

ISSN 0354-8651

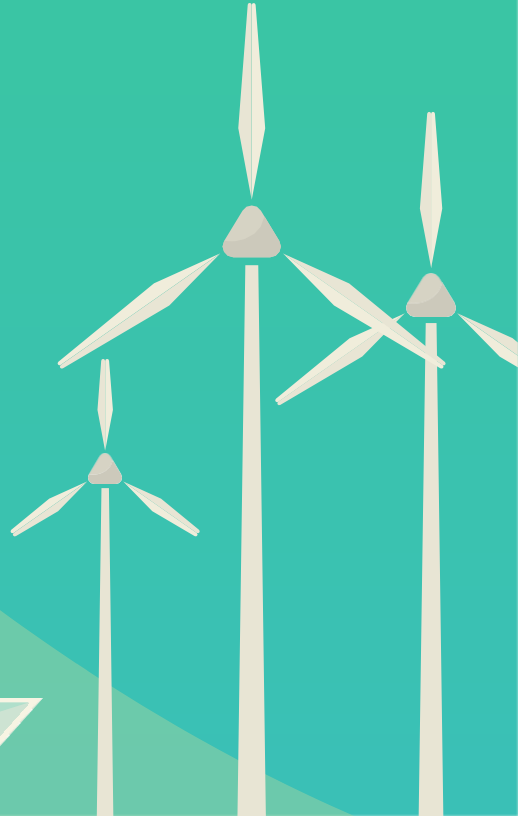


List Saveza energetičara

Broj 3 / Godina XXVI / Septembar 2024.

energija

| ekonomija | ekologija



energija

| ekonomija | ekologija

Energija / Ekonomija / Ekologija

Broj 3, Septembar 2024

Izdavač:

Savez energetičara
Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd
e-mail: info@savezenergeticara.org
<http://www.savezenergeticara.org>

Suizdavači:

Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet,
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet,
Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu

Predsednik Saveza energetičara:

prof. dr Nikola Rajaković

Predsednik Skupštine Saveza energetičara:

prof. dr Milun Babić

Glavni i odgovorni urednik:

prof. dr Dušan Gordić, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac

Uređivački odbor i izdavački savet:

prof. dr Željko Đurišić, Elektrotehnički fakultet, Beograda
prof. dr Dejan Ivezić, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
prof. dr Mirko Komatina, Mašinski fakultet, Beograd
prof. dr Miloš Banjac, Mašinski fakultet, Beograd
prof. dr Vladimir Popović, Mašinski fakultet, Beograd
prof. dr Vladimir Stevanović, Mašinski fakultet, Beogradu
prof. dr Željko Despotović, Institut Mihailo Pupin, Beograd
prof. dr Vanja Šušteršič, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac
prof. dr Petar Đukić, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd
prof. dr Nenad Đajić, Akademija inženjerskih nauka Srbije
prof. dr Damir Đaković, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
dr Vladimir Šiljkut, JP Elektroprivreda Republike Srbije
v. prof. dr Vladimir Vukašinović, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac
docent dr Tomislav Rajić, Elektrotehnički fakultet, Beograd
dr Iva Batić, Elektrotehnički fakultet, Beograd
prof. dr Jovica V. Milanović, The University of Manchester, Velika Britanija
prof. Vladimir Terzija, Humboldt Fellow, IEEE Fellow, EIC Elsevier IJEPES
prof. dr Adriana Sida Manea, Politehnica University Timisoara, Rumunija
prof. dr Neven Duić, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Hrvatska
prof. dr Rade Čirić, University of Agder, Norveška
prof. dr Nataša Markovska, MANU Skopje, Severna Makedonija
dr Stanko Janković, TenneT TSO GmbH, Savezna Republika Nemačka
prof. dr Mirza Kušljugić, Fakultet elektrotehnike, Tuzla, BiH
prof. dr Peter Virtič, Univerzitet u Mariboru, Slovenija
prof. dr Predrag Popovski, Mašinski fakultet Skopje, Severna Makedonija
dr Ilija Batas-Bijelić, Generalni sekretar Saveza, Institut tehničkih nauka SANU

Priprema, tehnička i jezička obrada:

Savez energetičara

Štamparija:

Mašinac, Kragujevac

Tiraž:

100

UDK

620.9
338:620.9
502:620.9

COBISS.SR-ID 108696839

Časopis izlazi četiri puta godišnje

Radovi su recenzirani uz tehničku obradu.
Nijedan deo ove publikacije ne može biti
reprodukovana, presnimavan ili prenošen bez
prethodne saglasnosti Izdavača.



Sadržaj

- [01] Nikola RAKIĆ, Vanja ŠUŠTERŠIČ, Natalija ALEKSIC, Nebojša JURIŠEVIĆ, Dušan GORDIĆ
Postupak ko-/digestije: primeri, postavke i eksperimentalno izvođenje / Co-/Digestion Procedure: Examples, Settings and Experimental Performance
- [11] Đorđe DUKANAC
Uticaji refleksija i difrakcija talasa i modelovanog izvora i UHF davača pri lociranju parcijalnih pražnjenja u energetsom transformatoru / Influences of Reflections and Diffractions of Waves and the Modelled Source and UHF Sensors When Locating Partial Discharges in a Power Transformer
- [21] Željko V. DESPOTOVIĆ, Boban ĐORĐEVIĆ
Primena i realizacija Ćukovog DC/DC energetskog pretvarača u praćenju tačke maksimalne snage solarnog panela / Application and Realization of Ćuk DC/DC Power Converter in MPPT of the Photovoltaic Panel
- [31] Darko ŠOŠIĆ, Goran DOBRIĆ, Mileta ŽARKOVIĆ
Ispitivanje održivosti različitih struktura kategorije kupac-proizvođač / Exploring the Profitability of Different Structures of the Prosumers
- [36] Angelina CVETANOVIĆ, Dubravka ŽIVKOVIĆ, Minja OBRADOVIĆ, Davor KONČALOVIĆ, Vladimir VUKAŠINOVIĆ, Mladen JOSIJEVIĆ, Nataša SEKULIĆ,
Održivi razvoj gradova – Da li su pametni gradovi nužno i održivi? / Urban Sustainable Development - Are Smart Cities Necessarily Sustainable?

ess energija

- [43] Bojan IVANOVIĆ, Ilija BATAS BJELIĆ, Nikola RAJAKOVIĆ, Tomislav RAJIĆ
Planiranje i rad elektroenergetskog sistema u uslovima velike proizvodnje električne energije iz solarnih elektrana / Power System Planning and Operation in Case of High Electricity Production in Solar Power Plants
- [48] Srećko ĆURČIĆ, Aleksandar PEULIĆ
Izrada energetske mape raspoloživih biomasnih sirovina u geografskom informacionom sistemu (GIS) / Creation of an Energy Map of Available Biomass Raw Materials in a Geographic Information System (GIS)
- [52] Nikola TANASKOVIĆ, Iva BATIĆ, Tomislav RAJIĆ
Prenaponska zaštita objekata priključenih na niskonaponsku mrežu / Overvoltage Protection for Objects Connected to the Low-Voltage Network
- [58] Miloš JEČMENICA, Đorđe LAZOVIĆ
Tehno-ekonomska analiza projekta vetroparka / Techno-Economic Analysis of the Wind Farm Project
- [63] Dunja GRUJIĆ, Dušan VUČIĆ, Miloš KUZMAN
Uporedna analiza i mogućnosti unapređenja položaja kupaca-proizvođača u Crnoj Gori i Republici Srbiji / Comparative Analysis and Possibilities of Improving the Status of Prosumers in Montenegro and the Republic of Serbia

Postupak ko-/digestije: primeri, postavke i eksperimentalno izvođenje

Nikola Rakić, Vanja Šušteršič, Natalija Aleksić, Nebojša Jurišević, Dušan Gordić

Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu

Rezime - Savremene tehnologije za tretiranje organskog otpada ubrajaju postupak ko-/digestije kao jedan od osnovnih. Ovaj rad daje pregled izvedenih ispitivanja na međunarodnom nivou, teorijske osnove i ključne parametre procesa ko-/digestije zaključno sa postavljenim i obavljenim eksperimentom. Ko-/digestija je predstavljena kao proces kojim se gotovo jednoznačno tretira kanalizacioni mulj ili životinjski stajnjak kao primarna podloga, i dodatni biorazgradivi materijal koji služi kao ko-supstrat. Zabeležen je širok opseg prinosa biogasa, od 118 ml CH₄/g VS do 1040 ml CH₄/g VS, za različite odnose inokulum/supstrat i supstrat/ko-supstrat. Navedeni su elementi standardnog protokola i osnovne faze anaerobne digestije. Teorijske postavke su obuhvatile parametre, inhibitorne supstance i predtretmane. Eksperimentalna procedura je sprovedena bazičnom opremom i standardnim metodama. Primarni kanalizacioni mulj i otpad od hrane su ispitivani u 4 različita odnosa (1/0; 3/1; 1/1; 1/3). Primećen je porast proizvodnje sa povećanjem udela ostataka hrane, dok je najstabilniji rad pokazala proporcija 1/1. Kod ko-digestija potvrđeni su sinergijski efekti od 7,1%, 12,8% i 17%, respektivno. Dokazano je da dodatak biorazgradivog otpada pozitivno utiče na prinos biogasa.

Ključne reči - ko-/digestija, kanalizacioni mulj, otpad od hrane, biogas, sinergija

I UVOD

U akcionom planu EU o cirkularnoj ekonomiji iz 2020. godine, poseban fokus stavljen je na postizanje klimatske neutralnosti do 2050. godine kroz efikasnu i konkurentnu ekonomiju i privredu. Sektor otpada od hrane ističe se kao važan aspekt angažmana. Anaerobna digestija identifikuje se kao jedna od tehnologija koja će imati značajnu ulogu u budućnosti. Ova tehnologija igraće važnu ulogu u dekarbonizaciji privrede, pre svega zbog njene sposobnosti da tretira organski otpad, vrati hranljive materije, i istovremeno proizvede biogas kao obnovljivo gorivo.

Anaerobna digestija se definiše kao korišćenje mikroorganizama u odsustvu kiseonika radi stabilizacije organskih materija i pretvaranja u metan (CH₄) i neorganske produkte, uključujući ugljen-dioksid. Postupak koji se primenjuje već više od jednog veka, uspešno se koristi za stabilizaciju organskog mulja u postrojenjima za prečišćavanje otpadnih voda (komunalnih otpadnih voda) i za razgradnju organskih materija iz procesa proizvodnje i odlaganja hrane. Interesovanje za korišćenje ove tehnologije za obradu ostalih organskih čvrstih materija, kao što su organski otpad i energetske usevi, naglo je poraslo zbog novih i strožijih propisa o odlaganju organskog otpada, kao i potrebe za pronalazanjem novih izvora energije koji predstavljaju

alternativu fosilnim gorivima.

Ko-digestija se odnosi na istovremeno anaerobno razlaganje homogene smeše dva ili više supstrata. Ko-supstrati su organski supstrati koji se zajedno tretiraju sa glavnom sirovinom. Upotreba ko-supstrata ima pozitivan uticaj na proces digestije zahvaljujući uravnoteženju hranljivih materija, poboljšanoj transformaciji organske materije i stabilizaciji, što rezultira većim prinosom biogasa i ekonomičnijim procesom. Osim biogasa koji se već uspešno koristi za proizvodnju električne i toplotne energije, kao i za snabdevanje gasnih mreža (uz prečišćavanje), dodatni izvor prihoda predstavlja polu-čvrsti nusprodukt. Zbog visokog sadržaja hranljivih materija, ovaj nusprodukt može se direktno koristiti u poljoprivredi kao đubrivo, ili preraditi u kompost radi poboljšanja kvaliteta tla [1].

Dodatne prednosti procesa ko-digestije obuhvataju: (1) razblaživanje potencijalnih toksičnih jedinjenja, ukoliko su prisutna u bilo kojem od uključenih ko-/supstrata; (2) kontrolisanje sadržaja vlage i pH vrednosti; (3) pružanje neophodnog puferskog kapaciteta; (4) povećanje količine biorazgradivog materijala; (5) diversifikacija bakterijskih sojeva koji učestvuju u procesu. Sve ove prednosti doprinose poboljšanim performansama procesa.

Sve vrste biomase koje sadrže makro-hranljive sastojke poput ugljenih hidrata, belančevina, masti, ulja, celuloze i hemiceluloze pogodne su za proces biogasifikacije i koriste se kao podloga za ko-digestiju. Teorijski prinos biogasa varira u velikoj meri u zavisnosti od prisutstva tri glavne makro-hranljive materije: lipida, ugljenih hidrata i proteina. Pored ovih, ligno-celulozni ostaci takođe su istraženi za primenu. Glavni nutrijenti prisutni u ovim ostacima su celuloza i hemiceluloza. Biološka razgradivost navedenih hranljivih materija značajno varira.

Lipidi najviše doprinose proizvodnji biogasa sa dužim vremenom retencije zbog manje biorazgradivosti, dok proteini i ugljeni hidrati pokazuju brže stope konverzije sa manjim prinosom biogasa. Proces ko-digestije dovodi do proizvodnje biogasa koja se može povećati korišćenjem različitih potencijalnih ko-supstrata u određenoj proporciji. Ipak, brojne studije [2, 3, 4.] pokazuju da optimalni uslovi rada u smislu procene ko-supstrata ne mogu biti jednoznačno definisani, već ih treba prilagoditi za svaki specifičan slučaj.

II IZVEDENA ISPITIVANJA

Anaerobna digestija ima značajan potencijal za ponovno korišćenje energije i stabilizaciju otpadne biomase [5]. Ipak, pojedinačna digestija u dugoročnim operacijama može imati negativne posledice vezane za karakteristike supstrata, odnosno neravnotežu hranljivih sastojaka u sistemu. Na primer, talog iz

kanalizacije ima nizak sadržaj organske čvrste materije, što rezultira smanjenom proizvodnjom metana. Životinjski stajnjak sadrži visoke koncentracije azota koje mogu inhibirati metanogene. Otpadna hrana ima visoke koncentracije natrijuma i nizak kapacitet pufera. Agroindustrijski otpad predstavlja sezonsku biomasu i često mu nedostaje azota. Otpad iz klanice karakterišu visoke koncentracije dugolančanih masnih kiselina i azota, što može zaustaviti proces. Stoga, anaerobna ko-digestija sirovina se ističe kao obećavajuća opcija za prevazilaženje nedostataka mono-digestije i za poboljšanje ekonomske održivosti postrojenja. Zbog toga je došlo do povećanog interesovanja za istraživanje ovog procesa, posebno u kontekstu korišćenja mulja/stajnskog đubriva u kombinaciji sa agroindustrijskim ostacima, organskom frakcijom čvrstog komunalnog otpada, algama, uljem i mastima.

Tradicionalno, proces anaerobne digestije se sprovodi sa jednim supstratom. Međutim, nedavno je prepoznato da se stabilnost procesa poboljšava kada se poveća raznovrsnost supstrata koji se istovremeno primenjuju. Često se događa da se velika količina osnovnog supstrata (na primer, stajsko đubrivo ili mulj iz otpadnih voda) pomeša i digestira zajedno sa manjim količinama pojedinačnih ili različitih dodatnih supstrata. Korišćenje ko-supstrata obično povećava prinos biogasa iz anaerobnih digestora zbog pozitivnih sinergizama koji se uspostavljaju u mediju za obradu i zbog dodavanja nedostajućih hranljivih sastojaka samim ko-supstratima [6]. U određenom broju studija prikazane su moguće ekološke, tehnološke i ekonomske prednosti ko-digestije, kao što su poboljšana ravnoteža nutrijenata, visok kvalitet digestata i povećana i stabilna proizvodnja biogasa tokom sezona. Nadalje, ko-digestija organskog otpada sa muljem iz komunalnih otpadnih voda može povećati proizvodnju digestorskog gasa i obezbediti uštedu u ukupnim energetskim troškovima postrojenja [7].

U istraživanju [8] sprovedeni su testovi bio-hemijskog potencijala metana kako bi se utvrdila upotrebljivost četiri vrste supstrata otpada od hrane (ostaci crvenog mesa, piletine, brusnice i sladoleda). Proces ko-digestije sa ispranim stajnjakom od uzgoja muznih krava je vršen u odnosu od 3,2% otpada od hrane i 96,8% stajnjaka (po zapremini), što odgovara odnosu od 14,7% (sladoled) do 80,7% (piletina) isparljivih čvrstih supstanci (VS) koje se pripisuju otpadu od hrane. Svi tretmani su rezultirali povećanjem proizvodnje metana, u rasponu od 67,0% za otpad od sladoleda do 2.940% kod otpada od prerade piletine, u poređenju sa mono-digestijom stajnjaka. Ovi rezultati ukazuju na veliki potencijal proizvodnje metana prilikom dodavanja otpada od hrane, u poređenju sa relativno malim potencijalom proizvodnje metana ispranog stajnjaka od uzgoja muznih krava, čak i ako je ukupna količina dodatog otpada od hrane bila minimalna.

Prema rezultatima istraživanja koje su sproveli Hallaji i saradnici [9], anaerobna ko-digestija otpadnog aktivnog mulja sa mešanim voćnim otpadom i sirom surutkom poboljšava proizvodnju metana i kvalitet digestiranog mulja u poređenju sa anaerobnom digestijom otpadnog aktivnog mulja, pojedinačno. Autori su zaključili da se odnos ugljenika i azota u mešavini otpadnog aktivnog mulja, voćnog otpada i sirne surutke značajno poboljšao, što je rezultiralo boljom aktivnošću anaerobnih

organizama. Procenom aktivnosti proteaze i celulaze, glavnih enzima koji hidrolizuju organsku materiju u anaerobnoj digestiji, pokazano je da ko-digestija otpadnog aktivnog mulja sa mešanim voćnim otpadom i surutkom povećava aktivnost ovih enzima za 22% i 9%, redom.

Najviša specifična proizvodnja metana postignuta u bioreaktoru koji je sadržao 85% otpadnog aktivnog mulja iznosila je 384,1 mL CH₄/g VS. Ovo je bilo 31% više u poređenju sa kontrolnim bioreaktorom sa 292,76 mL CH₄/g VS i 5% više u poređenju sa bioreaktorom koji je sadržao 90% otpadnog aktivnog mulja i 10% kombinovane surutke i voćnog otpada (sa 370,77 CH₄/g VS). Procenat metana tokom anaerobne digestije kretao se između 53 i 65%. Računanjem srednjih vrednosti sadržaja metana iz različitih bioreaktora, pokazano je da je srednja vrednost kod ko-digestivnih bioreaktora povećana za 3%, dostižući vrednost od 59%.

Anaerobna ko-digestija otpada od hrane predstavlja optimističnu alternativu deponovanju, kao još jedna od njenih prednosti. U istraživanju koje su sproveli Ebner i saradnici [10], analizirano je 11 vrsta komercijalnog otpada od hrane i 12 mešavina za procese ko-digestije. Koristeći testove bio-hemijskog potencijala metana, izračunati su biometanski potencijali, biodegradabilna frakcija i koeficijenti hidrolize prvog reda. Otkriveno je da su potencijali biometana u otpadu od hrane varirali od 165 do 496 mL CH₄/g VS. Ko-supstrati sa visokim udelom lipida ili lako razgradivih ugljenih hidrata pokazali su najbolje rezultate u proizvodnji metana. Prosečni biometanski potencijal za ko-digestirane smeše bio je u rasponu od 5% do 20% viši u odnosu na potencijal pojedinačnih supstrata. Koeficijenti stope hidrolize su se kretali od 0,19 d⁻¹ do 0,65 d⁻¹. Materijali koji su bili zajedno ko-digestirani pokazali su ubranu stopu hidrolize u poređenju sa prosečnim brzinama pojedinačnih supstrata. Ovi rezultati nude važne informacije o ključnim parametrima digestije, što može doprineti unapređenju metoda modeliranja i primene komercijalnog otpada od hrane u procesu anaerobne ko-digestije.

U istraživanju koje su sproveli Xie i njegovi saradnici [11], proučavani su procesi anaerobne mono-digestije i ko-digestije primarnog mulja sa dva različita organska otpada: otpadom od hrane i otpadom od papirne pulpe. Cilj je bio proceniti potencijal za proizvodnju metana i razumeti kako se odvija sinergijski efekat ovih procesa. Tokom mono-digestije, specifični prinosi metana su iznosili 159 mL/g VS za primarni mulj, 652 mL/g VS za otpad od hrane i 157 mL/g VS za otpad od papirne pulpe. Međutim, kada je primarni mulj kombinovan sa otpadom od hrane ili otpadom od papirne pulpe, specifični prinosi metana značajno su porasli, dostižući 799 mL/g VS i 368 mL/g VS, redom. U istraživanju nije primećena značajna promena pH vrednosti ni prisustvo inhibicionih jedinjenja u medijumu. Sinergijski efekat ko-digestije je potvrđen kroz analizu uklanjanja organske isparljive materije i hemijske potrošnje kiseonika (COD). Bilans COD-a je pokazao da je tokom ko-digestije primarnog mulja sa otpadom od hrane ili otpadom od papirne pulpe dodatnih 32%, odnosno 19%, COD-a pretvoreno u biogas. Kinetičko modeliranje je pokazalo da se konstanta stope prvog reda povećala sa 0,18 na 0,63 d⁻¹ tokom ko-digestije otpada od papirne pulpe, što se može pripisati visoko rastvorljivoj biodegradabilnoj frakciji papirne pulpe u primarnom

mulju. Ovi rezultati pružaju korisne informacije vezano za uspostavljanje metodologije za poboljšanje anaerobne digestije i efikasnije korišćenje organskog otpada u održivim procesima proizvodnje energije.

U istraživanju [12] analizirana je karakterizacija sadržaja lipida, proteina i ugljenih hidrata u sirovinama za ko-digestiju, kao i njihov uticaj na proizvodnju biogasa. Ispitano je deset različitih mešavina ko-/supstrata koje su pripremljene u varijabilnim odnosima otpada od hrane, masti i ulja, te otpadnog aktivnog mulja, koristeći testove bio-hemijskog metanskog potencijala. Takođe su sprovedeni procesi mono-digestije tri glavna supstrata. Rezultati su pokazali da je najniži prinos metana dobijen kod mono-digestije aktivnog mulja sa samo 118 mL CH₄/g VS. Sa druge strane, mešavina koja je sadržala 50% mulja i 50% masti i ulja, pri čemu su 85% te mešavine činili lipidi, a 15% proteini, pokazala je najveći prinos od 1040 mL CH₄/g VS. Uzorci bogati lipidima pokazali su se kao efikasniji u proizvodnji biogasa u poređenju sa uzorcima bogatim proteinima i ugljenim hidratima. Ipak, uzorci bogati proteinima i ugljenim hidratima ispoljili su bržu proizvodnju biogasa.

U studiji [13] za reakciju anaerobnog serijskog testa, pripremljena su tri različita tipa uzoraka:

1. uzorak koji sadrži otpad od hrane (50 mL) i inokulum (10 mL) za digestiju otpada od hrane,
2. uzorak koji sadrži aktivni mulj (50 mL) i inokulum (10 mL) za digestiju kanalizacionog mulja,
3. uzorak koji sadrži ostatke hrane (35 mL) sa aktivnim muljem (15 mL) i inokulumom (10 mL) za anaerobnu ko-digestiju.

Zapreminski odnos otpada od hrane prema aktivnom mulju za ko-digestiju bio je 7:3, dok je odnos zasnovan na isparljivoj suspendovanoj čvrstoj supstanci bio 100:5,7. pH vrednost je podešena na 7,0 pre inokulacije anaerobnom semenskom podlogom. Za podešavanje pH vrednosti korišćeni su rastvori NaHCO₃ i HCl.

Efekat prethodnog tretmana i anaerobne ko-digestije otpada od hrane i otpadnog aktivnog mulja procenjen je kroz smanjenje ukupne suspendovane čvrste materije, redukciju isparljivih suspendovanih čvrstih supstanci (VSS), uklanjanje COD-a i proizvodnju metana. Termička obrada i anaerobna digestija su spustile isparljive čvrste čestice do 43,4% za otpad od hrane i 43,1% u eksperimentu ko-digestije, što je povećalo rastvorljivost sirovine. Prinosi metana ultrazvučnim tretmanom su dostigli 206,4 (za digestiju hrane) i 326,3 (za ko-digestiju) mL CH₄/g VSS, što je bilo 50,5% odnosno 56,2% veće od prinosa kontrolnog uzorka. Rezultati su pokazali da je svaki predtretman imao poseban efekat na različite sirovine zbog njihovog različitog sastava.

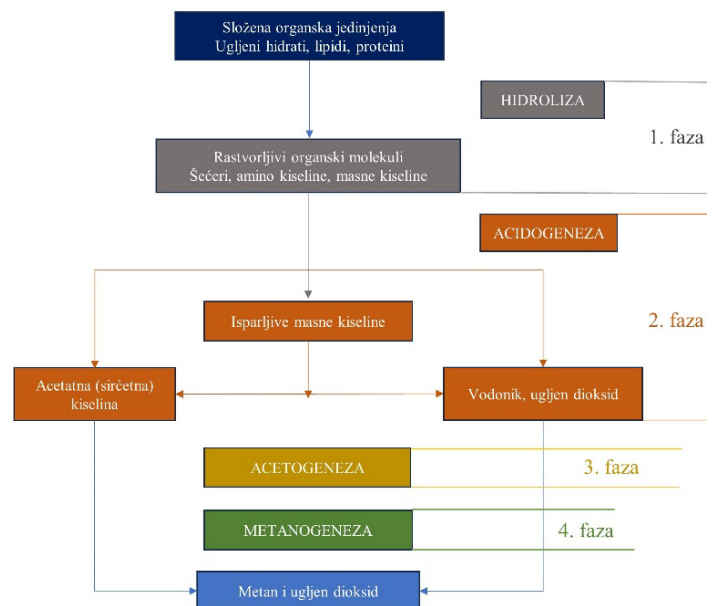
III TEORIJSKE POSTAVKE

Definisanje standardnog protokola za analizu biometanskog potencijala u procesu anaerobne degradacije predstavlja izazov zbog kompleksnosti tog procesa i povezanosti mikrobioloških, bio-hemijskih i fizičko-hemijskih aspekata. Zbog toga, stručnjaci iz istraživačke zajednice ističu potrebu za zajedničkim protokolom kako bi se jasno definisao test biometanskog

potencijala [14]. Pri karakterizaciji supstrata za anaerobnu digestiju, važno je odrediti ukupnu čvrstu materiju (TS), isparljive čvrste materije, kao i hemijsku potrošnju kiseonika, azot i ugljenik. Posebna pažnja se posvećuje i sadržaju celuloze, hemiceluloze i lignina, naročito kod energetskih useva i poljoprivrednog otpada. Veličina čestica ima ključnu ulogu u procesu anaerobne digestije jer manje čestice omogućavaju veću površinu za enzimске reakcije. Uvođenje većih čestica u supstrat može smanjiti brzinu iskorišćenja supstrata, ali i uticati na brzinu proizvodnje biogasa. Inokulum, koji se koristi kao semenski materijal, treba da bude homogen i svež, bez nečistoća poput kamena ili drveta. Osim toga, bitno je da koncentracija inokuluma bude veća od koncentracije supstrata, što može uticati na konačne rezultate procesa digestije, a odnos supstrata prema inokulumu je jedan od glavnih parametara koji utiču na rezultate anaerobnih ispitivanja [15]. Sve ove karakteristike i parametri važni su za uspostavljanje standardizovanog protokola za analizu biometanskog potencijala u anaerobnoj digestiji.

III-1 Faze anaerobne ko-/digestije

Otpad od hrane nije samo obična organska materija, već sadrži razne elemente u tragovima. Zbog toga je proces anaerobnog razlaganja otpada od hrane predmet intenzivnih istraživanja. Organska materija u otpadu od hrane pruža pogodno okruženje za rast mikroorganizama u odsustvu kiseonika [16]. Ovaj proces se može opisati kao biološki, gde mikroorganizmi razgrađuju kompleksne organske materije i pretvaraju ih u biogas. U većini istraživanja, proces anaerobnog razlaganja se obično deli na četiri faze: hidrolizu, acidogenezu, acetogenezu i metanogenezu. Međutim, prema drugim autorima poput Molino i saradnika [17], ovaj proces se može podeliti na tri faze: hidrolizu, acidogenezu i metanogenezu. Bez obzira na podele, svi ovi koraci obuhvataju ključne procese koji dovode do proizvodnje biogasa (Slika 1).



Slika 1. Faze anaerobne digestije

III-2 Parametri procesa ko-/digestije

Postoji nekoliko faktora koji mogu uticati na performanse

anaerobne digestije i potencijal proizvodnje biogasa. U okviru ove podsekcije, faktori i karakteristike procesa će biti kratko opisani.

pH vrednost sadržaja digestora je važan pokazatelj performansi i stabilnosti anaerobnog procesa. U dobro izbalansiranom procesu, gotovo svi produkti metaboličke faze se konstantno pretvaraju u sledeći produkt bez značajne akumulacije međuproizvoda (poput različitih masnih kiselina) koje bi uzrokovale pad pH vrednosti. Pri proizvodnji biogasa, različiti mikroorganizmi zahtevaju različite optimalne pH vrednosti, iako većina njih preferira neutralni pH. Za postizanje maksimalnog prinosa metana, mnogi istraživači su primetili da je poželjno održavanje pH vrednosti između 6,8 i 7,2. Hidrolizni i acidogeni mikroorganizmi preferiraju pH vrednosti u opsegu od 5,5-6,5 [18]. Međutim, optimalna pH vrednost za metanogene mikroorganizme je bliska 7,0. Proizvodnja isparljivih masnih kiselina u početnim fazama digestije snižava pH vrednost u digestoru i inhibira metanogenu aktivnost mikroorganizama. Alkalnost i pH u anaerobnoj digestiji mogu se prilagoditi korišćenjem nekoliko hemikalija poput natrijum-karbonata, kalijum-karbonata, kalcijum-karbonata (kreča), kalcijum-hidroksida (brzog kreča) i natrijum-nitrata. Dodavanje bilo koje odabrane hemikalije za prilagođavanje pH vrednosti treba obavljati polako, kako bi se sprečili bilo kakvi negativni efekti na bakterije.

Temperatura je jedan od najvažnijih parametara anaerobne ko-/digestije, jer utiče ne samo na metaboličke aktivnosti mikrobiološke populacije (aktivnost enzima i koenzima), već i na prinos metana (posebno brzine hidrolize i metanogeneze) i kvalitet digestata (efluenta). Generalno, anaerobne bakterije mogu rasti u psihrofilnim (10–30°C), mezofilnim (30–40°C) i termofilnim (50–60°C) uslovima. Efikasnost digestije, međutim, raste sa povećanjem temperature, ističući prednosti termofilnog rada sa većim metaboličkim stopama, većim specifičnim stopama rasta i većim stopama uništavanja patogena zajedno sa većom proizvodnjom biogasa. Potvrđeno je da je termofilna digestija manje inhibirana akumulacijom amonijaka nego mezofilna [19]. Ukazano je da se proizvodnja biogasa u termofilnim uslovima više nego udvostručuje u poređenju sa proizvodnjom u psihrofilnim. S druge strane, mezofilne bakterije su stabilnije i mogu tolerisati veće promene u okolnim parametrima, uključujući temperaturu. Manji digestori, loše izolovani digestori ili digestori u hladnim klimatskim uslovima podložni su ekstremnim fluktuacijama temperature, pa bi bilo korisno voditi digestor u mezofilnom opsegu kako bi se smanjila mogućnost pucanja sistema. Iako je potrebno duže vreme boravka, stabilnost mezofilnog procesa čini ga popularnijim u trenutnim postrojenjima za anaerobnu ko-digestiju.

Iako je bilo mnogo kontradikcija, istraživači su se složili da mešanje igra važnu ulogu u anaerobnoj digestiji čvrstog otpada. Agitacija osigurava adekvatan kontakt između dolaznog svežeg supstrata i održive bakterijske populacije, sprečavajući termalnu stratifikaciju i formiranje površinske pokorice u anaerobnom reaktoru [20]. Pored toga, mešanje osigurava da čvrsti materijal ostane u suspendovanom stanju i izbegava formiranje mrtvih zona sedimentacijom peska ili teških čvrstih čestica. Mešanje takođe omogućava smanjenje veličine čestica kako digestija napreduje i oslobađanje proizvedenog biogasa iz sadržaja

digestora [21]. Prema [22] mešanje se može izvoditi na nekoliko načina, kao što su mehanički mešači, recirkulacija mulja (digestivni mulj) ili ubrizgavanje proizvedenog biogasa. Mehanički sistemi za mešanje obično koriste kružne lopatice niskih brzina i najbolje odgovaraju digestorima sa fiksnim poklopcima. Mulj digestora se transportuje rotirajućim propelerom, čime se mešaju sadržaji digestivne posude. Recirkulacija se obezbeđuje centrifugalnim pumpama, obično kroz unutrašnje ili spoljno cevno vratilo, kako bi se ostvarilo vertikalno mešanje. Ona se vrši izvlačenjem digestivnog mulja iz centra digestora. Zatim se mulj pumpa kroz spoljne izmenjivače toplote, gde se meša sa sirovim muljem i zagreva na željenu temperaturu. Nakon toga, mulj se pumpa nazad u digestorsku posudu kroz mlaznice na dnu ili vrhu digestora. Nedostatak ove metode je što je potrebna relativno visoka brzina recirkulacije da bi se osiguralo potpuno mešanje (stoga je potrebna velika količina energije). Recirkulacijom biogasa se izbegava formiranje korice.

Suviše visok ili nizak sadržaj ukupnih čvrstih materija može imati štetan uticaj na kontakt između sirovina, enzima i mikroorganizama u anaerobnim reaktorima. Takođe, može negativno uticati na hidrauličko vreme zadržavanja (HRT) smanjenjem razgradnje i specifične proizvodnje metana. Stoga, kraći HRT zahteva nizak sadržaj TS radi poboljšanja proizvodnje. Visok sadržaj TS takođe može narušiti kvalitet mešanja rezultirajući manjim kontaktom između sirovina i bakterija, što dovodi do dužih vremena tretmana ili niže stabilizacije mulja, u poređenju sa razblaženim sadržajem. Prikladan nivo TS unutar reaktora je u opsegu od 10-50 g TS/L. Međutim, treba napomenuti da se navedeni primeri TS odnose na mokru anaerobnu digestiju, dok je sadržaj TS u polu-suvim i suvim procesima anaerobne digestije >15%, obično 20-50% [21].

Isparljive čvrste materije se generalno tretiraju kao mera organske frakcije ukupnih čvrstih materija, iako bi precizniji opis bio količina materije u mulju koja se gubi tokom sagorevanja. Sadržaj isparljivih čvrstih materija određuje se sagorevanjem preostalih čvrstih materija dobijenih merenjem ukupnih čvrstih materija na 550°C, iako je tokom merenja ukupnih čvrstih materija već moglo doći do nekog isparavanja. Pored COD-a i VS se može tretirati kao mera organske materije u vodi, iako je prva tačnija mera. Međutim, obe mere se mogu koristiti kao osnova za određivanje organske opterećenosti digestora. Poput odnosa biološke i hemijske potrošnje kiseonika, smanjenje VS-a se takođe tretira kao mera efikasnosti digestora, i može se pojaviti kao komponenta drugih mera.

Hemijska potrošnja kiseonika je važan parametar u ciklusu upravljanja otpadom, posebno za praćenje procesa poput anaerobne ko-/digestije. Za analizu performansi digestora, neophodno je izračunati tačan maseni bilans na osnovu hemijske potrebe za kiseonikom koja ulazi i izlazi iz reaktora, što na kraju pruža bolje razumevanje sistema (jer se zna ukupna digestabilna materija). Poboljšan COD je povezan sa većom potencijalnom proizvodnjom biogasa u bio-hemijskim reaktorima, jer veći prinos metana (pri relativno konstantnom odnosu metan/biogas) implicira da su anaerobni organizmi konzumirali veće količine organske materije, rezultirajući nižim COD-om na kraju tretmana [22]. Zaista, COD je ključni parametar koji se pokazao korisnim

za procenu biodegradabilnosti ko/supstrata i energetske tokova celokupnog procesa [23].

Hidraulično vreme zadržavanja je mera koja opisuje prosečno vreme koje određeni supstrat provede u digestoru.

$$HRT = \frac{V_r}{Q_w} \left[\frac{m^3}{m^3 d^{-1}} = d \right] \quad (1)$$

U praksi, tipično vreme zadržavanja za digestiju komunalnog mulja iznosi oko 20 dana, tokom kojih se postiže uklanjanje isparljivih čvrstih materija (biodegradacija) od 25-60%. U digestoru sa kontinuiranim mešanjem, sadržaj reaktora ima uniformno vreme boravka. U ovom sistemu, minimalno vreme je određeno stopom rasta najsporije rastućeg neophodnog mikroorganizma u anaerobnoj bakterijskoj zajednici. Dalje, skraćivanje vremena boravka smanjuje veličinu digestora, što rezultira uštedama kapitalnih troškova. Osim toga, kraće vreme boravka daje veću stopu proizvodnje biogasa, ali treba očekivati nižu efikasnost razgradnje organske materije zajedno sa nižom stabilnošću procesa.

III-3 Inhibitorne supstance

Inhibicija u procesu anaerobne ko-/digestije sa prisustvom toksičnih supstanci može se javiti na nekoliko različitih nivoa, što može uzrokovati poremećaj proizvodnje biogasa i uklanjanja organske materije ili čak prestanak proizvodnje biogasa u digestoru. Ovi tipovi supstanci mogu se naći kao sastavni delovi ko-/supstratne materije (organski čvrsti otpad) ili kao nusproizvodi metaboličkih aktivnosti bakterijskih kolonija u digestoru. Publikacije o anaerobnoj ko-/digestiji pokazuju široku varijaciju nivoa inhibicije/toksiciteta za većinu supstanci.

Amonijak (NH_3) je hidrolitički produkt koji se formira tokom anaerobne digestije čvrstog otpada razgradnjom azotnih materija u obliku proteina, fosfolipida, azotnih lipida i nukleinskih kiselina. Mehanizmi inhibicije amonijakom dešavaju se zbog promene intracelularnog pH, povećanja potražnje za energijom kako bi se prevazišli toksični uslovi i inhibicije specifičnih enzimskih reakcija.

Formiranje inhibitora vodonik sulfida (H_2S) u anaerobnoj digestiji rezultat je redukcije oksidovanih sumpornih jedinjenja i disimilacije sumpornih aminokiselina, poput cisteina, od strane bakterija koje redukuju sulfate. Redukciju vrše dve velike grupe bakterija koje redukuju sulfate: nepotpuni oksidatori koji oksiduju jedinjenja poput laktata u acetat i CO_2 i potpuni oksidatori (acetoklastične bakterije koje redukuju sulfate) koje potpuno konvertuju acetat u CO_2 i HCO_3^- . Obe grupe koriste vodonik za redukciju sulfata.

Joni lakih metala, uključujući natrijum (Na^+), kalijum (K^+), kalcijum (Ca^{2+}) i magnezijum (Mg^{2+}), najčešće su prisutni u digestatu anaerobnih reaktora. Oni mogu nastati kao proizvod razgradnje organske materije u obliku supstrata ili dodavanjem hemikalija radi podešavanja pH vrednosti. Umerene koncentracije ovih jona su potrebne za stimulaciju rasta mikroorganizama, ali prekomerne količine ga usporavaju, dok još veće koncentracije mogu izazvati ozbiljnu inhibiciju ili toksičnost.

Slično kao joni lakih metala, prisustvo tragova teških metala stimuliše rast flore anaerobnog digestora. Međutim, za razliku od

drugih toksičnih supstanci, teški metali nisu biorazgradivi i mogu se nakupiti u potencijalno toksičnim koncentracijama. Opsežna studija o performansama anaerobnih reaktora pokazala je da je toksičnost teških metala jedan od glavnih uzroka poremećaja ili neuspeha anaerobnog procesa [24]. Toksični efekat teških metala pripisuje se njihovoj sposobnosti da inaktiviraju širok spektar enzimskih funkcija i struktura vezivanjem metala za tiol (sulfhidril) i druge grupe na proteinima ili zamenom osnovnih metala u prostetskim grupama enzima.

Mnoga organska jedinjenja pokazala su potencijal za inhibiciju procesa anaerobne digestije. Nakupljanje hidrofobnih organskih zagađivača u bakterijskim membranama uzrokuje propuštanje ćelijske membrane, što na kraju dovodi do njenog pucanja. Rasponi toksičnih koncentracija organskih jedinjenja variraju široko i na njih utiču mnogi parametri, uključujući koncentraciju biomase, vreme izloženosti toksinima, starost ćelija mikroorganizama, raspored prihrane reaktora, aklimatizaciju i temperaturu. Neki od važnih organskih supstanci koje inhibiraju anaerobnu digestiju su: hlorofenoli, halogenisani alifati, azotom zamenjeni aromati, poli-masne kiseline, lignini i srodni spojevi lignina.

III-4 Predtretmani

Predtretman organskih materija pre anaerobne ko-/digestije ima za cilj poboljšanu hidrolizu (tj. razdvajanje tečnih organskih materija od čvrstih) i time potpunije iskorišćenje sirovine od strane mikroorganizama. Predtretmani takođe mogu osloboditi čestice iz njihove prethodne strukture i razbiti ćelijske zidove na način koji je pogodan za dalju hidrolizu. Poboljšana hidroliza doprinosi intenzivnijem procesu digestije, što dovodi do povećane proizvodnje biogasa i potpunog razlaganja sirovine. Odgovarajući predtretmani takođe mogu ubrzati mikrobiološke aktivnosti i izbeći ili prevazići inhibiciju procesa. Prethodni tretmani mogu uništiti patogene i neželjene mikroorganizme, kao i intezivirati proces.

Mehaničkim predtretmanom razlažu se ili drobe čvrste čestice supstrata kako bi oslabili veze između ćelija i povećali specifičnu površinu kontakta. Povećana površina omogućava bolji kontakt između supstrata i anaerobnih bakterija, čime se poboljšava anaerobni proces. Izumi i saradnici [25] proučavali su odnos između veličine čestica i akumulacije isparljivih masnih kiselina. Ustanovili su da se prinos metana povećavao za 28% kada je veličina čestica smanjena sa 0,843 mm na 0,391 mm. Međutim, ako je veličina čestice ispod prosečne, dolazi do prekomernog nakupljanja kiselina i smanjenja prinosa metana.

Termalni predtretmani koriste se za tretiranje aktivnog otpadnog mulja, stajnjaka i biodegradabilnog otpada sa fokusom na koncentrisanje materijala i razgradnju ili razbijanje struktura oslobađanjem vezane vode [26]. Termalni tretman takođe može intenzivirati aktivnost anaerobnih mikroorganizama. Mikrotalasi, γ -zračenje i ultrazvuk ciljaju na fizičko razbijanje ćelijskih struktura. Mikrotalasi, kao termalni predtretman, povećavaju viskoznost mulja kroz povećanu temperaturu, dok γ -zračenje utiče na pasterizaciju usled visokog energetske sadržaja samih zraaka.

Hemijski predtretmani obično imaju za cilj razbijanje molekularnih struktura putem uvećanja pH dodavanjem baze,

dok neutralizacija takođe može razrediti hranljive materije. Biološki predtretmani se uglavnom vrše enzimima i inteziviraju proces anaerobne ko-/digestije povećanjem hidrolize u dodatnoj fazi, pre glavnog procesa digestije.

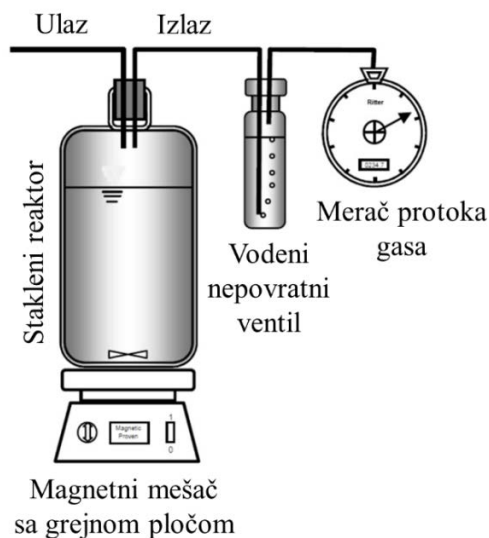
IV EKSPERIMENT

Eksperiment anaerobne ko-digestije kanalizacionog mulja i otpada od hrane sproveden je u laboratoriji Katedre za energetiku i procesnu tehniku Fakulteta inženjerskih nauka u Kragujevcu. Za šaržne testove, uzorci inokuluma i primarnog mulja su prikupljeni iz Sistema za prečišćavanje otpadnih voda "Cvetojevac"/ JKP "Vodovod i Kanalizacija" Kragujevac. Mešavina mulja se u ovom objektu tretira u mezofilnim uslovima (približno 37°C) sa hidrauličkim vremenom zadržavanja od 21 dan. Efluent digestora je korišćen kao inokulum. Otpad od hrane je dobijen iz doma Studentskog centra Kragujevac. Glavne komponente uključivale su nepojedenu hranu iz kantine i ostatke namirnica iz kuhinje. Otpad je podvrgnut mlevenju kako bi se dobio reprezentativan uzorak, nakon uklanjanja kostiju i nerazgradivih materijala, kao što su plastične kese i potrošački predmeti. Nakon homogenizacije, otpad od hrane je odložen malim posudama u zamrzivač na -18°C. Porcije su uzimane po potrebi, bez ugrožavanja integriteta celokupnog uzorka.

Jezgro jedinice za posmatranje sastojalo se od Erlenmajerove boce i gumenog čepa sa dva centralna otvora. Reaktori su imali ukupan kapacitet od 5 L, sa radnom zapreminom od 4 L. Jedan otvor je omogućavao propuštanje gasa, dok je drugi, zatvoren poklopcem, služio kao cev za vađenje uzoraka za svakodnevnu analizu (Slika 2). Uzorkovanje reakcionih proizvoda je sprovedeno pomoću staklenog šprica, u početku za merenje pH vrednosti, a zatim i za pripremu alikvota COD-a. Uzimanje uzoraka odvijalo se sa iste tačke unutar reaktora, koristeći gumeno crevo ubačeno kroz cev za ekstrakciju na fiksnoj visini od vrha posude. Mešanje i zagrevanje unutar reaktora je postignuto korišćenjem sistema za magnetno mešanje u kombinaciji sa grejnom pločom. Temperatura sadržaja je praćena dva puta dnevno pomoću termalne infracrvene kamere. Vodeni nepovratni ventil se sastojao od Erlenmajerove boce od 2 l, čepa i staklene cevi. Proizvodnja biogasa je kvantifikovana korišćenjem vlažnog merača protoka gasa, uz kontinuirano snimanje podataka veb kamerom na svakih sat vremena. Sakupljanje gasa je izvedeno korišćenjem vreća za uzorkovanje, pri čemu su sve komponente bile međusobno povezane gumenim crevima.

Jednake zapremine su dodavane u reaktore tokom svake eksperimentalne faze, iako su odnosi primarnog mulja i otpada od hrane varirali. Četiri različita odnosa mulja i hrane (3/1, 1/1, 1/3 i 1/0 - digestija) su testirana u duplikatu. Smeše su formirane na osnovu zapremine ko-/supstrata. Prazni uzorci koji su sadržali samo inokulum su dopunjeni pijaćom vodom kako bi se postigla zapremina od 4 L. Potencijal biogasa svakog uzorka je procenjen na osnovu specifičnog prinosa biogasa, izračunatog kao kumulativni proizvedeni biogas minus doprinos inokuluma iz praznih (semenskih) uzoraka po ukupnoj količini isparljive supstance koja je dodata pre inokulacije (tj. mL biogasa/g VS). Da bi se sprečila ograničenja degradacije biomase, uzorci su pripremljeni sa odnosom inokuluma prema supstratu 2:1. Ukupan sadržaj čvrstih materija u svim pripremljenim uzorcima bio je manji od 7%. Inokulum iz digestora u punom obimu obezbedio

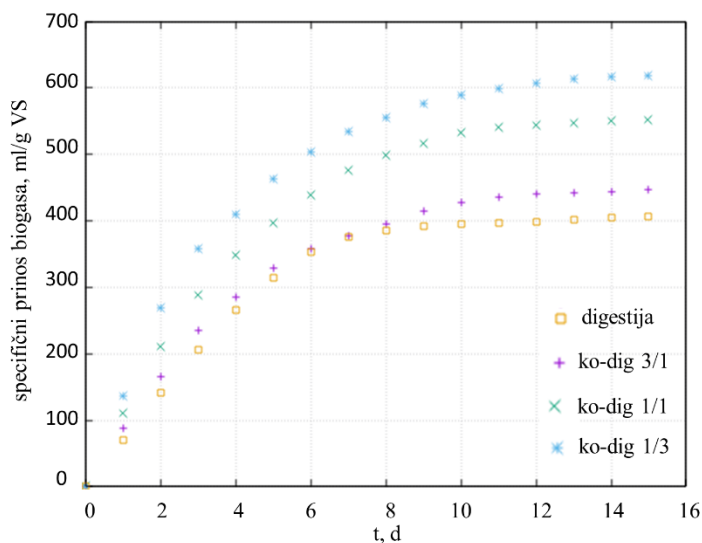
je osnovne potrebe za hranljivim materijama za anaerobne mikroorganizme, eliminišući potrebu za dodatnim spoljnim hranljivim materijama ili elementima u tragovima. Pre testiranja, pH vrednosti za svaki stakleni reaktor kretale su se od 7,2 do 7,35. Boce su isprane Ar, zapečaćene da bi se uspostavila anaerobna sredina i održavane u mezofilnim uslovima od 35 ± 1°C. Vreme hidrauličkog zadržavanja je postavljeno na 15 dana.



Slika 2. Shema laboratorijskog postrojenja

IV-1 Rezultati šaržnih merenja

U optimizaciji procesa anaerobne ko-digestije, odabir pravog izvora inokuluma i određivanje odnosa inokuluma prema supstratu su ključni operativni faktori za procenu anaerobne biorazgradivosti. Korišćenje veće količine inokuluma ne povećava značajno proizvodnju biogasa iznad određenog praga. Umesto toga, prekomerna upotreba inokuluma dovodi do nepotrebnog povećanja zapremine digestora.



Slika 3. Normalizovane kumulativne proizvodnje biogasa

Prema odnosu inokulum/supstrat (ISR), početne zapremine

sirovina u smeši se određuju iz jednačina [27]:

$$V_I \cdot I_{VS} = ISR \cdot (V_{SS} \cdot S_{SS(VS)} + V_{FW} \cdot S_{FW(VS)}),$$

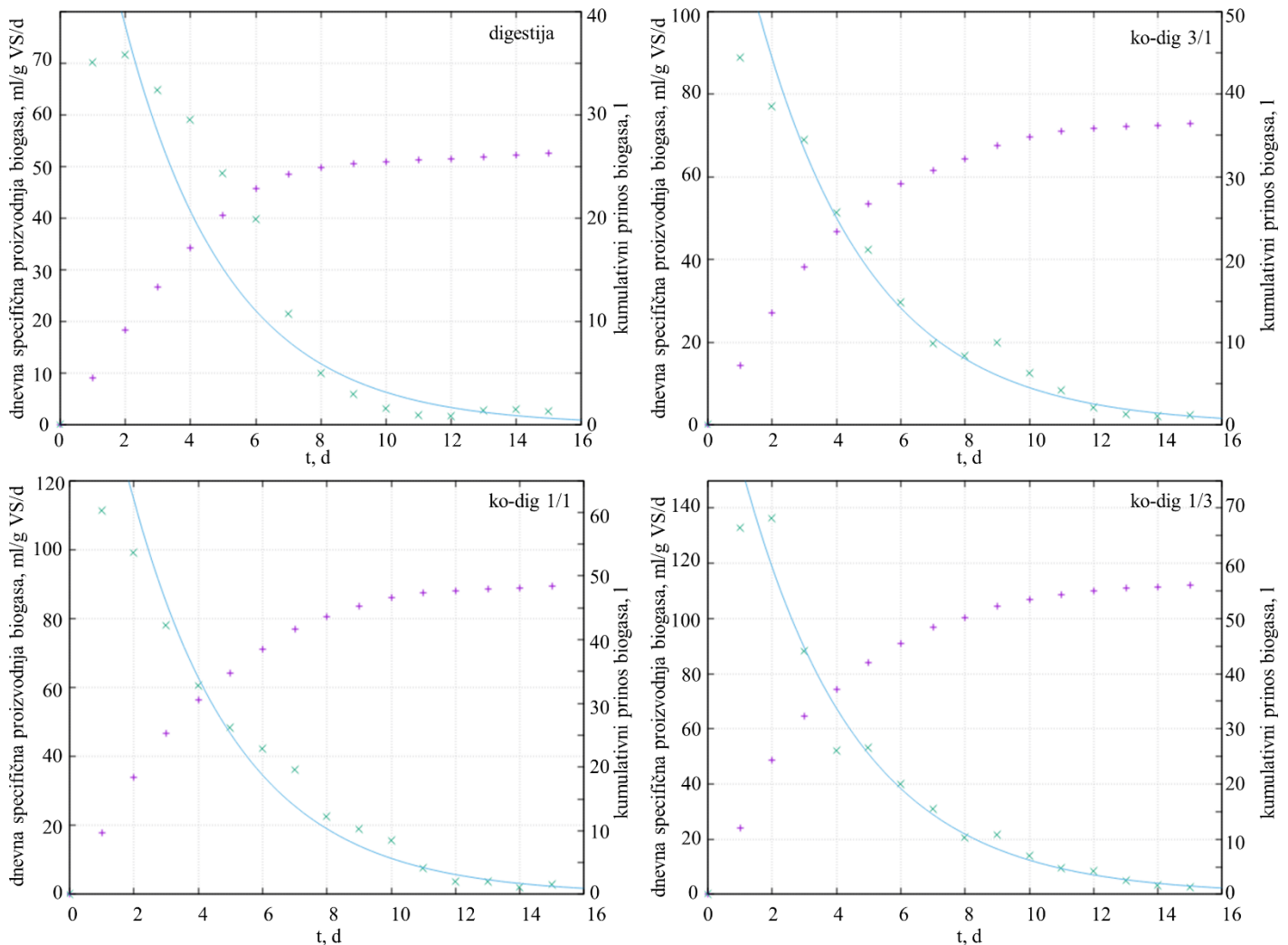
$$V = V_I + V_{SS} + V_{FW},$$

$$\frac{V_{SS}}{V_{FW}} = \frac{1}{0}, \frac{3}{1}, \frac{1}{1}, \frac{1}{3}.$$

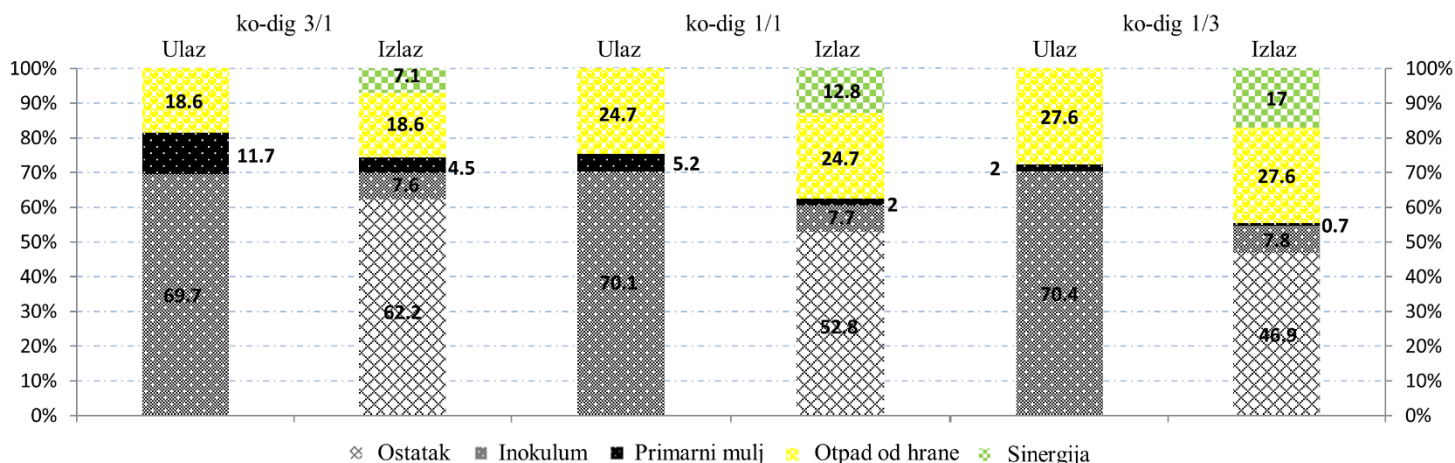
Kumulativna proizvodnja je standardizovana na već spomenuti način korišćenjem početnih isparljivih supstanci ko-/supstrata (mL/g VS). Isparljive čvrste supstance su pokazale prosečan sadržaj u ukupnim čvrstim materijama od 84% za ko-digestije i 78% za mono-digestiju, što ukazuje na značajan kapacitet za organsku transformaciju. Ko-/digestije su napredovale u stabilnom režimu u svim odnosima, delimično pod uticajem karakteristika inokuluma koji je već bio prilagođen ovim vrstama ostataka.

Produkcija biogasa iz mono-digestije primarnog mulja i ko-

digestija mešavina prikazana je na Slici 3. Serijski testovi su otkrili da je dodavanje otpada od hrane povećalo specifični prinos biogasa u poređenju sa samim muljem, koji je pokazao najnižu prosečnu kumulativnu proizvodnju. Poboljšana digestabilnost hrane verovatno je doprinela povećanju proizvodnih parametara smeša. Nakon 15 dana digestije, ispitivanje odnosa 3/1 (446,9 mL/g VS) pokazalo je prosečan specifični prinos biogasa za 10% veći od samog primarnog mulja (407,0 mL/g VS). Prosečna specifična proizvodnja biogasa pri odnosu 1/1 ko-digestije bila je 552,6 mL/g VS. Kao što je predstavljeno na Slici 3, najizdašniji odnos bio je 1/3 sa prosečnim prinosom biogasa od 618,7 mL/g VS. Ovo je predstavljalo povećanje od 52% i 38% u poređenju sa mono-digestijom i 3/1 ko-digestijom, respektivno. Što se tiče odnosa 1/1, specifični prinos biogasa u 1/3 ko-digestiji prikazao je prosečno povećanje od 12%. Najznačajniji skok proizvodnje uočen je između 3/1 i 1/1 ko-digestija, gde je prva činila približno 81% druge.



Slika 4. Dnevne specifične stope i kumulativna proizvodnja biogasa



Slika 5. Sadržaj i proizvodnja izražena preko COD

Slika 4 ilustruje prosečne dnevne prinose biogasa. Proizvodnja je počela odmah nakon punjenja reaktora u svim ciklusima. Maksimum proizvodnje biogasa zabeležen je drugog dana za ko-digestiju 1/3 i mono-digestiju, a prvog dana za 3/1 i 1/1 ko-digestiju. Tokom prvih četiri dana eksperimenta, proizvodnja je bila značajno veća za sve postavke, čineći preko 62% ukupnog prinosa. Varijacije između dnevnih stopa proizvodnje bile su neznatne na kraju, ali su se značajno razlikovale na početku procesa. Stopa ko-digestije 1/1 (111 mL/g VS/d) bila je 25% viša od ko-digestije 3/1 (89 mL/g VS/d) i 20% niža od ko-digestije 1/3 (133 mL/g VS/d). U poređenju sa ko-digestijom 1/3, maksimalna dnevna specifična količina biogasa mono-digestije (70 mL/g VS/d) bila je 1,9 puta manja, što sugeriše da se upotreba otpada od hrane kao ko-supstrata snažno preporučuje [28]. Na Slici 4 su punom linijom predstavljene eksponencijalne funkcije koje odgovaraju preko 96% dnevnim produkcijama za ko-digestije i 89% za digestiju.

IV.II Bilans COD-a i sinergijski efekat

COD, koji predstavlja stepen solubilizacije, ukazuje na sadržaj materijala koji može oksidovati, pružajući uvid u energetski sadržaj sirovine. Precizni proračuni COD-a na ulazu i izlazu sistema pomažu u analizi performansi digestora kroz masene tokove. Ukupna koncentracija COD-a, određena nakon dodavanja ko-/supstrata u reaktor i inokulacije, služi kao konačna i početna vrednost procesa. Sa udelom semenskog mulja od približno 70% ukupne hemijske potrošnje kiseonika u sve tri ko-digestivne smeše, proporcija COD-a između inokuluma i ko-/supstrata je praktično konstantna. Ovo zapažanje sugeriše da se COD značajno pripisuje otpadu od hrane i primarnom mulju u reaktoru, naglašavajući visok potencijal sirovine za tretiranje.

Nakon 8. dana kod svih ko-digestivnih eksperimenata, koncentracija COD-a je opala zajedno sa izlazom biogasa, stabilizujući se na konstantnom nivou. Međutim, vredni napomenuti da taložni digestat zadržava visok rezidualni COD, otporan na biorazgradnju. Sinergije u parovima supstrat/ko-supstrat su dokazane povećanom efikasnošću u eliminaciji hemijske potrošnje kiseonika, šta verovatno potiče od poboljšanja sastava organskih hranljivih materija.

Da bi se uzeli u obzir ko-metabolički sinergijski efekti, gde

proizvodnja biogasa iz sirovine za ko-digestiju prevazilazi zbir prinosa pojedinačnih komponenti, mora se uzeti u obzir bilans hemijske potrošnje kiseonika. Bilans COD-a koji se koristi za određivanje obima sinergije izražen je jednačinom:

$$COD_{In} + COD_{PS} + COD_{FW} = COD_{Gas} + COD_{RSD}$$

gde ulazni COD uključuje inokulum, primarni mulj i otpad od hrane, dok izlaz podrazumeva doprinos biogasa (izražen kao COD_{Gas}) i ostatak (COD_{RSD}). Biogas proizveden i pretvoren u COD_{Gas} predstavljen je narednom jednačinom sa ciljem da se proceni stepen sinergizma:

$$COD_{Gas} = COD_{GIn} + COD_{GPS} + COD_{GFW} + COD_{GSyn}$$

On se može predstaviti kao zbir biogasa generisanog iz inokuluma, primarnog mulja i otpada od hrane iz mono-digestija, i dodatnog biogasa proizvedenog usled sinergijskih reakcija [11].

Nakon 15 dana, sam inokulum je proizveo 189,1 mL/g COD-a, šta predstavlja nizak specifični prinos. Semeni mulj pretvoren je u biogas u rasponu od 11%. Preostali COD inokuluma smatra se čvrstim ostacima. Mono-digestija primarnog mulja dala je konačni specifični prinos biogasa od 396,0 mL/g COD-a. Račun bilansa pokazao je da je postignuta konverzija od 33% na osnovu unetog COD-a. Stepenn degradacije otpada od hrane tokom anaerobne ko-digestije je pretpostavljen kao potpuna konverzija (100%), pri čemu je usvojen specifični prinos biogasa od 652 mL/g COD-a [29]. Budući da stopa konverzije ne može biti veća od 1, sinergija se definiše kao razlika između izmerene i izračunate proizvodnje biogasa pri potpunoj konverziji otpada od hrane i delimičnoj konverziji primarnog mulja, uz dodatnu proizvodnju semenog mulja. Ko-digestija smeše muljeva (semenog inokuluma i sirovog primarnog) i otpada od hrane kao ko-supstrata izaziva sinergijski efekat, što je primećeno dodatnom proizvodnjom biogasa. Dodatni prinosi biogasa izračunati su kao 7,1%; 12,8% i 17% izlaznog COD-a, pretpostavljajući iste parcijalne konverzije za ulazni COD.

V ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazan je kratak pregled eksperimenata izvršenih po istoj proceduri i sa sličnim ili istim ko-/supstratima upotrebljenim u našoj studiji. Osnovne teorijske postavke

obuhvataju faze hidrolize, koja se smatra ograničavajućom za čitav proces, acido i acetogeneze, i proizvodne metanogeneze. Takođe, prikazan je uticaj različitih parametara na proces ko-/digestije kao što su pH vrednost, temperatura, mešanje, čvrste isparljive materije i hemijska potrošnja kiseonika. Amonijak i vodonik sulfid su navedeni kao supstance koje usporavaju proces ko-/digestije dok su glavni predtretmani koji je podstiču mehanički i termalni. Na kraju je predstavljen šaržni ko-/digestivni eksperiment sa odnosom inokulum/ko-/supstrat 2, kojim je utvrđeno povećanje prinosa biogasa sa povećanim udelom otpada od hrane. Iako je maksimalna proizvodnja uočena kod odnosa primarnog mulja i ostataka hrane 1/3, kao optimalan odnos preporučen je 1/1, usled stabilnosti proizvodnje. Sinergijski efekti kao dodata proizvodnja biogasa na pojedinačnu, utvrđeni su za sve ko-/digestivne smeše na osnovu bilansa hemijske potrošnje kiseonika. Sinergija je pripisana komplementarnom sastavu supstrata i ko-supstrata.

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Rad je nastao zahvaljujući podršci Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije u okviru Ugovora za finansiranje naučnoistraživačkog rada zaposlenih u nastavi na akreditovanim visokoškolskim ustanovama u 2024. godini broj 451-03-65/2024-03/ 200107.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Rehl, T., Müller, J. Life cycle assessment of biogas digestate processing technologies, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 56, No. 1, pp. 92–104, 2011 <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.08.007>
- [2] Zhang, Q., Hu, J., Lee, D. J. Biogas from anaerobic digestion processes: Research updates, *Renewable Energy*, Vol. 98, pp. 108–119, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.029>
- [3] Li, C. *Using Anaerobic Co-Digestion With Addition of Municipal Organic Wastes and Pre-Treatment To Enhance Biogas Production From Wastewater*, Queen's University Kingston, Ontario, Canada, 2012. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.738>
- [4] Li, M. S. C. *Wet and Dry Anaerobic Digestion of Biowaste and of Co-substrates*, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), 2015. <https://d-nb.info/1068263415/34> [pristupljeno 15.04.2024]
- [5] Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., Tan, T. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 38, pp. 383–392, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.038>
- [6] Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M. S., Fonoll, X., Peces, M., Astals, S. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 36, pp. 412–427, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.03>
- [7] Maragkaki, A. E., Fountoulakis, M., Gypakis, A., Kyriakou, A., Lasaridi, K., Manios, T. Pilot-scale anaerobic co-digestion of sewage sludge with agro-industrial by-products for increased biogas production of existing digesters at wastewater treatment plants, *Waste Management*, Vol. 59, pp. 362–370, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.043>
- [8] Lisboa, M. S., Lansing, S. Characterizing food waste substrates for co-digestion through biochemical methane potential (BMP) experiments, *Waste Management*, Vol. 33, No. 12, pp. 2664–2669, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.004>
- [9] Hallaji, S. M., Kuroshkarim, M., Moussavi, S. P. Enhancing methane production using anaerobic co-digestion of waste activated sludge with combined fruit waste and cheese whey, *BMC Biotechnology*, Vol. 19, No. 19, 2019. <https://doi.org/10.1186/s12896-019-0513-y>
- [10] Ebner, J. H., Labatut, R. A., Lodge, J. S., Williamson, A. A., Trabold, T. A. Anaerobic co-digestion of commercial food waste and dairy manure: Characterizing biochemical parameters and synergistic effects, *Waste Management*, Vol. 52, pp. 286–294, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.046>
- [11] Xie, S., Wickham, R., Nghiem, L. D. Synergistic effect from anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic wastes, *International Biodeterioration and Biodegradation*, Vol. 116, pp. 191–197, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.10.037>
- [12] Ohemeng-Ntiamoah, J., Datta, T. Evaluating analytical methods for the characterization of lipids, proteins and carbohydrates in organic substrates for anaerobic co-digestion, *Bioresource Technology*, Vol. 247, pp. 697–704, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.154>
- [13] Naran, E., Toor, U. A., Kim, D. J. Effect of pretreatment and anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge on stabilization and methane production, *International Biodeterioration and Biodegradation*, Vol. 113, pp. 17–21, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.04.011>
- [14] Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P., Van Lier, J. B. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays, *Water Science and Technology*, Vol. 59, No. 5, pp. 927–934, 2009. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.040>
- [15] Neves, L., Oliveira, R., Alves, M. M. Influence of inoculum activity on the bio-methanization of a kitchen waste under different waste/inoculum ratios, *Process Biochemistry*, Vol. 39, No. 12, pp. 2019–2024, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2003.10.002>
- [16] Zhang, L., Jahng, D. Long-term anaerobic digestion of food waste stabilized by trace elements, *Waste Management*, Vol. 32, No. 8, pp. 1509–1515, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.03.015>
- [17] Molino, A., Nanna, F., Ding, Y., Bikson, B., Braccio, G. Biomethane production by anaerobic digestion of organic waste, *Fuel*, Vol. 103, pp. 1003–1009, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.07.070>
- [18] Kusch, S., Schumacher, B., Oechsner, H., Schäfer, W. Methane yield of oat husks, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 35, No. 7, pp. 2627–2633, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.044>
- [19] Sung, S., Liu, T. Ammonia inhibition on thermophilic anaerobic digestion, *Chemosphere*, Vol. 53, No. 1, pp. 43–52, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00434-X](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00434-X)
- [20] Meroney, R. N., Colorado, P. E. CFD simulation of mechanical draft tube mixing in anaerobic digester tanks, *Water Research*, Vol. 43, No. 4, pp. 1040–1050, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.11.035>
- [21] Kapanaju, P., Buendia, I., Ellegaard, L., Angelidakia, I. Effects of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: Lab-scale and pilot-scale studies, *Bioresource Technology*, Vol. 99, No. 11, pp. 4919–4928, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.015>
- [22] Appels, L., Baeyens, J., Degrève, J., Dewil, R. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 34, No. 6, pp. 755–781, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002>
- [23] Cazaudehore, G., Schraauwers, B., Peyrelasse, C., Lagnet, C., Monlau, F. Determination of chemical oxygen demand of agricultural wastes by combining acid hydrolysis and commercial COD kit analysis, *Journal of Environmental Management*, Vol. 250, pp. 109464, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109464>
- [24] Chen, Y., Cheng, J. J., Creamer, K. S. Inhibition of anaerobic digestion process: A review, *Bioresource Technology*, Vol. 99, No. 10, pp. 4044–4064, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057>
- [25] Izumi, K., Okishio, Y. ki, Nagao, N., Niwa, C., Yamamoto, S., Toda, T. Effects of particle size on anaerobic digestion of food waste, *International Biodeterioration and Biodegradation*, Vol. 64, No. 7, pp. 601–608, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2010.06.013>
- [26] Bougrier, C., Albasi, C., Delgenès, J. P., Carrère, H. Effect of ultrasonic, thermal and ozone pre-treatments on waste activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Vol. 45, No. 8, pp. 711–718, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.02.005>
- [27] Rakić, N., Šušteršič, V., Gordić, D., Josijević, M., Jurišević, N., Nikolić, J., Inoculum to substrate ratio: Calculating methods, in *Proc. 35th International scientific conference Energetika 2020*, Zlatibor, Serbia, pp. 285–291, 24–27 Jun 2020.
- [28] Rakić, N. *Povećanje energetske efikasnosti u postrojenjima za tretman otpadnih voda optimizacijom procesa kodigestije*, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, 2023.

[29] Angelidaki, I., Sanders, W. Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants, *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, Vol. 3, No. 2, pp. 117–129, 2004.
<https://doi.org/10.1007/s11157-004-2502-3>

AUTORI/AUTHORS

dr Nikola Rakić, naučni saradnik, Fakultet inženjerskih nauka, nikola.rakic@fink.rs, ORCID [0000-0001-7755-849X](https://orcid.org/0000-0001-7755-849X)

dr Vanja Šušteršič – redovni profesor, Fakultet inženjerskih nauka, vanjas@kg.ac.rs, ORCID [0000-0001-7773-4991](https://orcid.org/0000-0001-7773-4991)
msr Natalija Aleksić - mast. inž. zašt. živ. sred., istraživač saradnik, Fakultet inženjerskih nauka, natalija.aleksic@fink.rs, ORCID [0000-0001-9341-7806](https://orcid.org/0000-0001-9341-7806)
dr Nebojša Jurišević, naučni saradnik, Fakultet inženjerskih nauka, jurisevic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0002-1609-6313](https://orcid.org/0000-0002-1609-6313)
dr Dušan Gordić – redovni profesor, Fakultet inženjerskih nauka, gordic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0002-1058-5810](https://orcid.org/0000-0002-1058-5810)

Co-/Digestion Procedure: Examples, Settings and Experimental Performance

Abstract – Modern technologies for the treatment of organic waste include the co-/digestion procedure as one of the basics. This paper provides an overview of the tests performed at the international level, the theoretical basis, and key parameters of the co-/digestion process, concluding with the experiment set up and performed. Co-/digestion is presented as a process that almost uniquely treats sewage sludge or animal manure as the primary substrate, and additional biodegradable material that serves as a co-substrate. A wide range of biogas yields was recorded, from 118 mL CH₄/g VS to 1040 mL CH₄/g VS, for different inoculum/substrate and substrate/co-substrate ratios. The elements of the standard protocol and the basic stages of anaerobic digestion are listed. Theoretical settings included parameters, inhibitory substances, and pretreatments. The experimental procedure was carried out with basic equipment and standard methods. Primary sewage sludge and food waste were tested in 4 different ratios (1/0; 3/1; 1/1; 1/3). An enhancement in production was observed with an increase in the proportion of food residues, while the most stable operation was shown by a ratio of 1/1. In co-digestion, synergistic effects of 7.1%, 12.8% and 17% were confirmed, respectively. It has been proven that the addition of biodegradable waste has a positive effect on the yield of biogas.

Index terms – Co-/Digestion, Sewage sludge, Food waste, Biogas, Synergy

CIP - Каталогизacija y publikaciji
Narodna biblioteka Srbije, Beograd

621.3

ENERGIJA, ekonomija, ekologija : list Saveza
energetičara / glavni i odgovorni urednik Dušan Gordić
. - God. 1, br. 1 (1996)- . - Beograd : Savez energetičara,
1996- (Kragujevac : Mašinac). - 29 cm

Tromesečno. - Drugo izdanje na drugom medijumu:
Energija, ekonomija, ekologija (Online) = ISSN 2812-7528
ISSN 0354-8651 = Energija (Beograd)
COBISS.SR-ID 108696839



www.savezenergeticara.org