – inokulmo organinės medžiagos koncentracija, procentais;

$SOM\%_{mėginio}$ – substrato organinės medžiagos koncentracija, procentais.

Apskaičiuotas tirtų medžiagų įkrovos kiekis pateiktas 2 lentelėje.

2 lentelė. Apskaičiuotas tirtų medžiagų įkrovos kiekis

Table 2. Calculated loading of the tested materials

Žaliava / Raw material	GFL	Galvijų mėšlas / Cattle manure	Cukrinių runkelių silosas / Sugar beet silage
$M_{mėginio}$, g	61,92	23,34	22,46
$M_{inoculmo}$, g	400	400	400

Žaliavos energinė vertė apskaičiuota pagal lygtį:

$$E_z = B_z \times B_E, \quad (2)$$

čia: E_z – žaliavos energetinė vertė, kWh/t;

B_z – biodujų išeiga iš žaliavos, m³/t;

B_E – biodujų energinė vertė, kWh/m³.

Biodujų energetinė vertė apskaičiuojama pagal lygtį:

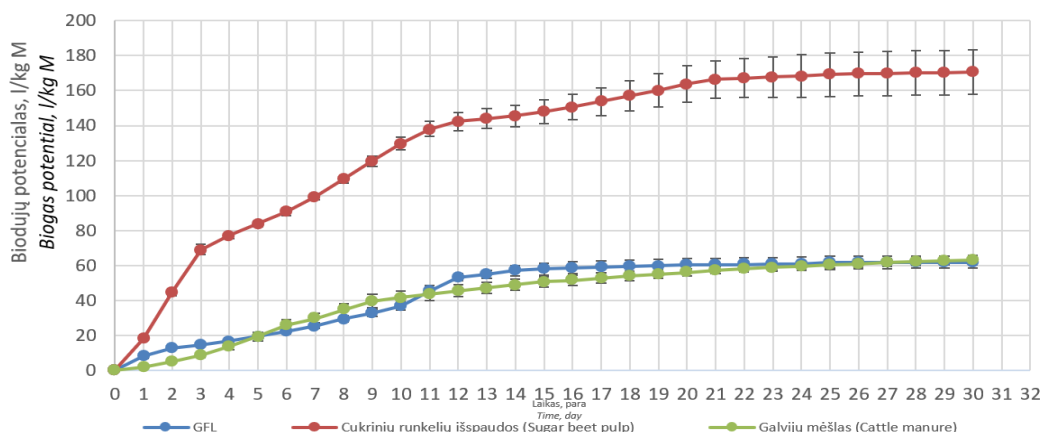
$$B_E = k_{CH_4} \cdot \frac{CH_4\%}{100}$$

čia: k_{CH_4} – 0,0353 MJ/l – metano dujų šilumingumas;

$CH_4\%$ – metano koncentracija biodujose, proc.

Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

BMP bandymo tikslas yra nustatyti galutinį metano išeigos potencialą ir žaliavų energinę vertę. 2 paveiksle pateikti GFL, galvijų mėšlo ir cukrinių runkelių silos kumuliatyviosios biodujų išeigos dinamika.



2 pav. Kumuliatyviosios biodujų išeigos dinamika iš tirtų žaliavų

Fig. 2. Dynamics of cumulative biogas yield from the studied feedstocks

Cukrinių runkelių silosas aiškiai išsiskiria iš kitų dviejų žaliavų, nes jau antrąją tyrimo dieną biodujų išeigos potencialas siekia 44,84 l/kg M, kai tuo tarpu GFL išeiga buvo tik 12,81 l/kg M, o galvijų mėšlo – 5,28 l/kg M. Maksimalų kiekį biodujų, bandymo metu pagamina skirtingos žaliavos skirtingais laikotarpiais. Cukrinių runkelių silosas maksimalų kiekį biodujų pasiekia 30 parą (170,6 l/kg M), nors eksponentiškai augimas į viršų stebimas jau nuo 12 paros ir kyla pastoviai iki 21 paros. 21 parą matomas augimas, tačiau nebėra tokio ryškaus pokyčio. GFL pastovus augimas matomas nuo 1 iki 15 paros (pokytis nuo 0 iki 58,12 l/kg M). Nuo 17 paros nebėra augimo, nes pokytis iki 30 bandymo dienos tampa 2,72 l/kg M. Bendrai pagal gautus rezultatus matoma, kad aiškiai biodujų išeiga yra didžiausia iš cukrinių runkelių siloso, kuri siekia 170,6±12,7 l/kg M, galvijų mėšlas – 63,2±2,6 l/kg M, o GFL – 62,1±3,5 l/kg M.

Kumuliatyvioji biodujų išeiga iš mėšlo sausosios medžiagos eksperimento metu buvo gauta 257,7 l/kg SM. Lyginant visus tris mėginius ji buvo mažiausiam, nes tiek iš GFL išgauta 887,5±63,8 l/kg SM, o iš cukrinių runkelių siloso – 870,4±64,9 l/kg SM. Metano koncentracija mėšlo mėginio biodujose buvo 59,1±0,3 %, ir ji buvo didžiausia palyginti su kitais dviem mėginiais – GFL – 58,6 % ir cukrinių runkelių siloso – 49,1 %.

Tyrimų rezultatai pateikti suvestinėje 3 lentelėje.

3 lentelė. Tyrimų rezultatų suvestinė

Table 3. Summary of research results

Rodiklis Indicator	Mato vienetas Unit of measur	GFL	Galvijų mėšlas Cattle manure	Cukrinių runkelių silosas Sugar beet silage
Kumuliatyvioji biodujų išeiga iš žaliavos Cumulative biogas yield from feedstock	l/kg	62,1±3,5	63,2±2,6	170,6±12,7
Kumuliatyvioji biodujų išeiga iš sausosios medžiagos Cumulative biogas yield from dry matter	l/kg SM	887,5±63,8	257,7±10,9	870,4±64,9
Kumuliatyvioji biodujų išeiga iš sausosios organinės medžiagos Cumulative biogas yield from dry organic matter	l/kg SOM	948,1±69,4	368,7±15,6	957,9±71,4
Metano koncentracija Methane concentration	%	58,6±0,4	59,1±0,3	49,1±0,6
Biodujų energinė vertė Energy value of biogas	kWh/m ³	5,86	5,91	4,91
Žaliavos energinė vertė Energy value of raw material	kWh/t	363,9	373,5	837,6

Atliktas GFL, galvijų mėšlo ir cukrinių runkelių siloso anaerobinio skaidymo tyrimas atskleidė substratų cheminės sudėties įtaką biodujų išeigai. Kumuliatyvinės išeigos analizė parodė, kad cukrinių runkelių silosas pasižymi didžiausiu energetiniu potencialu, o 80–90 % viso dujų tūrio sugeneruojama per pirmąsias 12–15 parų.

Išvados

1. Nustatyta, kad didžiausiu sausosios medžiagos kiekiu pasižymėjo galvijų mėšlas (24,52 %). Kalbant apie organinės sausosios medžiagos kiekį, didžiausias kiekis buvo išmatuotas cukrinių runkelių siloso mėginyje – 17,81 %.
2. Taikant vienkartinės įkrovos metodą, nustatyta, kad didžiausia kumuliatyvioji biodujų išeiga pasiekta naudojant cukrinių runkelių silosą – ji siekė 170,6 l/kg. Didžiausia biometano koncentracija buvo stebima GFL (58,6 %) ir galvijų mėšle (59,1 %).
3. Nustatyta, kad žaliavoje didėjant angliavandenių koncentracijai mažėja metano koncentracija biodujose. Nors cukrinių runkelių siloso energinė vertė yra didžiausia (837,6 kWh/t), tačiau metano koncentracija biodujose yra mažiausia (49,1±0,6 %).

Literatūra

1. Farobie, O., Sari, V. A., Hartulistiyoso, E., Fatriasari, W., Nandiyanto, A. B. D., Amrullah, A., Ernawati, L., & Misbahuddin. (2025). Sustainable biogas production through anaerobic co-digestion of *Ulva lactuca* (Chlorophyta) and cow manure: A kinetic and process optimization study. *RSC Sustainability*, 3, 3483–3498. <https://doi.org/10.1039/D5SU00474H>
2. Jurgutis, L., Šlepetienė, A., Amalevičiūtė-Volungė, K., Volungevičius, J., & Šlepetys, J. (2021). The effect of digestate fertilisation on grass biogas yield and soil properties in field–biomass–biogas–field renewable energy production approach in Lithuania. *Biomass and Bioenergy*, 153, Article 106211. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106211>
3. Surendra Babu, A., & Adeyeye, S. A. O. (2024). Extraction of sugar from sugar beets and cane sugar. In *Reference Module in Food Science*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96074-3.00059-8>
4. Valle, D. S. G. M. do, Teotônio, M. A., Secundino, J. M. G., da Silva, T. C., Benvenuto, E. A. dos S., Albuquerque, A. A., Alencar, B. R. A., da Silva, A. N., Peres, S., Carvalho, R. R. da C., Dutra, E. D., & Menezes, R. S. C. (2026). Greywater use in anaerobic digestion of cattle manure: Advancing biogas yield, energy efficiency, and digestate valorization for environmental sustainability in semi-arid regions. *Journal of Environmental Management*. (In press.).
5. Vannarath, A., & Thalla, A. K. (2022). Effects of chemical pretreatments on material solubilization of *Areca catechu* L. husk: Digestion, biodegradability, and kinetic studies for biogas yield. *Journal of Environmental Management*, 316, Article 115322. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115322>

RESEARCH ON THE PROPERTIES OF RAW MATERIALS USED IN BIOGAS POWER PLANTS

Abstract

This research investigates the anaerobic digestion efficiency of various substrates - glucose syrup residues, cattle manure, and sugar beet silage - aiming to optimize biogas generation processes. The study employed the batch test method and kinetic GFL analysis to identify four characteristic fermentation phases. The results revealed significant kinetic differences: sugar beet silage exhibited the highest energetic potential (175 - 180 L/kg) and the most rapid methanogenesis, reaching peak production by the second day. In contrast, the yields from cattle manure and glucose syrup residues were approximately three times lower (60 - 65 L/kg) with stabilization occurring between days 18 and 20. It was determined that the biomass degradation rate directly correlates with the concentration of readily accessible organic matter in the substrate. The findings suggest that the technically justified hydraulic retention time (HRT) for sugar beet silage can be reduced to 15 days, while a duration of 18 - 20 days is recommended for the other substrates to ensure maximum volumetric reactor efficiency and economic viability.

Keywords: biogas, methane, organic waste, animal manure.