

MIESTO NUOTEKŲ DUMBLO IR MAISTO ATLIEKŲ MIŠINIO ANAEROBINIO PERDIRBIMO ORGANINĖS APKROVOS ĮTAKA BIODUJŲ GAMYBOS RODIKLIAMS

Aldas TRIJONIS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas aldas.trijonis@vdu.lt

Mantas RUBEŽIUS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas mantas.rubezius@vdu.lt

Kęstutis NAVICKAS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas kestutis.navickas@vdu.lt

Santrauka

Šio tyrimo tikslas – ištirti maisto atliekų ir miesto nuotekų dumblo mišinio anaerobinio perdirbimo laboratoriniame reaktoriuje organinės apkrovos įtaką biodujų išeigai ir biodujų sudėčiai. Tyrimo metu buvo taikomos nuo 0,5 g/l*d iki 3,5 g/l*d organinės apkrovos, kurios buvo pasiektos didinant maisto atliekų kiekį žaliavų mišinyje. Tyrimas atliktas 15 litrų talpos laboratoriniame reaktoriuje, į kurį kasdien buvo įkraunama 357 g miesto nuotekų dumblo ir 0,72, 144 bei 216 g maisto atliekų mišinio. Laboratoriniame bioreaktoriuje buvo palaikoma 37±0,5 °C temperatūra. Tyrimo metu nustatyta, kad didinant bioreaktoriaus apkrovą 0,5 –3,5 g/l*d ribose vidutinė biodujų išeiga padidėjo nuo 15,38 l iš vieno kg žaliavų (tyrimui naudotas tik nuotekų dumblas) iki 73,2 l/kg, kai buvo naudotas nuotekų dumblo ir maisto atliekų mišinys ir pasiekta 3,5 g/l*d organinė bioreaktoriaus apkrova. Metano koncentracija biodujose sumažėjo nuo 64,8 % (esant 0,5 g/l*d organinei apkrovai) iki 58,7 % (naudojant 3,5 g/l*d organinę apkrovą). Biodujų žemutinis šilumingumas, kintant bioreaktoriaus organinei apkrovai nuo 0,5 g/l*d iki 3,5 g/l*d, sumažėjo nuo 22,9 MJ/m³ iki 21,0 MJ/m³, o perdirbamos žaliavos energinė vertė padidėjo nuo 0,370 MJ/kg iki 1,53 MJ/kg.

Reikšminiai žodžiai: nuotekų dumblas, maisto atliekos, organinė apkrova, biodujos, biodujų išeiga, energinė vertė.

Įvadas

Anaerobinis organinių atliekų perdirbimas į biodujas yra jau daugiau negu šimtmetį sėkmingai taikoma vandens nuotekų dumblo valymo technologija (Van Loosdrecht, Brdjanovic, 2014). Perdirbant nuotekų dumblą anaerobiniuose reaktoriuose mažinama aplinkos tarša, išgaunamos biodujos, kurios naudojamos elektrai ir šiluminei energijai generuoti, transporto priemonių degalams. Didelė dalis išgautos energijos sunaudojama nuotekų valyklų energijai imliuose technologiniuose procesuose, tokiuose kaip nuotekų separavimas ir aeravimas, biomasės šildymas, dumblo džiovinimas ir kt. Anaerobinio perdirbimo proceso metu susidaręs suskaidytas produktas (digestatas) gali būti naudojamas kaip naudinga trąša ir dirvožemio gerinimo priemonė žemės ūkyje. Tačiau pastebima, kad šios technologijos nepakankamai efektyvios dabartinėmis klimato kaitos ir išteklių tausojimo sąlygomis, nes nuotekų valyklėse įrengti įrenginiai nepakankamai efektyviai panaudojami (Vinardell et al., 2021). Tai lemia santykinai mažas organinės medžiagos kiekis nuotekų dumblo sudėtyje. Nuotekų dumblo pūdymas kartu su maisto atliekomis yra naudingas būdas nuotekų įrenginiams padidinti biodujų išeigą ir įrenginių efektyvumą (Liu et al., 2021). Remiantis Lietuvos statistikos departamento duomenimis, 2021 m. Lietuvoje surinkta kiek daugiau nei 54 tūkst. tonų dumblo, iš kurio apie 31 tūkst. tonų panaudota biodujų gamybai (Statistikos departamentas, 2021). Maisto atliekos, susidaranti šalies prekybos centruose, maitinimo ar mokymosi įstaigose, galėtų būti naudojamos nuotekų valyklų biodujų jėgainėse kaip papildoma žaliava biodujų gamybai. Remiantis oficialia Eurostat statistika, Lietuvoje 2020 m. susidarė 382 tūkst. tonų žaliųjų atliekų, iš kurių 241 tūkst. tonų maisto atliekų – iš namų ūkių (Eurostat, 2020). Šiuo metu nei viena iš didžiųjų šalies nuotekų valyklų nenaudoja maisto atliekų biodujų gamybai, taip pat nei viena nuotekų valykla nereguliuoja organinės apkrovos, kuri galėtų pagerinti biodujų gamybos procesą. Reguluojant organinės apkrovos dydį, didinant arba mažinant organinę apkrovą biodujų reaktoriuje, galima valdyti biodujų gamybos procesą, o biodujų jėgaines paversti lanksčiais energijos gamybos šaltiniais (Theaker, Jensen, 2021).

Tyrimo tikslas – ištirti maisto atliekų ir miesto nuotekų dumblo mišinio anaerobinio perdirbimo organinės apkrovos įtaką biodujų išeigai ir biodujų sudėčiai.

Tyrimo uždaviniai:

1. Atlikti periodinės įkrovos eksperimentinius tyrimus, taikant skirtingas organines laboratorinio bioreaktoriaus apkrovas;
2. Nustatyti išgaunamų biodujų kiekį, sudėtį ir energinę vertę;
3. Atlikti biodujų gamybos iš maisto atliekų ir nuotekų dumblo mišinio proceso efektyvumo vertinimą.

Tyrimų objektas ir metodai

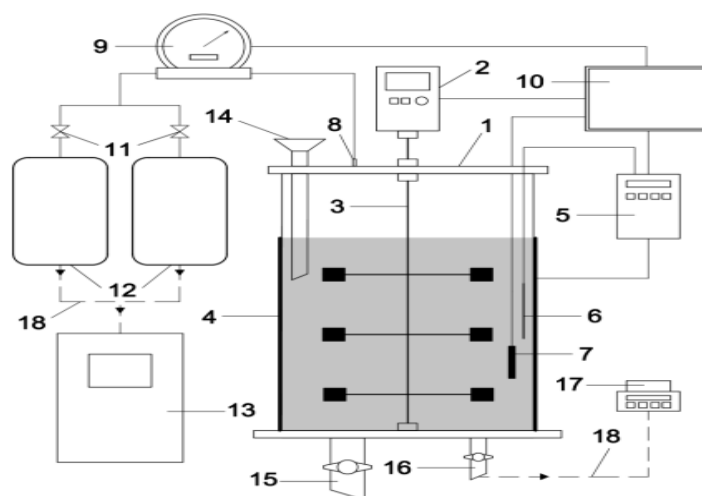
Tyrimui naudotas miesto nuotekų valyklos dumblas ir maisto atliekos, surinktos iš maitinimo įstaigų. Organinei apkrovai reguliuoti maisto atliekos ir nuotekų dumblas buvo maišomi tam tikru santykiu. Tyrimai atlikti Vytauto Didžiojo universiteto Žemės ūkio akademijos Biodujų laboratorijoje. Eksperimentinių tyrimų metu nustatyta biodujų išeiga iš žaliavų mišinio, biodujų sudėtis ir jų energinė vertė.

Organinė apkrova parodo organinės medžiagos kiekį, tenkantį vienam bioreaktoriaus tūrio vienetui per laiko vienetą (Golubowski, 2012):

$$OA = \frac{OM_{ik}}{V_{rd}}, \quad (1)$$

čia OA – bioreaktoriaus organinė apkrova, $g/l \cdot d$; OM_{ik} – įkrovoje esančios organinės medžiagos kiekis, g /per parą; V_{rd} – laboratorinio reaktoriaus tūris, l .

Tyrimui atlikti naudotas biodujų reaktoriaus stendas, kuriame imituojamas biodujų gamybos procesas. Reaktoriaus sistemos schema pateikta 1 paveiksle (Buivydas et al., 2022).



1 pav. Laboratorinis biodujų gamybos stendas: 1 – biodujų reaktorių, 2 – maišyklės pavara, 3 – maišyklė, 4 – šilumokaitis, 5 – valdymo blokas, 6 – temperatūros jutiklis, 7 – pH elektrodas, 8 – biodujų surinkimo vožtuvas, 9 – biodujų kiekio matuoklis, 10 – valdymo kompiuteris, 11 – biodujų vožtuvai, 12 – dujų surinkimo maišai 13 – biodujų analizatorius, 14 – žaliavos užpylimo anga, 15 – substrato išleidimo anga, 16 – substrato mėginių paėmimo anga, 17 – drėgmės matuoklis, 18 – digestato perdavimas analizei

Fig 1. Laboratory biogas bench: 1 – biogas reactor, 2 – mixer drive, 3 – mixer, 4 – heat exchanger, 5 – control unit, 6 – temperature sensor, 7 – pH electrode, 8 – biogas collection valve, 9 – biogas quantity meter, 10 – control computer, 11 – biogas valves, 12 – gas collection bags, 13 – biogas analyzer, 14 – raw material filling hole, 15 – substrate outlet, 16 – substrate sampling hole, 17 – moisture meter, 18 – transmission of digestate for analysis.

Biodujų tyrimo stendą sudaro 15 litrų talpos vertikalusis reaktorių 1, kuris užtikrina beorę aplinką bakterijoms. Reaktoriuje įrengta maišyklė 3 su elektroniniu valdymu, skirta biomasės vientisumui palaikyti. Šilumokaitis 4, skirtas palaikyti nustatytai temperatūrai (tyrimo metu palaikytas mezofilinis režimas – $37,0 \pm 0,5$ °C). Pagamintų biodujų kiekis buvo matuojamas tūriniu matuokliu 10 su prijungtu biodujų mėginių ėmimo talpa 8. Biodujų sudėtis nuolat analizuota analizatoriumi *Awiflex 14* (*Awite Bioenergie GmbH*, matavimų tikslumas: CH_4 0–100 %, $\pm 0,2\%$; CO_2 0–100 %, $\pm 0,2$ %; O_2 0–25 %, $\pm 0,2$ %; H_2S 0–10,000 ppm, ± 5 ppm; H_2 0–40,000 ppm, ± 5 ppm). Biodujų reaktoriuje buvo palaikoma nustatyta temperatūra, kurią matuoja temperatūros jutikliai 6. Reaktoriaus temperatūra ir šildymo sistemos darbas valdomas pagrindiniame valdymo bloke 5. Temperatūra, biodujų kiekis, substrato rūgštingumas ir sudėtis buvo registruojama valdymo kompiuteryje 10 (Buivydas et al., 2022).

Biomasės energinis potencialas buvo įvertintas remiantis šiais rodikliais: biodujų gamybos išeiga iš perdirbamos biomasės masės vieneto (b_M), metano koncentracija biodujose C_M , biodujų energinė vertė e_B , atliekų mišinio energinė vertė e_M , Biodujų išeiga per tiriamąjį laikotarpį iš tiriamų atliekų mišinio masės vieneto b_M (l/kg), nustatyta pagal šią lygtį (Navickas ir kt., 2007):

$$b_M = \frac{b_{dt}}{m}, \quad (2)$$

čia b_{dt} – pagamintų biodujų kiekis per laikotarpį dt , l ; m – tiriamų atliekų mišinio masė, kg ;

Eksperimentiniai tyrimai truko 60 dienų ir buvo atlikti keliais etapais. Pirmajame etape buvo naudojama tik nuotekų valyklos dumblo 357 g dienos įkrova. Šiame etape buvo imituojama 0,5 g/l*d biodujų reaktoriaus organinė apkrova. Antrajame etape naudoti 357 g nuotekų dumblo ir 72 g maisto mišinio mėginiai, kurie padidino reaktoriaus organinę apkrovą iki 1,5 g/l*d. Trečiajame etape taikyta 2,5 g/l*d organinė apkrova ir 144 g maisto atliekų ir 357 g nuotekų dumblo mišinio įkrovos. Ketvirtajame etape, taikant 3,5 g/l*d organines apkrovas, tas pats nuotekų dumblo kiekis maišytas su didesniu kiekiu (216 g) maisto atliekų.

Biodujų energinė vertė e_b ir atliekų mišinio energinė vertė e_M , apskaičiuotos pagal šias formules (Navickas ir kt. 2007):

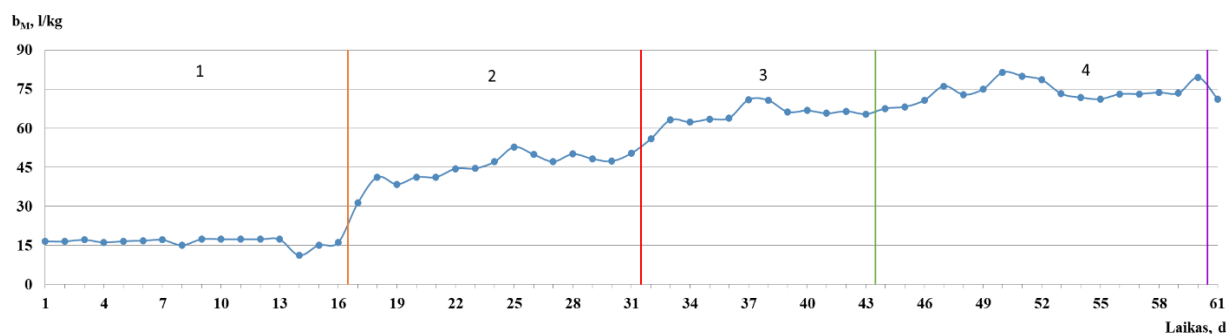
$$e_b = 0,0353 \cdot \frac{C_M}{100} \quad (3)$$

$$e_M = b_M \cdot e_b \quad (4)$$

čia C_M – metano koncentracija biodujose, %; e_b – biodujų energinė vertė, MJ/m³;

Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

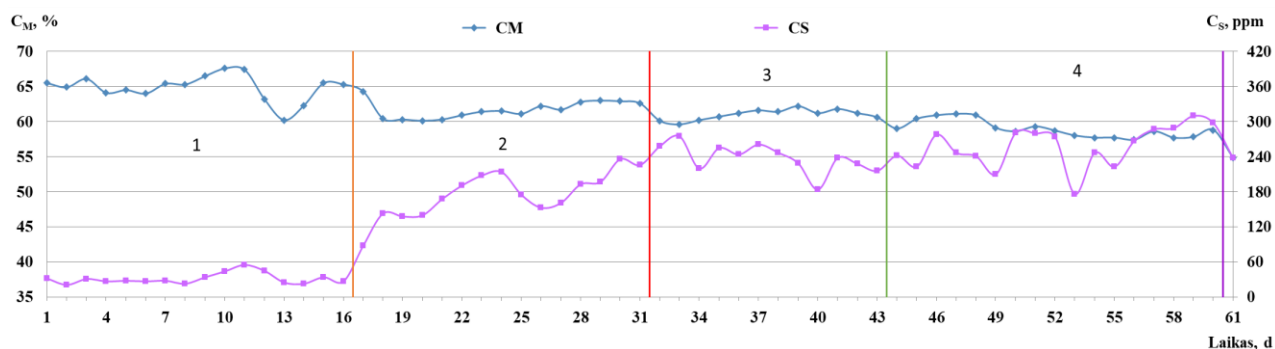
Pirmojo etapo metu (taikant 0,5 g/l*d organinę apkrovą) biodujų išeigos iš žaliavos vidutinis dydis siekė apie 15,38 l/kg (2 pav.). Maisto atliekomis padidinus organinę reaktoriaus apkrovą iki 1,5 g/l*d, biodujų išeiga ženkliai padidėjo ir pasiekė 50 l/kg reikšmes, o vidutinė biodujų išeiga padidėjo tris kartus – iki 45,0 l/kg. Trečiajame etape, taikant 2,5 g/l*d organinę apkrovą, vidutinė biodujų išeiga pasiekė 65,1 l/kg iš žaliavų mišinio. Taikant 3,5 g/l*d organinę apkrovą pasiekta 73,2 l/kg vidutinė biodujų išeiga. Apibendrinant biodujų išeigos rezultatus galima pastebėti, kad didžiausias prieaugis nustatytas padidinus organinę apkrovą nuo 0,5 iki 1,5 g/l*d, kitais tyrimų etapais vidutinis biodujų išeigos prieaugis buvo gerokai mažesnis, o paskutiniame etape padidėjo vos 12 %. Panašios tendencijos pastebėtos ir kitų tyrėjų atliktuose tyrimuose (Zhang et al., 2023). Tai susiję su išaugusia hidrauline apkrova ir sumažėjusia perdirbamos biomasės išlaikymo bioreaktoriuje trukme.



2 pav. Biodujų išeigos iš perdirbamų žaliavų mišinio dinamika (skaičiais išskirti tyrimo etapai)

Fig. 2. Dynamics of biogas yield from a mixture raw materials (numbered research stages)

Tyrimų metu nuolat buvo matuojamos metano (C_M) ir sieros vandenilio (C_S) koncentracijos biodujose. Pirmojo tyrimų etapo metu metano koncentracijos vidutinė reikšmė buvo didžiausia ir siekė 64,8 % (3 pav.). Antrajame etape, kai nuotekų dumblas pradėtas maišyti su maisto atliekomis, metano koncentracija biodujose sumažėjo iki 61,7 %. Trečiajame etape, taikant 2,5 g/l*d organinę apkrovą, metano koncentracija biodujose sumažėjo iki vidutinės 61 % reikšmės. Paskutiniajame tyrimų etape metano koncentracija sumažėjo iki 58,7 %.



3 pav. Metano ir sieros vandenilio koncentracijos pokyčiai (skaičiais išskirti tyrimo etapai)

Fig. 3. Changes in the concentration of methane and hydrogen sulfide (numbered phases of the study)

Tam įtakos turėjo baltymų liekanos maisto atliekose, kurios veikiant anaerobiniams mikroorganizmams dažnai skyla į azoto ir sieros junginius. Tokios sieros vandenilio koncentracijos yra žalingos dujas naudojantiems energinės

konversijos įrenginiams, o joms mažinti biodujų jėgainėse turi būti diegiami biologiniai ar cheminiai sieros junginių mažinimo įrenginiai.

Tyrimo metu nustatyta, kad išgautų biodujų energinė vertė, didinant bioreaktoriaus organinę apkrovą nuo 0,5 iki 3,5 g/l*d, sumažėjo nuo 22,9 iki 20,72 MJ/m³ (1 lentelė). Organinę apkrovą padidinus nuo 0,5 iki 3,5 g/l*d, atliekų mišinio energinė vertė padidėjo daugiau kaip 4 kartus (nuo 0,37 iki 1,53 MJ/kg).

1 lentelė. Miesto nuotekų dumblo ir maisto atliekų mišinio anaerobinio perdirbimo tyrimo suvestinė
Table 1. Study summary of the anaerobic processing of mixture of municipal sewage sludge and food waste

Rodikliai:	Mat. vnt.	Tyrimų etapas			
		1	2	3	4
Atliekų mišinio masė <i>m</i>	g	357	429	501	573
Sausųjų medžiagų koncentracija <i>SM</i>	%	2,697	5,993	8,342	10,101
Organinių medžiagų koncentracija <i>SOM</i>	%	2,116	5,288	7,549	9,241
Organinė apkrova <i>OA</i>	g/l.d	0,5	1,5	2,5	3,5
Hidraulinė apkrova <i>HA</i>	l/l.d	23,8	28,6	33,4	38,2
Vidutinė biodujų išeiga <i>B_m</i>	l/kg	15,38	45,0	65,1	73,2
Metano koncentracija <i>C_M</i>	%	64,8	61,7	61	58,7
Vidutinė sieros vandenilio koncentracija <i>C_s</i>	ppm	32	175	238	256
Biodujų energinė vertė <i>e_B</i>	MJ/m ³	22,90	21,78	21,53	20,72
Atliekų mišinio energinė vertė <i>e_M</i>	MJ/kg	0,370	0,980	1,40	1,53

Išvados

1. Didinant bioreaktoriaus apkrovą nuo 0,5 iki 3,5 g/l*d vidutinė biodujų išeiga iš miesto nuotekų dumblo ir maisto atliekų mišinio padidėjo beveik 5 kartus nuo 15,38 l iš vieno kg žaliavų iki 73,2 l/kg.

2. Bioreaktoriaus organinės apkrovos didinimas turėjo nežymią įtaką biodujų sudėčiai. Vidutinė metano koncentracija biodujose sumažėjo nuo 64,8 % (esant 0,5 g/l*d organinei apkrovai) iki 58,7 % (naudojant 3,5 g/l*d organinę apkrovą). Vidutinė sieros vandenilio koncentracija biodujose padidėjo nuo 60 ppm (0,5 g/l*d organinė apkrova) iki 256 ppm (3,5 g/l*d organinė apkrova).

3. Nors biodujų energinė vertė, didinant organinę apkrovą, sumažėjo nuo 22,9 iki 20,7 MJ/m³, atliekų mišinio energinė vertė padidėjo nuo 0,37 iki 1,53 MJ/kg.

4. Apibendrinus biodujų gamybos iš miesto nuotekų dumblo ir maisto atliekų mišinio, galima pastebėti, kad didžiausias biodujų išeigos ir mišinio energinės vertės prieaugis nustatytas padidinus organinę apkrovą nuo 0,5 iki 1,5 g/l*d, kitais tyrimų etapais prieaugis buvo žymiai mažesnis.

Literatūra

1. Atliekų susidarymas ir tvarkymas. 2021. Statistikos departamentas. Prieiga per internetą: <https://osp.stat.gov.lt/statistiniu-rodikliu-analize?hash=8a9b8489-4265-41c0-a5ac-9ae578527828#> (žiūrėta 2023-03-05)
2. Buivydas E., Navickas K., Venslauskas K., Žalys B., Župerka V., Rubežius M. 2022. Biogas Production Enhancement through Chicken Manure Co-Digestion with Pig Fat. *Applied Sciences*, Vol. 12(9), 4652.
3. Food waste and food waste prevention – estimates. 2020. Eurostat. Prieiga per internetą: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Food_waste_and_food_waste_prevention_-_estimates#Amounts_of_food_waste_at_EU_level (žiūrėta 2023-03-05)
4. Golubowski B. 2012. Biodujų gamybos iš paukščių mėšlo efektyvumo tyrimas. Magistro baigiamasis darbas.
5. Liu Y., Huang T., Peng D., Huang J., Maurer C., Kranert M. 2021. Optimizing the co-digestion supply chain of sewage sludge and food waste by the demand oriented biogas supplying mechanism. *Waste Management & Research*. Vol. 39(2) p. 302–313.
6. Navickas K., Župerka V., Venslauskas K. 2007. Gyvūninės kilmės šalutinių produktų anaerobinis perdirbimas į biodujas. *Žemės ūkio inžinerija*, Vol. 39 (4), p. 60 – 68.
7. Theaker H., Jensen H. 2021. Effect of a variable organic loading rate on process kinetics and volatile solids destruction in synthetic food waste-fed anaerobic digesters. *Waste Management*, Vol. 134, p. 149–158.
8. Van Loosdrecht M.C.M., Brdjanovic D. 2014. Anticipating the next century of wastewater treatment. *Science*, Vol. 344 p. 1452–1453.
9. Vinardell S., Astals S., Koch K., Mata-Alvarez J., Dosta J. 2021. Co-digestion of sewage sludge and food waste in a wastewater treatment plant based on mainstream anaerobic membrane bioreactor technology: A techno-economic evaluation. *Bioresource Technology*, Vol. 330 ID 124978.
10. Zhang X., Jiao P., Zhang M., Wu P., Zhang Y., Wang Y., Xu K., Yu J., Ma L. 2023. Impacts of organic loading rate and hydraulic retention time on organics degradation, interspecies interactions and functional traits in thermophilic anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge. *Bioresource Technology*, Vol. 370.

EFFECT OF ORGANIC LOAD ON BIOGAS PRODUCTION RATES OF ANAEROBIC PROCESSING OF SEWAGE SLUDGE AND FOOD WASTE MIXTURE

Summary

The objective of this study is to examine the influence of organic loading on biogas yield and biogas composition in a laboratory reactor for the anaerobic processing of a mixture of food waste and urban sewage sludge. The study applied organic loads from 0.5 g/l*d to 3.5 g/l*d, which were achieved by increasing the amount of food waste in the feedstock mix. The study was conducted in a 15-liter laboratory reactor, which was loaded daily with a mixture of 357 g of city sewage sludge and 0.72, 144, and 216 g of food waste. The temperature of 37 ± 0.5 °C was maintained in the laboratory bioreactor. During the study, it was found that by increasing the load of the bioreactor in the range of 0.5-3.5 g/l*d, the average biogas yield increased from 15.38 l from one kg of raw materials (only sewage sludge was used for the study) to 73.0 l/kg, when a mixture of sewage sludge and food waste was used and an organic loading of the bioreactor of 3.5 g/l*d was achieved. Methane concentration in biogas decreased from 64.8% (at 0.5 g/l*d organic loading) to 58.7 % (using 3.5 g/l*d organic loading). The calorific value of biogas decreased from 22.9 MJ/m³ to 21.0 MJ/m³ when the organic load of the bioreactor changed from 0.5 g/l*d to 3.5 g/l*d, and the energy value of the processed raw material increased from 0.370 MJ/kg to 1.53 MJ/kg.

Keywords: Sewage sludge, Food waste, Organic loading rate, Biogas, Biogas yield, Energy value.