

UDK/UDC: 662.767.2:628.16(078.7)

Prejeto/Received: 11.07.2021

Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 10.01.2022

DOI: [10.15292/acta.hydro.2021.10](https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2021.10)

Objavljeno na spletu/Published online: 17.03.2022

## MOŽNOST UPORABE ODPADNEGA JEDILNEGA OLJA ZA PRIDOBIVANJE BIOLPINA POSSIBILITY OF USING WASTE EDIBLE OIL FOR BIOGAS PRODUCTION

Sabina Kolbl Repinc <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova 2, 1000 Ljubljana

### Izvleček

Anaerobna presnova je proces, s katerim lahko iz organsko razgradljivih odpadnih snovi ponovno pridobimo energijo v obliki bioplina. Nekontrolirano odlaganje biološko razgradljivih odpadkov je za okolje lahko zelo obremenjujoče. V Sloveniji letno proizvedemo večje količine odpadnega jedilnega olja, ki bi ga lahko izkoristili za proizvodnjo bioplina. V tej študiji smo izvedli meritve metanskega potenciala odpadnega jedilnega olja v šaržnem eksperimentu. V pilotnem semikontinuuirnem eksperimentu smo ocenili primernost odpadnega jedilnega olja za uporabo v anaerobnih reaktorjih na čistilni napravi. Rezultati študije kažejo, da je količina jedilnega olja, ki ga dnevno lahko doziramo v anaerobne reaktorje, omejena, saj močno vpliva na stabilnost procesa anaerobne presnove in na proizvodnjo bioplina. Izkazalo se je, da je najbolj optimalna obremenitev anaerobnega reaktorja z jedilnim oljem znašala med 1,6 in 2,4 g OS/L inokuluma. Takrat je proces anaerobne presnove deloval stabilno, produkcija bioplina je bila največja. Pri večji obremenitvi je prišlo do velikih nihanj v sistemu, zmanjšanja pH, povečanja hlapnih maščobnih kislin, povišanih vrednosti KPK na iztoku iz reaktorja in bistveno zmanjšane proizvodnje bioplina.

**Ključne besede:** odpadno jedilno olje, bioplin, anaerobna presnova, čistilna naprava, odvečno blato.

### Abstract

Anaerobic digestion is a process by which energy from organically degradable waste can be recovered in the form of biogas. The uncontrolled disposal of such organic waste is very burdensome to the environment. In Slovenia, large quantities of waste edible oils are produced every year, which could be used for biogas production. In this study, we investigated the methane potential of waste edible oil in a batch reactor. Further in the pilot scale in a semi-continuous experiment we evaluated the use of waste edible oil in anaerobic digesters of wastewater treatment plant. The results show that the quantity of oil per day that is fed into the anaerobic reactor is limited due to the process's instability and lower biogas production. The optimal daily organic loading of waste edible oil was between 1.6 and 2.4 g VS/L inoculum. During these conditions, the process of anaerobic digestion was stable and methane production was highest. At higher organic loading, the process became unstable, pH was reduced, volatile fatty acids increased, COD at the outflow of reactor increased, and biogas production was significantly reduced.

**Keywords:** waste edible oil, biogas, anaerobic digestion, wastewater treatment plant, wastewater sludge.

<sup>1</sup> Stik / Correspondence: [sabina.kolbl-repinc@fgg.uni-lj.si](mailto:sabina.kolbl-repinc@fgg.uni-lj.si)

© Kolbl Repinc S.; Vsebinska tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [licence Creative Commons Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0](#).

© Kolbl Repinc S.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – NonCommercial – ShareAlike 4.0 Licence](#).

## 1 Uvod

Globalna potreba po energiji v svetu letno raste. Razvoj stremi k uporabi obnovljivih virov, med katerimi je velik izziv energija iz odpadkov. V Sloveniji letno zavržemo okrog 140.804 ton hrane, od tega je skoraj polovica odpadne hrane iz gospodinjstev

(<https://www.stat.si/StatWeb/News/Index/9865>).

Ti odpadki vključujejo tudi odpadno hrano pri končnem potrošniku in odpadno hrano pri proizvodnji hrane. Več kot dve tretjini odpadne hrane, ki je v 2015 nastala v Sloveniji, so bili kuhinjski odpadki. To so odpadki, ki nastanejo pri pripravi obrokov ali ostajajo na krožnikih pri končnem potrošniku, in tudi odpadki, ki nastajajo pri proizvodnji hrane. 9 % hrane se je zavržlo, ker ji je pretekel rok uporabe ali ker se je med prodajo spremenila njena kakovost (se je npr. pokvarila). 5 % odpadne hrane so bila odpadna jedilna olja, 4 % odpadki iz priprave in predelave mesa in rib, po 2 % odpadki iz priprave in predelave sadja in zelenjave ter odpadki iz pekarn in slaščičarn, 1 % pa odpadki iz industrije mlečnih izdelkov. Odpadna jedilna olja (npr. 6875 ton v letu 2016) predstavljajo okrog 5 % odpadne hrane (SURS, 2016), količina proizvedenih odpadnih olj je leta 2019 znašala 3809 ton (SiStat, 2021). Večji del odpadne hrane se v Slovenij zbere ločeno in se obdela v kompostarnah in/ali v bioplinarnah (v letu 2019 je bilo v kompostiranje in obdelavo v bioplinarnah oddanih 330.644 ton takih odpadkov), končni proizvod je kompost (SURS, 2016).

Največ jedilnega olja se zavrže v gostinstvu in pri domači porabi. Uporabljajo se predvsem olja rastlinskega izvora, nekaj je tudi živalskih maščob, masla in margarine.

Delež trigliceridov pri jedilnem olju znaša med 95 in 96 %. Sestavljajo jih še majhne količine mono- in digliceridov, prostih maščobnih kislin, fosfolipidov, sterolov in ogljikovodikov. Rabljena rastlinska olja, predvsem tista, ki se jih obdeluje na visoki temperaturi, vsebujejo večje količine nasičenih maščobnih kislin, so bolj kislila in imajo višjo viskoznost (Marchetti et al., 2020).

Opadna olja imajo veliko kemijsko potrebo po kisiku (KPK), ta lahko znaša tudi 2,9 g/L. Če take

odpadne snovi pridejo v vodno okolje, na vodi lahko naredijo plast olja, ki preprečuje prenos kisika v vodo, preprečuje pa tudi procese razgradnje in prehod svetlobe, ki je potrebna za fotosintezo klorofila (Marchetti et al., 2019; Marchetti et al., 2020).

Opadna jedilna olja se uporabljajo za proizvodnjo biodizla. Ta nastane v procesu transesterifikacije, ko trigliceridi reagirajo z alkoholom. Pri tem nastanejo estri in surov glicerol. Eden izmed glavnih problemov pri proizvodnji biodizla predstavlja surovi glicerol, ki ga, glede na biodizel, nastane okrog 10 % in ga je pred uporabo treba očistiti. Surovi glicerol namreč vsebuje elemente v sledovih in anorganske soli (Kolbl Repinc et al., 2021; Wang et al., 2019; Huynh et al., 2011).

Proizvodnja bioplina s pomočjo anaerobne presnove predstavlja enega izmed obnovljivih virov energije. Anaerobna presnova je mikrobiološki proces, kjer ob odsotnosti kisika mikroorganizmi razgradijo organsko razgradljive snovi. Pri tem nastane bioplin, ki je v pretežni meri sestavljen iz ogljikovega dioksida in metana. Prisotni so še lahko preostali plini, kot so amonijak ( $\text{NH}_3$ ), vodikov sulfid ( $\text{H}_2\text{S}$ ) in vodna para (Kolbl et al., 2014; Kolbl et al., 2016; Kolbl Repinc et al., 2018). Anaerobna razgradnja organskih snovi poteka v štirih fazah: 1. faza hidrolize, 2. faza acidogeneze, 3. faza acetogeneze in 4. faza metanogeneze. Običajno je hidroliza najpočasnejša faza v procesu razgradnje organskih snovi. Hidroliza ogljikovih hidratov poteče že v nekaj urah, proteinov in maščob pa v nekaj dneh (Deublein in Steinhauser, 2010). Prevelike koncentracije določenih snovi v anaerobnem reaktorju lahko proces anaerobne presnove inhibirajo, lahko so tudi toksične za mikroorganizme. Mikroorganizmi v takem primeru potrebujejo kar precej časa, da se prilagodijo. Zato mora biti uvajanje novih substratov v proces skrbno načrtovano, saj moramo zagotoviti optimalne pogoje za delovanje mikroorganizmov (preglednica 1). Anaerobno razgradljivost odpadnega jedilnega olja omejujejo dolgoverižne maščobne kisline, saj so v večjih koncentracijah toksične za mikroorganizme (Awe et al., 2018; Li et al., 2018), kar se pokaže z daljšo lag fazo

(Tandukar in Pavlostathis, 2015; Yalcinkaya in Malina, 2015) in počasnejšo razgradnjo (Zhang et al., 2017). Raziskav o produkciji metana iz odpadnega olja ni veliko. Pri šaržnih testih se produkcija metana giblje med 900 in 950 mL CH<sub>4</sub>/L odpadnega olja (Marchetti et al., 2019). Fierro et al. (2014) navajajo metanski potencial 540 mL CH<sub>4</sub>/g organske snovi (OS). Pri semikontinuiranih eksperimentih znaša produkcija metana okrog 0,78 L CH<sub>4</sub>/g OS (He et al., 2015). Študija, ki so jo naredili Awe et al. (2018), je pokazala, da je pri 5 % obremenitvi semikontinuirnega reaktorja z oljem (glede na celotno obremenitev 2 g OS/L dan) prišlo do odpovedi reaktorja. Šaržne raziskave kodigestije odpadnega olja iz študije, ki sta jo naredila Tandukar in Pavlostathis (2015), so pokazale, da je produkcija metana znašala 389 mL CH<sub>4</sub>/g KPK<sub>odstranjen</sub>, ob dodajanju odpadnega olja se je pojavila lag faza, v semikontinuiranem reaktorju pa so uspešno ohranjali stabilnost anaerobne presnove in bistveno povečali produkcijo metana. Do lag faze pri anaerobni presnovi odpadnega olja je prišlo tudi v študiji Fierro et al. (2014), čas prilagajanja mikroorganizmov zaradi kompleksne sestave substrata je trajal 6 do 7 dni. Long et al. (2012) poročajo, da se z uporabo jedilnega

odpadnega olja na čistilnih napravah produkcija bioplina poveča za 30 % ali več, kar v nekaterih primerih lahko pokrije tudi do 50 % potreb po električni energiji. Kljub temu pa je pri uvajanju odpadnega jedilnega olja v anaerobni proces treba biti previden, kajti pri obratovanju lahko pride do flotacije blata, penjenja v anaerobnem reaktorju, zamašitve cevi in črpalk ter bioplinske napeljave. V študiji Carnevale et al. (2017) je bila izvedena tehnična in ekonomska ocena možnosti zamenjave energetskih rastlin pri proizvodnji bioplina z odpadnim oljem. Z uvajanjem odpadnega olja bi lahko zmanjšali do 50 % njivskih površin, ki se jih sedaj obdeluje za energetske rastline za bioplinarne.

Teoretično lahko iz 1 grama lipidov dobimo 0,99 L metana, iz 1 grama ogljikovih hidratov 0,415 L metana in iz 1 g beljakovin 0,633 L metana. Zato lahko že z dodajanjem majhne količine maščob pri proizvodnji metana izboljšamo neto proizvodnjo energije oz. metana.

**Preglednica 1:** Optimalno območje določenih parametrov za uspešno anaerobno presnovo (Tchobanoglous, 2004).

**Table 1:** Optimal range of selected parameters for anaerobic digestion (Tchobanoglous, 2004).

	<b>HIDROLIZA/ACIDOGENEZA</b>	<b>TVORJENJE METANA</b>
<b>Temperatura</b>	25–35 °C	Mezofilno: 32–42°C Termofilno: 50–58°C
<b>pH</b>	5,2–6,3	6,7–7,5
<b>Razmerje C : N</b>	10–45	20–30
<b>Vsebnost SS</b>	< 40 % SS	< 30 % SS
<b>Redoks potencial</b>	+400 do –300 mV	< –250 mV
<b>Potrebno razmerje C : N : P : S</b>	500 : 15 : 5 : 3	600 : 15 : 5 : 3
<b>Elementi v sledeh</b>	Ni posebnih zahtev	Bistveni: Ni, Co, Mo, Se

V članku smo raziskali možnost občasne souporabe odpadnega olja na anaerobnem gnilišču centralne čistilne naprave (CČN) Domžale. Olju smo določili biometanski potencial (BMP) z uporabo Automatic Methane Potential Test System (AMPTS II). Za zagotovitev realnih pogojev kot na čistilni napravi (ČN) in maksimalno količino odpadnega olja, ki ga lahko dnevno doziramo v reaktor, smo uporabili pilotni semikontinuirani anaerobni reaktor volumna 200 L. Dozirali smo realne substrate kot na ČN.

## 2 Materiali in metode

### 2.1 Fizikalno-kemijske analize

Za merjenje pH vrednosti inokuluma in odvečnega blata smo uporabili HQ40D multimeter (Hach Lange). Za merjenje KPK smo uporabili hitre kivetne teste LCK 514, ki imajo merilno območje od 100 do 2000 mg/L O<sub>2</sub>. Za določitev topnega KPK smo vzorce substratov in inokuluma predhodno prefiltrirali na filtru z velikostjo por 0,45 µm. Pripravljene kivete smo pri temperaturi 150 °C kuhali 15 minut. Uporabili smo grelno aparaturu HT200S (Hach). Za odčitavanje rezultatov smo uporabili spektrofotometer DR3000 (Hach).

Alkaliteto (TAC) v anerobnih reaktorjih smo določili s pomočjo titracijske enote 785 DMP (Metrohm). Vzorce smo najprej centrifugirali 10 min na 5000 obratov/min. Nato smo 5 mL centrifugiranega vzorca dozirali v čašo ter dodali 95 mL destilirane vode. Alkaliteto v anaerobnih pilotnih reaktorjih smo določili s potenciometrično titracijo do pH 4,5, ki zajema hidrokside, hidrogenkarbonate in karbonate v vodi, po navodilih proizvajalca.

Hlapne maščobne kisline (HMK) na iztoku iz pilotnih reaktorjev smo določili s pomočjo hitrih kivetnih testov, po navodilih proizvajalca (Hach). Uporabili smo kivete LCK 365, ki imajo merilno območje od 50 do 2500 mg/L. Predhodno smo vzorce 10 minut centrifugirali pri 6000 rpm, da smo odstranili delce. Pripravljene vzorce smo po navodilih proizvajalca takoj uporabili na kivetah

LCK. Rezultate smo odčitali na spektrofotometru DR3000 (Hach).

Amonijev dušik v iztoku iz pilotnih reaktorjev smo merili s kivetnimi testi LCK 302, z območjem meritve od 47 do 130 mg/L NH<sub>4</sub> – N. Vzorce smo predhodno razredčili, da smo prišli v merilno območje testov LCK. Meritve smo izvedli po navodilih proizvajalca. Celotni fosfor (TP) smo določili s kivetnimi testi LCK 350, ki imajo merilno območje 6 do 60 mg/L PO<sub>4</sub>. Vzorce smo predhodno razredčili. Po navodilih proizvajalca smo v kivete odpipetirali določeno količino razredčenega vzorca. Nato smo kivete 1 h kuhali na 100 °C. Rezultate smo odčitali na spektrofotometru DR3000. Suho snov (SS) in organsko snov (OS) smo izmerili po navodilih APHA (APHA, 2005).

Razmerje med hlapnimi organskimi kislinami (FOS) in pufersko kapaciteto (TAC) smo določili s titrometrom AT1000 Series (Hach). Vzorec smo predhodno prefiltrirali na situ z odprtini, manjšimi od 0,5 mm, da smo odstranili večje delce. Nemudoma potem smo 5 mL pripravljenega vzorca odpipetirali v čašo, dolili 15 mL demineralizirane vode in dodali magnetno mešalo. Nato smo začeli z meritvami na titrometru. Titracija poteka z 0,1 N raztopino žveplene kisline H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Naprava izmeri vrednosti FOS in TAC ter poda njuno razmerje.

### 2.2 Inokulum in substrati

Odvečno blato in anaerobni inokulum za izvedbo eksperimentov smo pridobili na CČN Domžale - Kamnik. CČN Domžale - Kamnik je klasična mehanska dvostopenjska biološka čistilna naprava velikosti 149.000 PE z anaerobno stabilizacijo blata in uporabo bioplina za proizvodnjo električne in toplotne energije. Na čistilni napravi se čistijo odpadne vode iz več občin. Anaerobno stopnjo, kjer se obdeluje odvečno blato, sestavljajo štirje anaerobni reaktorji. Reaktorji obratujejo pri temperaturi 39 °C, skupni zadrževalni čas blata znaša 45 dni. ČN s proizvodnjo bioplina zagotavlja okrog 92 % celotne lastne porabe elektrike. Odvečno blato smo pridobili iz primarnega in sekundarnega usedalnika ČN.

Odpadno jedilno olje so priskrbeli na CČN Domžale - Kamnik.

### 2.3 Šaržni eksperiment

Za določitev biometanskega potenciala smo uporabili napravo AMPTS II (Automatic Methane Potential Test System), ki je sestavljena iz treh enot. Prva enota vključuje 15 reaktorjev, volumna 500 mL, v katere doziramo manjše količine anaerobnega inokuluma. Vsaka enota je opremljena s počasi vrtečim mešalom in gumijastim tesnilom. Te so potopljene v termoregulirano vodno kopel, kar omogoča vzdrževanje temperaturnega območje. Druga enota vključuje 15 stekleničk volumna 100 mL, ki jih napolnimo s 3M NaOH raztopino, na katero se vežejo CO<sub>2</sub> in H<sub>2</sub>S. Do tretje enote po cevkah prehaja le CH<sub>4</sub>. V tej enoti se meri volumen metana vsake stekleničke po principu izpodrivanja tekočine in vzgona (Bioprocess Control, 2014).

Reaktorje AMPTS II smo sestavili, kot je prikazano v preglednici 2. V 500 mL reaktorje smo dozirali 400 mL inokuluma. Inokulum smo predhodno en teden razplinjevali pri anaerobnih pogojih in temperaturi 39 °C. Za slepi vzorec, kjer smo dozirali samo inokulum, smo uporabili tri reaktorje, dva sta bila za kontrolo z glukozo. V ostale reaktorje smo dozirali surovo blato v kombinaciji z odpadnim jedilnim olje, pri čemer smo uporabili različna razmerja (preglednica 2). Organska obremenitev reaktorjev je znašala 0,79 g OS/L inokuluma. Pred zagonom eksperimenta smo vse reaktorje prepihali z dušikom. Temperatura v reaktorjih je znašala 40 °C. Mešanje je potekalo eno minuto z dvominutnimi premori.

### 2.4 Semi-kontinuirni eksperiment

Za semikontinuirni preizkus smo uporabili dva pilotna reaktorja (proizvajalec Talisman) iz nerjavečega jekla (slika 1). Volumen vsakega reaktorja znaša 197 L, delovni volumen je 170 L.

Reaktorja sta toplotno izolirana in imata vgrajene senzorje za uravnavanje temperature. Skozi dozirni lijak smo dnevno dodajali določeno količino substrata. Na vrhu reaktorja je plinska cev, ki je povezana z merilnikom pretoka plina, ki deluje po principu vzgona. Mešanje v reaktorju je vodeno z elektromotorjem in posnema mešanje v realnem gnilišču.

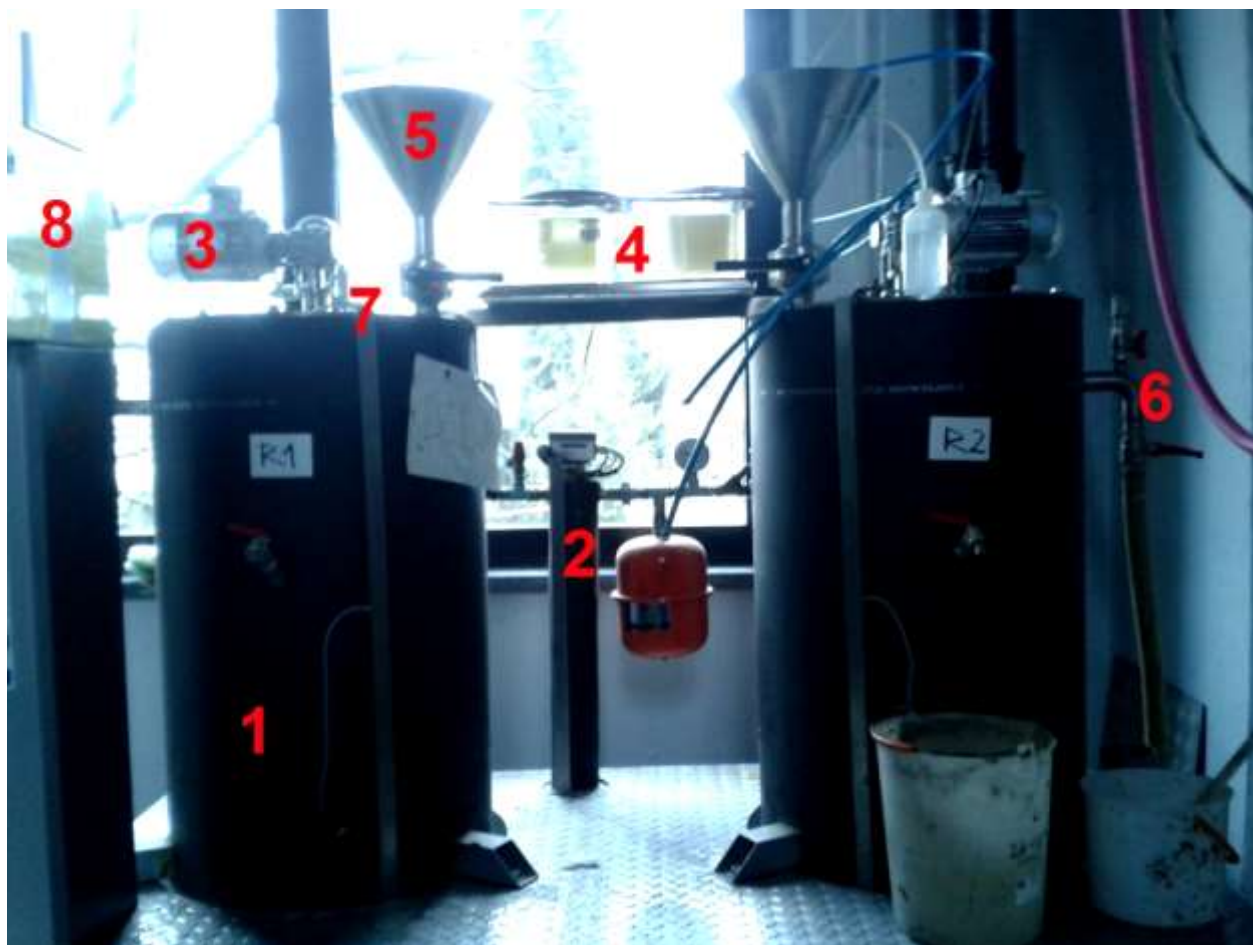
V oba reaktorja smo pred zagonom eksperimenta dodali 170 L inokuluma. Vsak dan smo v prvi reaktor (R1) dozirali surovo blato, tako da je dnevna organska obremenitev skozi celotni potek eksperimenta znašala 3,2 g OS/L. V drugi reaktor (R2) smo dnevno dozirali odpadno jedilno olje. Organsko obremenitev smo tedensko spreminjali glede na delovanje reaktorja, da je proces anaerobne presnove potekal stabilno. Zadnja dva tedna smo organsko obremenitev z oljem postopno povečali, saj nas je zanimal odziv sistema na spremenjene pogoje obremenitve (preglednica 3).

Pred vsakodnevnim doziranje substratov, smo najprej vzeli vzorec iztoka iz kontrolnega in eksperimentalnega reaktorja ter izmerili naslednje parametre: pH vrednost, topni KPK, HMK, alkaliniteto, suho snov in organsko snov. Dnevno smo spremljali produkcijo bioplina.

Dnevno smo uporabljali sveže blato iz ČN, katerega sestava in lastnosti so bile raznolike. Tako je vsebnost suhe snovi in organske snovi tekom eksperimenta nihala. Da smo dosegli želeno organsko obremenitev reaktorjev, smo morali pred doziranjem določiti vsebnost organske snovi in KPK.

### 2.5 Statistične analize

Razlike med produkcijo metana v semikontinuirnih reaktorjih smo izračunali s pomočjo analize variance (ANOVA). Določili smo tudi korelacije med posameznimi izmerjenimi s pomočjo statističnega programa PAST (Hammer et al., 2001).



**Slika 1:** Pilotni reaktor z označenimi deli naprave (avtor Teja Kržišnik). Pri tem so: 1 – reaktor, 2 – grelec, 3 – elektromotor za mešalo, 4 – merilec plina, 5 – lijak za doziranje, 6 – prelivni ventil, 7 – temperaturni senzor, 8 – nadzorna plošča.

**Figure 1:** Pilot reactor (author: Teja Kržišnik). 1 – reactor, 2 – heater, 3 – electromotor mixer, 4 – gas counter, 5 – dosing funnel, 6 – overflow pipe, 7 – temperature sensor, 8 – control panel.

**Preglednica 2:** Doziranje substratov pri šaržnem eksperimentu.

**Table 2:** Dosing of substrates for batch experiment.

Številka reaktorja	Vzorec	Inokulum [mL]	Glukoza [g]	Odvečno blato [mL]	Jedilno olje [mL]
1	inokulum	400	-	-	-
2	inokulum	400	-	-	-
3	inokulum	400	-	-	-
4	inokulum + glukoza	400	24	-	-
5	inokulum + glukoza	400	24	-	-
6	inokulum + blato	400	-	30,8	-
7	inokulum + blato	400	-	30,8	-
8	inokulum + olje	400	-	-	1,4
9	inokulum + olje	400	-	-	1,4
10	inokulum + 20 % olje + 80 % blato	400	-	24,68	0,28
11	inokulum + 20 % olje + 80 % blato	400	-	24,68	0,28
12	inokulum + 20 % olje + 80 % blato	400	-	24,68	0,28
13	inokulum + 40 % olje + 60 % blato	400	-	18,48	0,56
14	inokulum + 40 % olje + 60 % blato	400	-	18,48	0,56
15	inokulum + 40 % olje + 60 % blato	400	-	18,48	0,56

**Preglednica 3:** Obremenitev reaktorjev (R1– blato, R2 – olje) po tednih.

**Table 3:** Weekly organic loading of reactors (R1 – wastewater sludge, R2 – waste edible oil).

	Teden	1	2	3	4	5
Obremenitev [g OS/L]	R1	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
	R2	3,2	1,6	1,6	2,4	3,2

### 3 Rezultati in diskusija

#### 3.1 Šaržni eksperiment

Določili smo biometanski potencial (BMP) odpadnega olja, odvečnega blata iz ČN ter njuni kombinaciji (slika 2). Največji metanski potencial  $357,6 \pm 5,5$  mL CH<sub>4</sub>/g KPK smo izmerili pri anaerobni presnovi blata. Več kot polovica metana je nastala v prvih dveh dneh, po štirih dneh je nastalo že 75 % vsega metana. To kaže na dobro sposobnost inokuluma, da razgradi organsko snov iz blata, in dobro prilagojenost mikroorganizmov na omenjeni substrat, saj je inokulum v teh reaktorjih sprejemal enake substrate kot na čistilni napravi. Nekoliko nižje metanske potenciale odpadnega blata so dobili raziskovalci (Vu in Min, 2019), ki so blato predhodno obdelali z mikrobno elektrokemičnim sistemom.

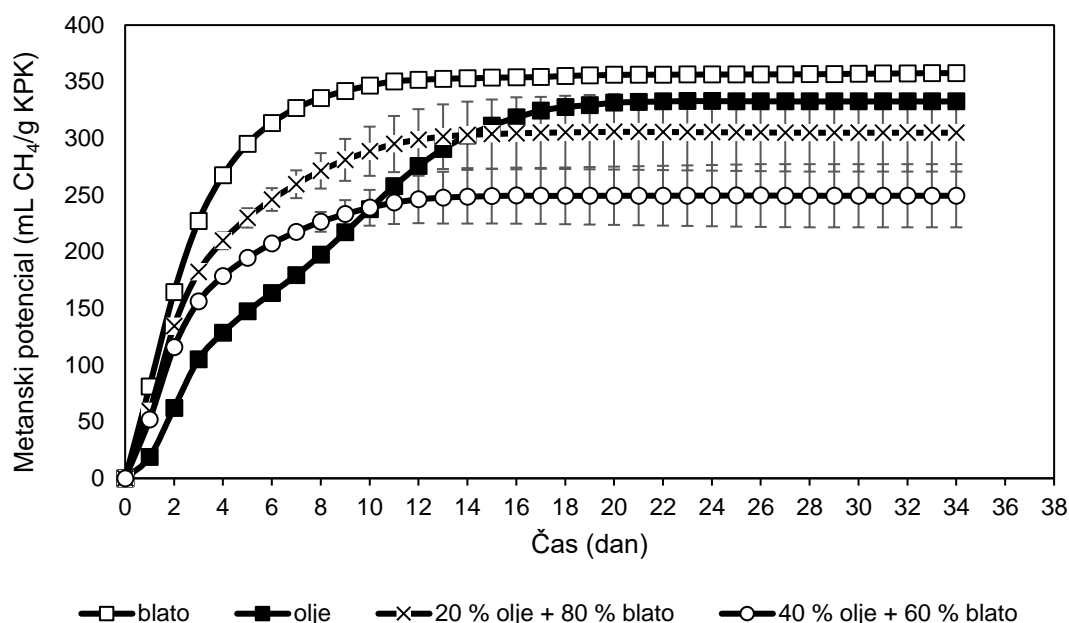
S kombinacijo 20 % olja in 80 % blata glede na organsko obremenitev smo dosegli metanski potencial  $305 \pm 34,3$  mL CH<sub>4</sub>/g KPK. Tudi v tem primeru je več kot polovica metana nastala že po dveh dneh. S kombinacijo 40 % olja in 60 % blata iz ČN smo dosegli metanski potencial  $249,4 \pm 27,9$  mL CH<sub>4</sub>/g KPK. Dodatek olja na šaržnem reaktorja ni kazal preobremenjenosti reaktorja niti lag faze, vendar je bila nekoliko večja standardna deviacija. Metanski potencial reaktorjev, kjer smo dodajali samo odpadno olje, je znašal  $332,7 \pm 0,8$  mL CH<sub>4</sub>/g KPK. V tem primeru v začetnih dneh vidimo manjše časovno obdobje prilagajanja. Rezultati so podobni raziskavam Meng et al. (2015). Njihova produkcija metana je znašala 900 mL CH<sub>4</sub>/mL dodanega olja (v našem primeru 708,3 mL CH<sub>4</sub>/L dodanega olja). Pojavila se je faza inhibicije, ki se je zmanjšala z dodajanjem prašičje gnojevke. V naših primerih smo se z dodajanjem blata izognili lag fazi.

Vsebnost dušika v odpadnem olju je zelo majhna (Marchetti et al., 2019). Z dodajanjem večje

količine odpadnega olja smo mikroorganizmom, ki so do sedaj prejeli samo blato iz ČN, spremenili okolje, kar je posledično pripeljalo do faze prilagajanja mikroorganizmov na novi substrat (Kolbl et al., 2014). Po analizah Murovec et al. (2015) rezultatov biometanskega potenciala (BMP) ne moremo neposredno uporabiti za prenos na realne čistilne naprave, prav tako po raziskavah Batstone et al. (2009) podatki niso primerni za dinamično modeliranje anaerobnih procesov. Tudi Fierro et al. (2014) navajajo, da je odzivnost šaržnega in semikontinuiranega procesa lahko bistveno drugačna, in priporočajo dodatne eksperimente v semikontinuiranih reaktorjih.

Rezultati v šaržnih reaktorjih lahko v določenih primerih precejšnje produkcije metana ali pa takoj ne pokažejo na inhibicije, ki bi se lahko pojavile v realnem reaktorju. Koch et al. (2017, 2019) so prišli do podobnega zaključka. Navajajo, da do različnih izmerjenih metanskih donosov lahko pride tudi zaradi nepravilnega hranjenja inokuluma, prevelikega redčenja inokuluma in nepravilnega razmerja inokulum : substrat. Navajajo tudi, da standardni testi iz uveljavljenih smernic za meritve metanskih potencialov predstavijo samo idealizirane krivulje, ki ne predstavljajo dejanskih meritev. Odzivi, ki so drugačni od idealnih krivulj, tam niso pojasnjeni. Za potrebe industrije je velikokrat pomembnejše vprašanje, koliko novega substrata lahko dozirajo v anaerobni reaktor, da proces anaerobne presnove poteka nemoteno in da ne prihaja do inhibicij. Zato so za zanesljivejše rezultate potrebni vsaj semikontinuirani eksperimenti. Kljub temu testi metanskega potenciala lahko služijo kot groba napoved za izvedljivost uporabe določenega substrata.





*Slika 2: Metanski potencial blata iz ČN in odpadnega olja.*

**Figure 2: Methane potential of wastewater sludge and waste edible oil.**

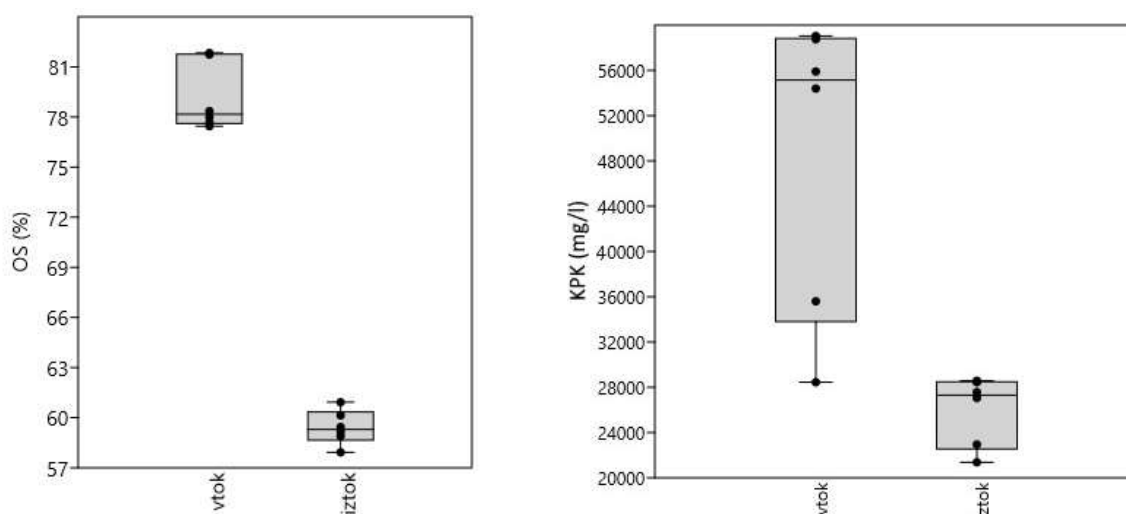
### 3.2 Semikontinuirni eksperiment

Možnost uporabe odpadnega jedilnega olja v anaerobnem reaktorju na ČN smo preizkusili na 170 L pilotnem anaerobnem reaktorju. Vzporedno smo v drugem pilotnem anaerobnem reaktorju za produkcijo metana uporabljali odvečno blato iz ČN. Organska obremenitev na začetku eksperimenta je bila v obeh reaktorjih enaka (preglednica 2). V času poteka eksperimenta smo spremljali tudi vhodne in izhodne parametre anaerobnega reaktorja na ČN. Povprečne vrednosti KPK na vtoku v realni reaktor ČN so se gibale okrog 48,7 g/L (slika 3), vrednosti organske snovi so bile med 77 in 82 %, povprečni pH na vtoku v reaktor je znašal 5,7 (slika 4).

Vrednosti celotnega dušika po Kjeldahlu (TKN) anaerobno pregnitega blata in odvečnega blata so se na ČN Domžale med časom trajanja eksperimenta gibale od 1300 mg/L pa vse do 2000 mg/L. Povprečne koncentracije celotnega fosforja (TP) na vtoku v anaerobni reaktor ČN so bile

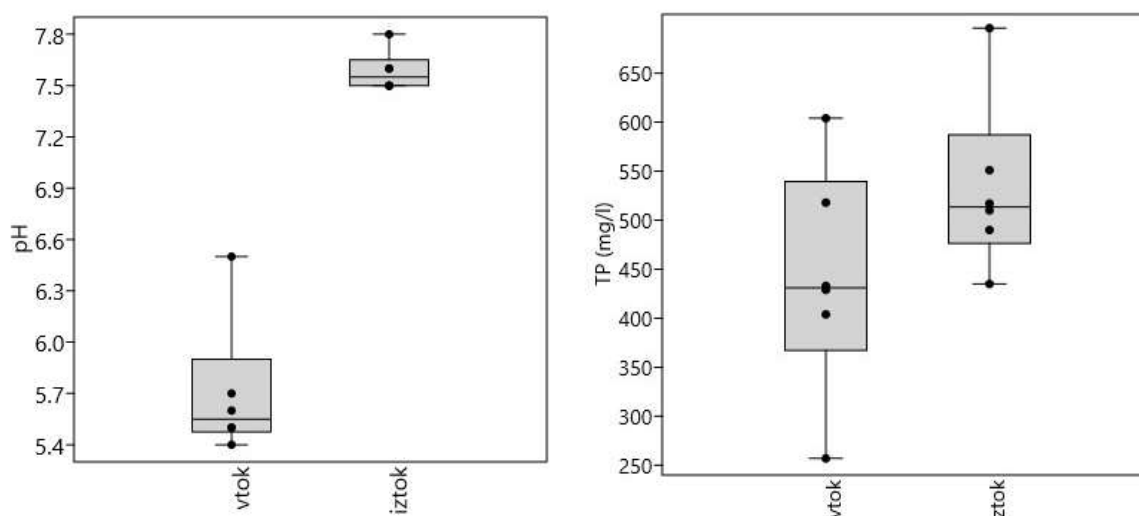
nekoliko manjše kot v iztoku iz anaerobnega reaktorja ČN (slika 4). Do razlik najverjetneje prihaja zaradi kompleksnih interakcij med elementi, kot so železo, fosfor in žveplo. V anaerobnem reaktorju se sulfat reducira v sulfide, medtem ko se fosfor najverjetneje kemijsko in biološko sprosti zaradi ponovnega raztapljanja železovega fosfata in hidrolize polifosfatov (Batstone et al., 2015). Na ČN so s procesom anaerobne presnove vsebnost KPK zmanjšali za okrog 49,4 %, vsebnost organske snovi pa za okrog 25,6 %. Koncentracija KPK se je tako znižala na območje med 23 in 28 g/L, vsebnost organske snovi pa na območje med 58 in 61 %. Vrednosti pH na iztoku iz reaktorjev so bile v optimalnem območju za anaerobno presnovo (slika 4).

Na pilotnih reaktorjih, kjer smo kot substrat dodajali odpadno jedilno olje in odvečno blato iz ČN, smo dnevno spremljali produkcijo bioplina (slika 5).



**Slika 3:** Koncentracija organske snovi (OS) na vtoku in iztoku iz anaerobnega reaktorja ČN (levo) in koncentracija KPK na vtoku in iztoku iz anaerobnega reaktorja ČN (desno) v času trajanja eksperimentov.

**Figure 3:** Concentration of volatile solids (VS) and concentration of total COD (right) of influent and effluent from the WWTP anaerobic reactor during the experiment time.



**Slika 4:** Vrednost pH (levo) in koncentracija celotnega fosforja (TP) (desno) na vtoku in iztoku iz anaerobnega reaktorja ČN v času eksperimentov.

**Figure 4:** pH values (left) and the concentration of total phosphorous (TP) (right) of influent and effluent from WWTP anaerobic reactor during the experiment.

Prvi dan eksperimenta med produkcijo bioplina ni bilo razlik med reaktorjema (R1 in R2). Nato opazamo, da je bila produkcija bioplina v reaktorju z oljem bistveno večja od produkcije bioplina z blatom iz ČN. Vrednost pH v reaktorju z oljem je ob organski obremenitvi 3,2 mg OS/L inokuluma

padla pod 7 (slika 6). Da bi preprečili nadaljnjo padanje pH, smo organsko obremenitev zmanjšali za polovico. Do organske preobremenitve je prišlo predvsem zaradi razgradnje olja v glicerol in dolgoverižne hlapne maščobne kisline, ki znižajo pH vsebnosti reaktorja. Dolgoverižne maščobne

kislina se naprej razgradijo v vodik, CO<sub>2</sub> in acetat (ali propionat). Ta transformacija poteka preko β-oksidacijske poti, ki pa je v procesu anaerobne presnove hitrostno omejena (Zhang et al., 2017). Podobno obnašanje sistema so opazili tudi v več raziskavah, kjer so kot kosubstrat uporabljali olje in maščobo. V vseh primerih je do odpovedi sistema prišlo pri organski obremenitvi 3,4 g OS/L dan (Wan et al., 2011; Li et al., 2013; Noutsopoulos et al., 2013). Dolgoverižne maščobne kisline, ki nastanejo pri razgradnji olja, so že v majhnih koncentracijah lahko toksične za acetogene bakterije, ki proizvajajo vodik, ter za acetotrofne in hidrogenotrofne arheje, ki proizvajajo metan (Zhang et al., 2017).

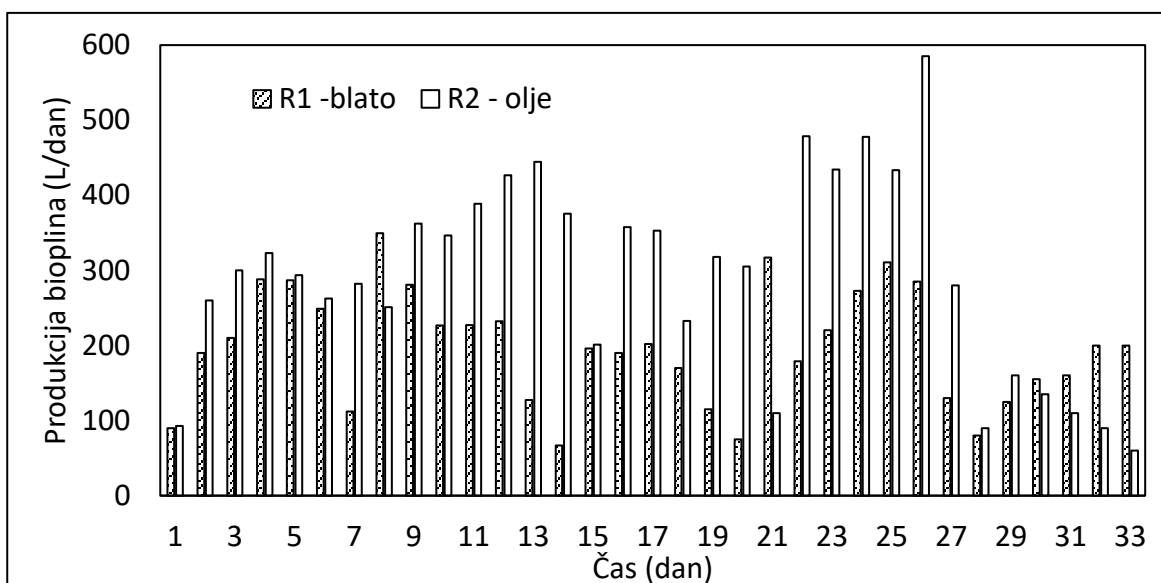
Organsko preobremenjenost smo potrdili tudi z razmerjem FOS/TAC (slika 7). Ta je preseгла vrednost krepko preko optimalnega območja, ki se giblje med 0,2 in 0,4 (Kolbl et al., 2015). Zhang et al. (2014) poročajo, da razmerje med FOS/TAC > 0,4 bistveno inhibira produkcijo bioplina, medtem ko Borja in sodelavci (Borja et al., 2004) poročajo o nestabilnem delovanju anaerobnih reaktorjih pri razmerju FOS/TAC višjem od 0,3 in 0,4. Kopičenje hlapnih maščobnih kislin škodljivo vpliva na aktivnost metanogenih arhej, ki proizvajajo metan. Različne kisline imajo različen vpliv na mikroorganizme, toksičnost pa je odvisna od nasičenosti kislin, dolžine molekul, temperature in vrste substrata (Silva et al., 2016). Dolgoverižne maščobne kisline poškodujejo membrane celic mikroorganizmov, kar zmanjša

transport hranilnih snovi in poslabša prepustnost celice mikroorganizmov (Iskander et al., 2021). Različni avtorji, ki jih navajajo Marchetti et al. (2020), v takih primerih predlagajo zmanjšanje organske obremenitve, kar zmanjša razmerje FOS/TAC, ali dodajanje dodatkov/kopresnovo. Z zmanjšanjem organske obremenitve z jedilnim oljem v semikontinuirnem reaktorju smo obrnili trend zmanjševanja aktivnosti mikroorganizmov, do katerega je prišlo predvsem zaradi kopičenja maščobnih kislin. Do podobnih ugotovitev so prišli tudi Iskander et al. (2021), ki so poleg zmanjšanja obremenitve anaerobnih reaktorjev predlagali tudi doziranje s prekinitvami.

Pri spremljanju različnih parametrov smo ugotovili, da se je v anaerobnem reaktorju R2 bistveno povečala koncentracija topnega KPK (slika 8), kar nakazuje na zmanjšano oziroma zelo slabo sposobnost razgradnje večjih količin olja. Razlike med topnim KPK v R1 in R2 so bili statistično značilne ( $p < 0,05$ ).

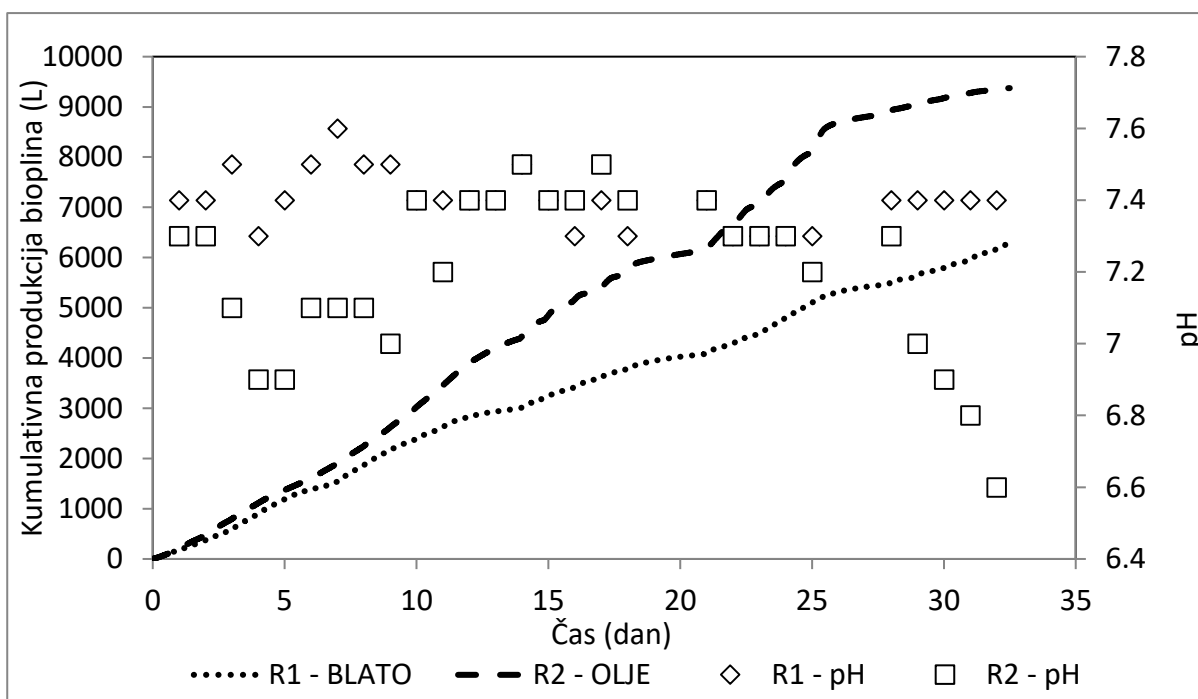
Iz statistične analize izmerjenih parametrov smo ugotovili negativne korelacije med topnim KPK v R2 in pH v R2 ( $p < 0,05$ ,  $R = -0,627$ ). Z večanjem topnega KPK se je začel nižati tudi pH v reaktorju R2 (slika 6).

Izvedli smo tudi meritve NH<sub>4</sub>-N na iztoku iz anaerobnih reaktorjev. Koncentracije na iztoku iz obeh reaktorjev se bistveno niso razlikovale in so se gibale med 533 in 823 mg/L, odvisno od lastnosti vhodnega blata.



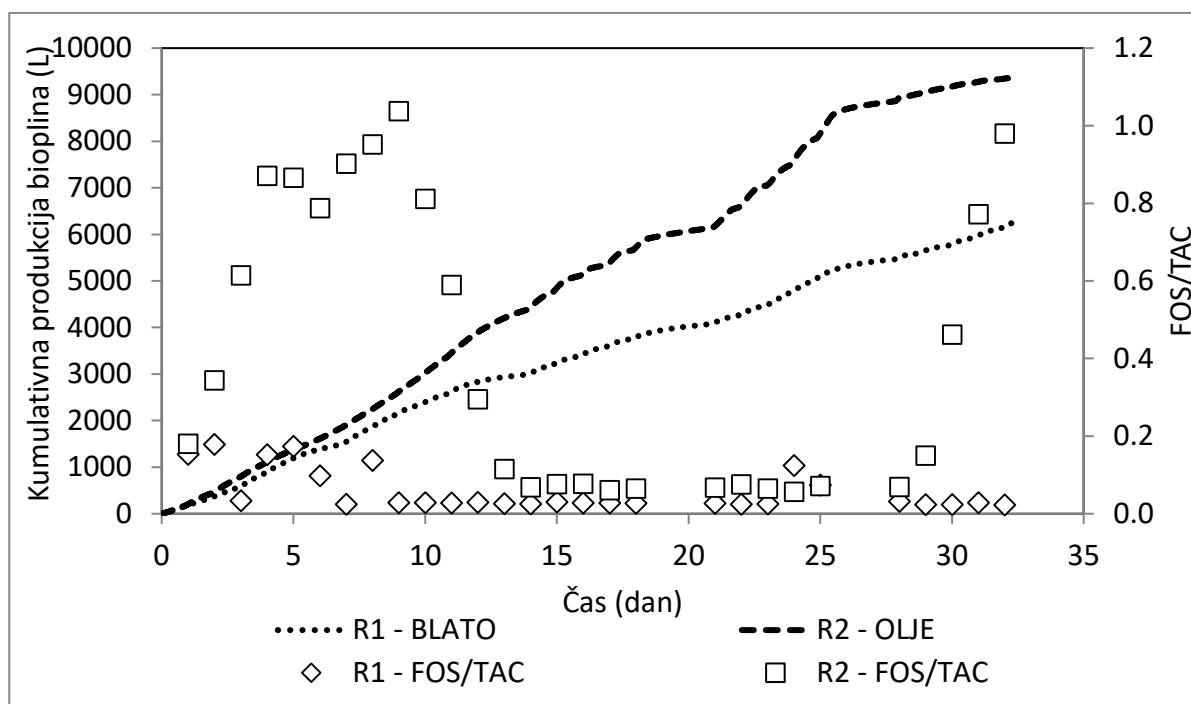
Slika 5: Dnevna produkcija bioplina v pilotnih reaktorjih. V reaktor 1 (R1) smo dozirali odvečno blato, v reaktor 2 (R2) pa odpadno jedilno olje.

Figure 5: Daily production of biogas in anaerobic reactors of a semi-continuous experiment. Reactor 1 (R1) received wastewater sludge, reactor 2 (R2) received waste edible oil.



Slika 6: Vrednost pH v anaerobnih reaktorjih v semikontinuirnem eksperimentu ob dnevni kumulativni produkciji bioplina.

Figure 6: pH of anaerobic reactors in semi-continuous experiment and cumulative biogas production.

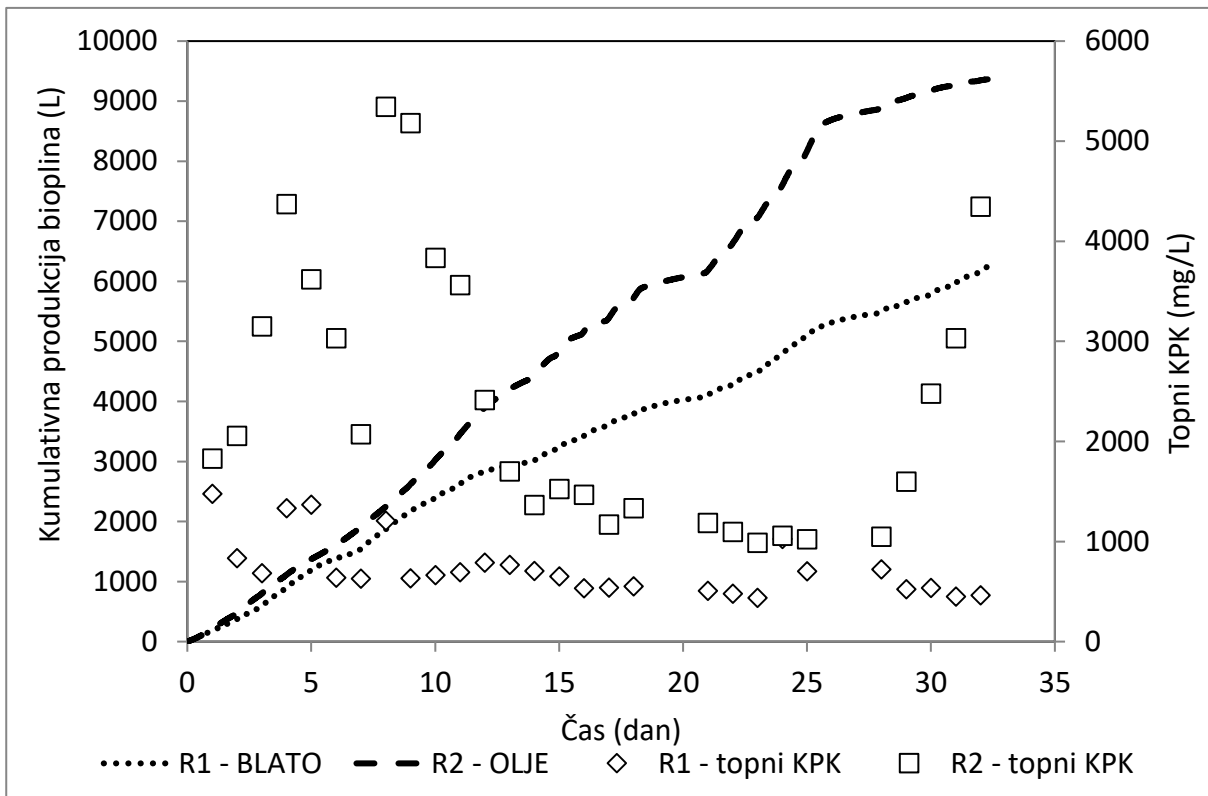


**Slika 7:** Razmerje FOS/TAC v anaerobnih reaktorjih v semikontinuirnem eksperimentu ob dnevni kumulativni produkciji bioplina.

**Figure 7:** FOS/TAC ratio of anaerobic reactors in semi-continuous experiment and daily cumulative biogas production.

Pri dinamiki produkcije bioplina opazimo, da je dnevna produkcija bioplina glede na dozirani KPK prvi teden v R2 manjša kot v R1 (slika 9). To je lahko posledica preobremenitve in adaptacije mikroorganizmov na novi substrat – olje. Naslednja dva tedna (dan 7 do dan 14), ko je bila organska obremenitev reaktorja z oljem 1,6 g OS/L, opažamo, da so se parametri, kot so pH, FOS/TAC in topni KPK, postopno začeli izboljševati. Vrednosti pH so se vrstile v nevtralno območje, vrednost FOS/TAC se je ob začetnem velikem dvigu z večdnevni zamikom vrnila pod 0,4. Tudi koncentracija topnega KPK na iztoku je

padla pod 2000 mg/L. Vendar je, kot je razvidno iz slik, do izboljšanja procesnih parametrov prišlo z daljšim zamikom. Odzivnost procesa je daljša, saj anaerobni mikroorganizmi za obnovo potrebujejo tudi do 16 dni, medtem ko aerobni lahko zgolj nekaj ur (Deublein in Steinhäuser, 2010). Produkcija bioplina glede na obremenitev s KPK je bila tokrat višja pri reaktorju R2, ki smo ga dozirali z oljem. V reaktorju R2 je v primerjavi z R1 nastalo 77 % več bioplina (dan 7 do dan 14, glede na obremenitev s KPK), največja razlika (82 %) pa je bila med 14. in 21. dnevom (slika 9).



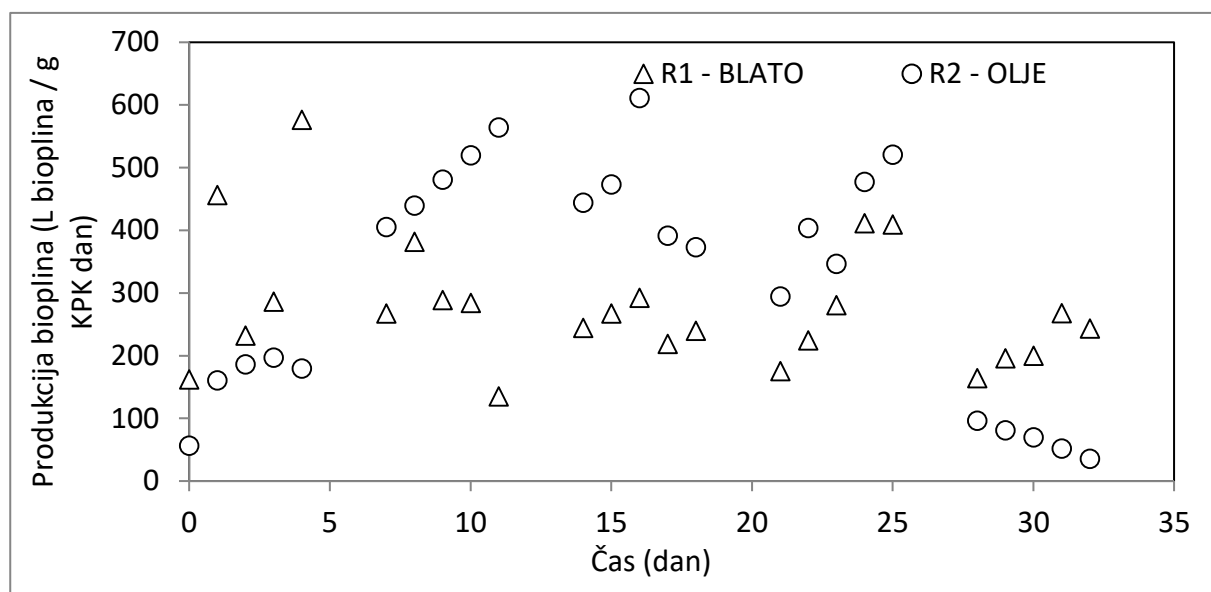
**Slika 8:** Koncentracija topnega KPK v anaerobnih reaktorjih v semikontinuuirnem eksperimentu ob dnevni kumulativni produkciji bioplina.

**Figure 8:** Soluble COD concentrations of anaerobic reactors in a semi-continuous experiment and daily cumulative biogas production.

Po stabilizaciji delovanja anaerobnega reaktorja z oljem (R2) smo organsko obremenitev povečali na 2,4 g OS/L (dan 21 do 28). S povečanjem količine odpadnega jedilnega olja se je nekoliko zmanjšal pH (s 7,4 na 7,2), preostali parametri se bistveno niso spremenili. Pri tej organski obremenitvi smo ostali znotraj varnega območja proizvodnje bioplina in stabilnega delovanja procesa anaerobne presnove, kar nakazuje razmerje FOS/TAC, pH in produkcija metana.

Zadnji teden (dan 28 do 35), smo reaktorju z oljem (R2) povečali organsko obremenitev na 3,2 g

OS/L. Na preobremenjenost sistema kažejo zmanjšana produkcija bioplina v primerjavi z R1 in produkcije pred povečanjem obremenitve, skokovito povečanje razmerja FOS/TAC, padec pH na 6,6 in povečanje topnega KPK na iztoku iz reaktorja. Pomembna je signifikantna korelacija ( $p < 0,05$  in  $R = -0,81384$ ) med vrednostmi FOS/TAC in pH v reaktorju R2, kar nakazuje, da je spremljanje parametra FOS/TAC zelo pomembno za ohranitev stabilnega delovanja anaerobnega reaktorja. Produkcija bioplina v R2 se je v primerjavi z reaktorjem R1 zmanjšala za 30 % (glede na obremenitev s KPK) (slika 9).



**Slika 9:** Dnevna produkcija bioplina v pilotnih reaktorjih glede na dozirani KPK. V reaktor 1 (R1) smo dozirali odvečno blato, v reaktor 2 (R2) pa odpadno jedilno olje.

**Figure 9:** Daily production of biogas in semi-continuous anaerobic reactors, relative to daily COD dosing. Reactor 1 (R1) received wastewater sludge, reactor 2 (R2) received waste edible oil.

Reaktor 1, ki smo mu dozirali odvečno blato iz ČN, je celotni čas trajanja eksperimenta deloval stabilno. Pri dnevni proizvodnji bioplina med celotnim eksperimentom je med reaktorjema R1 in R2 prihajalo do razlik, vendar te statistično niso bile značilne ( $p = 0,362$ ,  $F = 0,846$ ). Do statistično značilnih razlik ( $p < 0,05$ ) je prišlo prvi in zadnji teden eksperimenta. V prvem tednu je v reaktorju R2, ki smo mu dodajali olje, potekala faza prilagajanja na novi substrat. Zadnji teden smo reaktor R2 preobremenili, takrat je produkcija bioplina skokovito začela upadati. Vsebnost metana v bioplinu je 31. dan v R2 znašala 38,1 %.

Dnevne produkcije bioplina so se med seboj razlikovale, predvsem zaradi različnih lastnosti blata, ki se dnevno proizvede na ČN (sliki 3 in 4). Dnevna nihanja v vsebnosti organske snovi, pH, suhi snovi, BPK<sub>5</sub> in HMK so vsakodnevna praksa na ČN. Vsebnosti organske snovi na iztoku iz R2 so malenkost večje kot vrednosti na ČN, kar lahko pripišemo modelnemu merilu. Delež metana je 31. dan v R1 znašal 63,9 %, kar je bistveno več od R2. Na podlagi rezultatov lahko zaključimo, da se je produkcija bioplina v reaktorju R2 (glede na

obremenitev s KPK), ki je dobival odpadno jedilno olje, v primerjavi z reaktorjem R1, ki smo mu dodajali samo blato iz ČN, v povprečju povečala za 64 %.

#### 4 Zaključek

V študiji smo preučevali vpliv dodajanja odpadnega olja na proizvodnjo bioplina. Anaerobna presnova odpadnega jedilnega olja lahko pripomore k povečani proizvodnji bioplina na čistilnih napravah. Za stabilno delovanje anaerobnega procesa je treba narediti laboratorijske eksperimente, kjer se določi optimalna količina odpadnega olja, ki jo lahko varno dozirano v anaerobne reaktorje, da ne pride neželjenih inhibicij, v najslabšem primeru pa do odpovedi sistema. Stabilno delovanje sistema z dodajanjem odpadnega jedilnega olja smo dosegli pri organski obremenitvi 1,6 do 2,4 g OS/L dan. Največ bioplina se je proizvedlo pri obremenitvi 1,6 g OS/L dan. Na podlagi rezultatov meritev na pilotnih reaktorjih sklepamo, da je odpadno jedilno olje primeren substrat za anaerobno presnovo, vendar je treba pred uvajanjem tega na realno ČN

narediti pilotne eksperimente in določiti maksimalno količino odpadnega jedilnega olja, ki ne povzroči inhibicije anaerobnega procesa.

## Viri

- APHA (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Edited by L. S. C. E.W. Rice, R.B. Baird, A.D. Eaton. Washington, USA: American Water Works Assn. Available at: <https://www.amazon.com/Standard-Methods-Examination-Water-Wastewater/dp/0875530133>.
- Awe, O. W., Lu, J., Wu, S., Zhao, Y., Nzihou, A., Lyczko, N., Minh, D. P. (2018). Effect of Oil Content on Biogas Production, Process Performance and Stability of Food Waste Anaerobic Digestion. *Waste and Biomass Valorization* **9**(12), 2295–2306. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0179-4>.
- Batstone, D. J., Puyol, D., Flores-Alsina, X., Rodríguez, J. (2015). Mathematical modelling of anaerobic digestion processes: applications and future needs. *Rev. Environ. Sci. Bio/Technology* **14**(4), 595–613. <https://doi.org/10.1007/s11157-015-9376-4>.
- Batstone, D. J., Tait, S., Starrenburg, D. (2009). Estimation of hydrolysis parameters in full-scale anaerobic digesters. *Biotechnol. Bioeng.* **102**(5), 1513–1520. <https://doi.org/10.1002/bit.22163>.
- Borja, R., Rincón, B., Raposo, F., Domínguez, J. R., Millán, F., Martín, A. (2004). Mesophilic anaerobic digestion in a fluidised-bed reactor of wastewater from the production of protein isolates from chickpea flour. *Process Biochem.* **39**(12), 1913–1921. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2003.09.022>.
- Carnevale, E., Molari, G., Vittuari, M. (2017). Used Cooking Oils in the Biogas Chain: A Technical and Economic Assessment. <https://doi.org/10.3390/en10020192>.
- Deublein, D., Steinhauser, A. (2010). Biochemistry, in: *Biogas from Waste and Renewable Resources*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 97–100. <https://doi.org/10.1002/9783527632794.ch9>.
- Fierro, J., Martínez, E. J., Morán, A., Gómez, X. (2014). Valorisation of used cooking oil sludge by codigestion with swine manure. *Waste Manag.* **34**(8), 1537–1545. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.02.006>.
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T. a. T., Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontol. Electron.* **4**(1)(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2008.05.025>.
- He, X., Zhang, Q., Cooney, M. J., Yan, T. (2015). Biodegradation of fat, oil and grease (FOG) deposits under various redox conditions relevant to sewer environment. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **99**(14), 6059–6068. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-6457-9>.
- Huynh, L.-H., Kasim, N. S., Ju, Y.-H. (2011). Chapter 16 - Biodiesel Production from Waste Oils, in: Pandey, A., Larroche, C., Ricke, S. C., Dussap, C.-G., Gnansounou, E. B. T.-B. (Eds.), . Academic Press, Amsterdam, 375–396. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385099-7.00017-6>.
- Iskander, S. M., Amha, Y. M., Wang, P., Dong, Q., Liu, J., Corbett, M., Smith, A. L. (2021). Investigation of Fats, Oils, and Grease Co-digestion With Food Waste in Anaerobic Membrane Bioreactors and the Associated Microbial Community Using MinION Sequencing. *Front. Bioeng. Biotechnol.* **9**, 613626. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.613626>.
- Koch, K., Hafner, S. D., Weinrich, S., Astals, S. (2019). Identification of Critical Problems in Biochemical Methane Potential (BMP) Tests From Methane Production Curves. *Front. Environ. Sci.*
- Koch, K., Lippert, T., Drewes, J. E. (2017). The role of inoculum's origin on the methane yield of different substrates in biochemical methane potential (BMP) tests. *Bioresour. Technol.* **243**, 457–463. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2017.06.142>.
- Kolbl Repinc, S., Šket, R., Zavec, D., Mikuš, K. V., Feroso, F. G., Stres, B. (2018). Full-scale agricultural biogas plant metal content and process parameters in relation to bacterial and archaeal microbial communities over 2.5 year span. *J. Environ. Manage.* **213**, 566–574. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.058>.
- Kolbl Repinc, S., Deutsch, L., Savić, D., Steinman, F., Danilović, B., Stres, B. (2021). The impact of crude glycerol from biodiesel production and its trace element content on biomethane production in a batch experiment: modelling as a step towards an impartial routine comparison of results. *Acta Hydrotechnica* **(34/60)**, 11–24. <https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2021.02>
- Kolbl, S., Paloczi, A., Panjan, J., Stres, B. (2014). Addressing case specific biogas plant tasks: Industry oriented methane yields derived from 5L Automatic Methane Potential Test Systems in batch or semi-continuous tests using realistic inocula, substrate



- particle sizes and organic loading. *Bioresour. Technol.* **153**, 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.010>.
- Kolbl, S., Panjan, J., Stres, B. (2016). Mixture of primary and secondary municipal wastewater sludge as a short-term substrate in 2 MW agricultural biogas plant: site-specific sustainability of enzymatic and ultrasound pretreatments. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **91**(11), 2769–2778. <https://doi.org/10.1002/jctb.4883>.
- Li, C., Champagne, P., Anderson, B. C. (2013). Biogas production performance of mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion with fat, oil, and grease in semi-continuous flow digesters: Effects of temperature, hydraulic retention time, and organic loading rate. *Environ. Technol. (United Kingdom)* **34**(13–14), 2125–2133. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.824010>.
- Li, Y., Jin, Y., Borrion, A., Li, J. (2018). Influence of feed/inoculum ratios and waste cooking oil content on the mesophilic anaerobic digestion of food waste. *Waste Manag.* **73**, 156–164. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.12.027>.
- Long, J. H., Aziz, T. N., Reyes, F. L. D. L., Ducoste, J. J. (2012). Anaerobic co-digestion of fat, oil, and grease (FOG): A review of gas production and process limitations. *Process Saf. Environ. Prot.* **90**(3), 231–245. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2011.10.001>.
- Marchetti, R., Vasmara, C., Bertin, L., Fiume, F. (2020). Conversion of waste cooking oil into biogas: perspectives and limits. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **104**(7), 2833–2856. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10431-3>.
- Marchetti, R., Vasmara, C., Fiume, F. (2019). Pig slurry improves the anaerobic digestion of waste cooking oil. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **103**(19), 8267–8279. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-10087-8>.
- Meng, Y., Li, S., Yuan, H., Zou, D., Liu, Y., Zhu, B., Chufo, A., Jaffar, M., Li, X. (2015). Evaluating biomethane production from anaerobic mono- and co-digestion of food waste and floatable oil (FO) skimmed from food waste. *Bioresour. Technol.* **185**, 7–13. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.02.036>.
- Murovec, B., Kolbl, S., Stres, B. (2015). Methane Yield Database: Online infrastructure and bioresource for methane yield data and related metadata. *Bioresour. Technol.* **189**, 217–223. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.021>.
- Noutsopoulos, C., Mamais, D., Antoniou, K., Avramides, C., Oikonomopoulos, P., Fountoulakis, I. (2013). Anaerobic co-digestion of grease sludge and sewage sludge: The effect of organic loading and grease sludge content. *Bioresour. Technol.* **131**, 452–459. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.193>.
- Silva, S. A., Salvador, A. F., Cavaleiro, A. J., Pereira, M. A., Stams, A. J. M., Alves, M. M., Sousa, D. Z. (2016). Toxicity of long chain fatty acids towards acetate conversion by *Methanosaeta concilii* and *Methanosarcina mazei*. *Microb. Biotechnol.* **9**(4), 514–518. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12365>.
- Tandukar, M., Pavlostathis, S. G. (2015). Co-digestion of municipal sludge and external organic wastes for enhanced biogas production under realistic plant constraints. *Water Res.* **87**, 432–445. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.04.031>.
- Tchobanoglous, G. (2004). Wastewater engineering: treatment and reuse, McGraw-Hill series in civil and environmental engineering. New York; London: McGraw-Hill, cop. 2004.
- Vu, H. T., Min, B. (2019). Enhanced methane fermentation of municipal sewage sludge by microbial electrochemical systems integrated with anaerobic digestion. *Int. J. Hydrogen Energy* **44**(57), 30357–30366. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.163>.
- Wan, C., Zhou, Q., Fu, G., Li, Y. (2011). Semi-continuous anaerobic co-digestion of thickened waste activated sludge and fat, oil and grease. *Waste Manag.* **31**(8), 1752–1758. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.025>.
- Wang, X. L., Zhou, J. J., Sun, Y. Q., Xiu, Z. L. (2019). Bioconversion of raw glycerol from waste cooking-oil-based biodiesel production to 1,3-propanediol and lactate by a microbial consortium. *Front. Bioeng. Biotechnol.* **7**(FEB), 14. <https://doi.org/10.3389/FBIOE.2019.00014/BIBTEX>.
- Yalcinkaya, S., Malina, J. F. (2015). Model development and evaluation of methane potential from anaerobic co-digestion of municipal wastewater sludge and un-dewatered grease trap waste. *Waste Manag.* **40**, 53–62. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.03.013>.
- Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., Tan, T. (2014). Reviewing the anaerobic digestion of food waste for

biogas production. *Renew. Sustain. Energy Rev.*

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.038>.

Zhang, W., Lang, Q., Fang, M., Li, X., Bah, H., Dong, H., Dong, R. (2017). Combined effect of crude fat content and initial substrate concentration on batch anaerobic digestion characteristics of food waste.

*Bioresour. Technol.* **232**, 304–312.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.039>.

SURS – Statistični urad Republike Slovenije. Dostopno na:

<https://pxweb.stat.si/sistat/sl/Podrocja/Index/99/okolje>

(pridobljeno 20. 6. 2021).

<https://www.stat.si/StatWeb/News/Index/9865>

(pridobljeno 28. 12. 2021)

SURS 2016. Statistični urad Republike Slovenije. Food Among waste. Dostopno na:

[https://www.stat.si/dokument/9206/FOOD\\_AMONG\\_WASTE\\_internet.pdf](https://www.stat.si/dokument/9206/FOOD_AMONG_WASTE_internet.pdf) (pridobljeno 11. 1. 2021).

SiStat 2021. Podatkovna baza Statističnega urada Republike Slovenija,

<https://pxweb.stat.si/SiStatData/pxweb/sl/Data/-/2706101S.px> (pridobljeno 28. 12. 2021)