

Napredno vodenje doziranja anaerobnega fermentorja za razgradnjo organskih odpadkov in proizvodnjo bioplina

Darko Vrečko¹, Nadja Hvala¹, Marko Krošel², Albin Lorenci², Samo Ceferin²

¹Odsek za sisteme in vodenje, Institut Jožef Stefan, Jamova 39, Ljubljana

²Kolektor Sisteh d.o.o., Šlandrova ulica 10, 1231 Ljubljana - Črnuče

darko.vrecko@ijs.si, nadja.hvala@ijs.si, marko.krosel@kolektor.com,

albin.lorenci@kolektor.com, samo.ceferin@kolektor.com

Advanced feed-rate control of an anaerobic digester for organic waste removal and biogas production

Obtaining energy from organic waste is one of the important sources of renewable energy. Organic waste can be treated in an anaerobic digester, where microorganisms produce biogas, from which electricity and heat can be obtained. Optimal operation of anaerobic digester requires an efficient control which adapts the operation of the digester to the variable composition and concentration of organic waste. The most demanding is the control of waste feed to the digester, which must be such that the highest possible production of biogas is reached, while the digester is not overloaded, as this may cause the acidification of microorganisms and shutdown of digester operation for several months. Most of the existing solutions for organic waste feed control are based on manually changing the dosage depending on the periodic laboratory analysis of the biogas in the digester. In this paper we present an advanced feed-rate control of an anaerobic digester, which is based on real-time measurements of the ratio of the volatile fatty acids and alkalinity in the digester and maintaining this ratio at the desired value. The control algorithm uses a PI controller and the overload protection that monitors the changes of the ratio mentioned. Control was tested on a pilot anaerobic digester operated under variable organic waste. Control ensures stable biogas production and prevents acidification of the process.

Kratek pregled prispevka

Pridobivanje energije iz odpadkov je eden pomembnih virov obnovljive energije. Organske odpadke lahko predelamo v anaerobnem fermentorju, kjer ob razgradnji z mikroorganizmi nastaja bioplin, iz katerega lahko pridobimo električno in toplotno energijo. Optimalno delovanje anaerobnega fermentorja zahteva učinkovito vodenje, ki obratovanje reaktorja prilagaja spremenljivi sestavi in koncentraciji organskih odpadkov. Najzahtevnejši del vodenja predstavlja doziranje odpadkov v reaktor, ki mora biti takšno, da se pri tem doseže čim višjo produkcijo bioplina, hkrati pa fermentorja ne smemo predozirati, ker lahko s tem povzročimo zastupitev mikroorganizmov in zaustavitev obratovanja fermentorja tudi za več mesecev. Večina obstoječih rešitev vodenja doziranja organskih odpadkov temelji na ročnem spreminjanju doziranja glede na občasne laboratorijske analize digestata v fermentorju. V prispevku predstavljamo napredno vodenje doziranja anaerobnega fermentorja, ki temelji na sprotni meritvi razmerja visokohlapnih kislin in alkalitete v fermentorju in vzdrževanju tega razmerja na zeleni vrednosti. Za vodenje je bil razvit algoritem s PI regulatorjem in zaščito pred predoziranje, ki spremlja spremembo omenjenega razmerja v fermentorju. Vodenje smo preizkusili na pilotni napravi anaerobnega fermentorja pri doziranju različnih organskih odpadkov. Vodenje zagotavlja stabilno proizvodnjo bioplina ter preprečuje zastupitev procesa.

1 Uvod

Zaradi globalnega segrevanja in klimatskih sprememb ter potrebe po zmanjšanju organskih fosilnih goriv, je v svetu vse večje povpraševanje po različnih obnovljivih virih energije. Organski odpadki, kot so gospodinjiski biološki odpadki, odpadki iz prehranske industrije, klavniške industrije, kmetijske vzreje živine, ostanki iz kmetijske dejavnosti in blato komunalnih čistilnih naprav lahko predstavljajo pomemben vir obnovljive energije.

Organske odpadke lahko predelamo v anaerobnem fermentorju, kjer ob razgradnji z mikroorganizmi nastaja bioplin, iz katerega lahko pridobimo električno in toplotno energijo. Optimalno delovanje anaerobnega fermentorja zahteva učinkovito vodenje, ki obratovanje reaktorja prilagaja spremenljivi sestavi in koncentraciji organskih odpadkov.

Najzahtevnejši del vodenja predstavlja doziranje odpadkov v reaktor, ki mora biti takšno, da se pri tem doseže čim višjo produkcijo bioplina, hkrati pa fermentorja ne smemo predozirati, ker lahko s tem povzročimo zastrupitev mikroorganizmov in zaustavitev obratovanja fermentorja tudi za več mesecev. Večina rešitev vodenja v praksi temelji na ročnem spreminjanju doziranja glede na občasne laboratorijske analize digestata v fermentorju.

V literaturi je moč najti različne strategije doziranja substrata [1], ki temeljijo na različnih merjenih veličinah v fermentorju, kot so: količina in sestava bioplina (metan, vodik), pH, maščobne kisline (volatile fatty acids - VFA), alkaliteta (ALK), kemijska potreba po kisiku (KPK), itd. V prispevku [2] so predlagali doziranje substrata z mehkim regulatorjem na osnovi proizvedenega bioplina in pH v fermentorju. V [3] so predstavili doziranje substrata, ki prilagaja referenco za bioplin na osnovi odziva proizvedenega bioplina na konico v doziranju. Predlagano vodenje potrebuje samo meritev bioplina, pH pa se pri tem lahko ročno

preverja. V [4] so predstavili adaptivno regulacijo doziranja substrata z uporabo »soft«
senzorja, ki ocenjuje anorgansko snov, VFA in alkaliteto v fermentorju. V [5] so predlagali mehko vodenje doziranja substrata na osnovi metana in vodika v proizvedenem bioplinu. Meritev vodika v bioplinu je bila uporabljena za detekcijo zastrupitve procesa. Velja, da zastrupitev procesa nastopi, ko koncentracija vodika v bioplinu preseže neko vrednost. V prispevkih [6, 7] so predstavili vodenje, ki prilagaja referenco za bioplin na osnovi odziva bioplina na stopničasto spremembo reference. Uporabili so kaskadno regulacijo, kjer se v zunanji zanki regulira količina proizvedenega bioplina, v notranji zanki pa pH v fermentorju. V [8] so predlagali nelinearno vodenje doziranja substrata na osnovi spremljanja metana in vodika v proizvedenem bioplinu. V [9] je predstavljeno ekspertno vodenje VFA v fermentorju. Zastrupitev procesa so detektirali na osnovi meritve VFA. V [10] je predstavljen novi merilnik AnaSense, ki omogoča sprotne merjenje pomembnih parametrov anaerobnega procesa, kot so: VFA, ALK, pH, itd. Merilnik je bil preizkušen pri vodenju doziranja substrata na osnovi merjene alkalitete (Intermediate alkalinity/Total alkalinity) fermentorja. V [11] so vodenje doziranja [7] nadgradili z mehkim nadzornim vodenjem na osnovi stanja zadrževalnega bazena za substrat. V [12] so predstavili kaskadno vodenje doziranja substrata v fermentor, kjer se v zunanji zanki regulira VFA, ki se meri z merilnikom AnaSense, v notranji zanki pa količina proizvedenega bioplina. Večina predlaganih strategij vodenja je bila preizkušena ali simulacijsko ali na laboratorijski napravi pod zelo kontroliranimi pogoji.

V prispevku predstavljamo vodenje doziranja anaerobnega fermentorja, ki temelji na sprotni meritvi razmerja VFA/ALK v fermentorju in vzdrževanju tega razmerja na želeni vrednosti. Za vodenje je bil razvit algoritem s PI regulatorjem in zaščito pred predoziranjem na osnovi spremljanja spremembe omenjenega razmerja. Gre za nadgradnjo vodenja, ki je

preizkušeno v [10]. Vodenje smo preizkusili na pilotni napravi anaerobnega fermentorja pri doziranju različnih organskih odpadkov.

V prispevku bomo najprej predstavili pilotno napravo anaerobnega fermentorja in nadzorno krmilni sistem. V nadaljevanju bomo prikazali rezultate poskusa zastrupitve pilotnega anaerobnega fermentorja. Sledi opis vodenja doziranja na osnovi merjenega razmerja VFA/ALK in prikaz rezultatov preizkušanja vodenja na pilotni napravi anaerobnega fermentorja. Prispevek bomo zaključili z najpomembnejšimi ugotovitvami.

2 Pilotna naprava anaerobnega fermentorja in nadzorno krmilni sistem

Pilotna naprava anaerobnega fermentorja, ki smo jo uporabili, je ena od pilotnih naprav na Bioplinarni Petrol Ihan (glej Sliko 1). Pilotna naprava ima skupni volumen 180 in delovni volumen 160 litrov. Naprava je napolnjena z digestatom iz realnega fermentorja bioplinarne. V napravo se lahko ročno dodaja določena količina substrata in odvzema vzorec za analiziranje delovanja naprave. Količina odvzetega vzorca iz fermentorja je enaka količini doziranega substrata.

Temperatura naprave se regulira z električnim grelcem na okoli 40 °C, mešanje reaktorja je določeno s frekvenco mešanja mešala. Procesi anaerobne fermentacije v pilotni napravi potekajo pod enakimi pogoji kot v realnem fermentorju.

Vrednosti pH, VFA in ALK v odvzetem vzorcu iz pilotne naprave se določajo po verificiranem laboratorijskem postopku, ki temelji na metodi titracije. Volumen in komponente bioplina so se merile z merilnikom GA 2000 proizvajalca Geotechnical Instruments, ki ga je instaliralo podjetje Raci d.o.o.

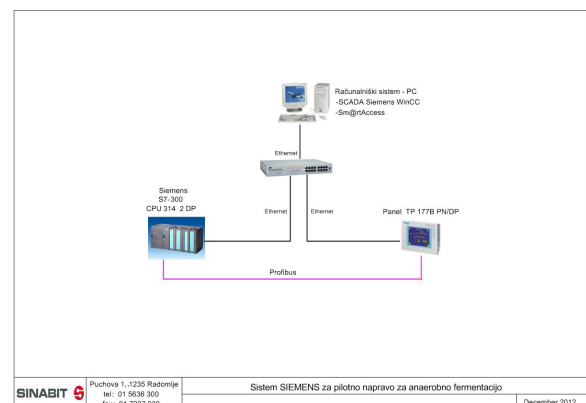
Pilotno napravo smo opremili z nadzorno krmilnim sistemom, ki omogoča nadzor in zajem signalov na napravi (glej Sliko 2).

Krmilni sistem sestavljajo: PLC SIEMENS SIMATIC S7 314C-2 DP COMPACT, periferni

moduli za zajem digitalnih in analognih signalov (24DI,16DO, 8AI, 2 AO) in dodani komunikacijski ethernet modul. Krmilni sistem omogoča testiranje različnih algoritmov vodenja na pilotni napravi.



Slika 1: Pilotne naprave anaerobnih fermentorjev v Bioplinarni Petrol Ihan.



Slika 2: Shema nadzorno krmilnega sistema pilotne naprave anaerobnega fermentorja.

Nadzor nad vodenjem poteka preko nadzornega sistema, ki je sestavljen iz operatorskega panela in nadzornega računalnika. Operatorski panel SIEMENS SIMATIC TP177B omogoča komunikacijo med krmilnikom in operatorskim panelom s komunikacijskim protokolom SIEMENS PROFIBUS. Nadzorni računalnik (Intel Core i5 CPU, 4GB RAM, NVIDIA GeForce GT240 GPU...) z nameščenim paketom SIEMENS SIMATIC WINCC omogoča nadzor nad procesom preko komunikacijskega protokola SIEMENS PROFINET in arhiviranje meritev s programom Microsoft SQL 2005. Preko

nadzornega sistema se vnašajo parametri, prikazujejo se trenutne procesne vrednosti ter vklaplajo in izklaplajo se aktuatorji. Oddaljen nadzor nad pilotno napravo omogoča aplikacija Sm@rtAccess, s katero je možen vpogled na operaterski panel preko standardnega internetnega brskalnika (kot npr. MS Internet Explorer ali drugi) preko HTTP protokola.

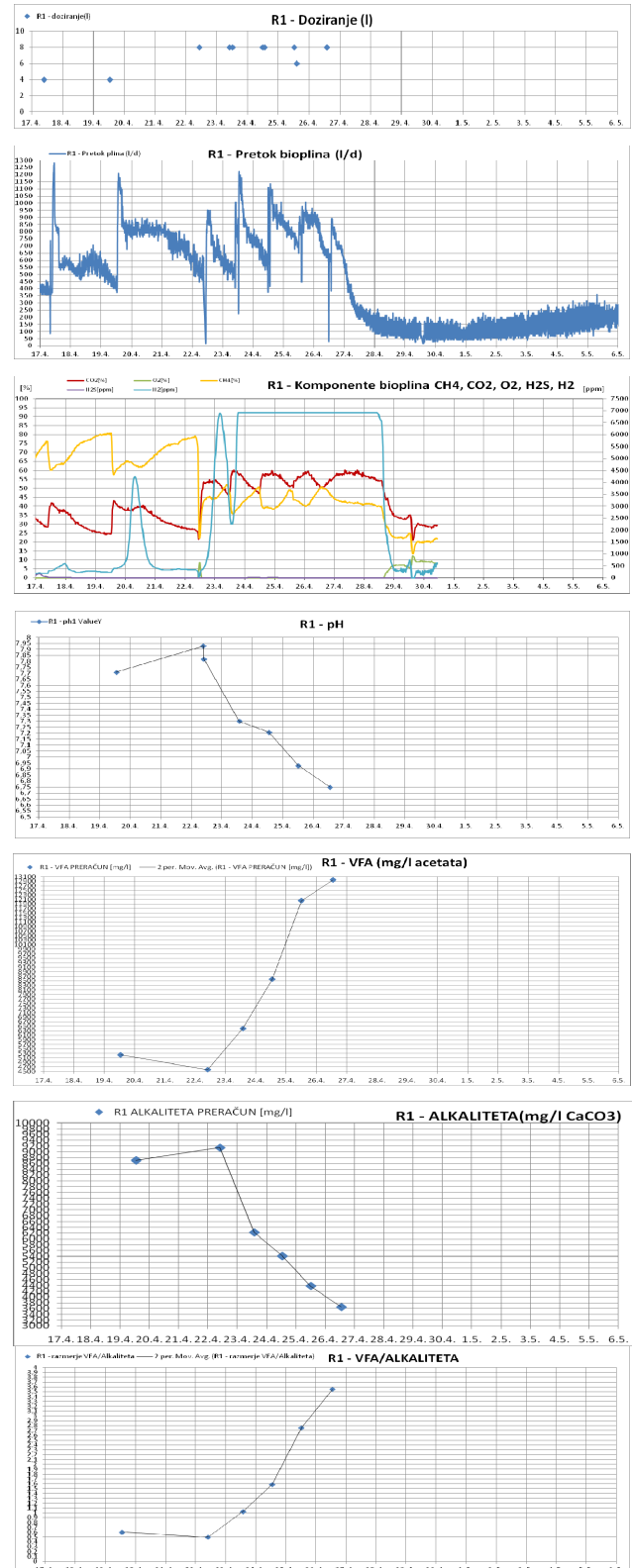
3 Poskus zastрупitve pilotne naprave anaerobnega fermentorja

Z namenom izbire najvplivnejših procesnih spremenljivk za vodenje, smo na pilotni napravi izvedli poskus, pri katerem smo povečevali doziranje substrata (odpadna hrana iz gospodinjstev) dokler nismo dosegli zastрупitve procesa. Doziranje substrata ter odvzem in analiziranje vzorca je potekalo ročno. Ugotoviti smo želeli, katere veličine so najboljši pokazatelj zastрупitve in posledično primerne za vodenje doziranja. Rezultati poskusa zastрупitve pilotnega fermentorja so prikazani na Sliki 3.

Vidimo, da pri vsakem doziranju substrata pride do kratkotrajne skokovite proizvodnje bioplina. S povečevanjem količine doziranega substrata pa se skoki bioplina zmanjšujejo. Po zastрупitvi procesa pade proizvodnja bioplina po nekem času na nič. Samo na osnovi opazovanja bioplina je težko pravočasno ugotoviti, da je prišlo do zastрупitve procesa.

Delež CO_2 v proizvedenem bioplinu se pri povečanem doziranju približuje deležu CH_4 . Pri zastрупitvi procesa so njune vrednosti skoraj enake. Razmerje med deležem CO_2 in CH_4 v bioplinu bi lahko služilo kot indikator zastрупitve naprave.

Ob vsakem doziranju substrata delež H_2 v bioplinu močno naraste, vendar se to zgodi z zakasnitvijo 12-15 ur. Ob zakisanju procesa delež H_2 v bioplinu naraste in ostane dolgo časa na visoki vrednosti in po nekem času pade na nič. Delež H_2 v bioplinu je težko direktno uporabiti za indikator zastрупitve procesa.



Slika 3: Rezultati poskusa zastрупitve pilotnega fermentorja. Od zgoraj navzdol: doziranje substrata, pretok bioplina, komponente bioplina, pH, VFA, ALK in razmerje VFA/ALK.

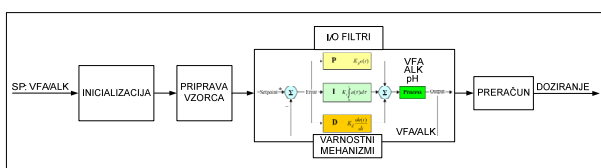
Vrednost VFA na napravi s povečevanjem doziranja ves čas izrazito raste (od 4573 mg/l do 12956 mg/l), vrednost ALK pa izrazito pada (od 8700 mg/l do 3600 mg/l), za razliko od pH, ki relativno počasi pada (od 7,9 do 6,75). Prav tako tudi razmerje VFA/ALK ves čas izrazito raste (od 0,5 do 3,54).

VFA kaže na količino kislin v napravi, ALK pa na sposobnosti naprave, da nevtralizira kislino. Razmerje VFA/ALK se hitro in intenzivno odziva na doziranje substrata in je dober indikator zastupitve naprave.

Na osnovi rezultatov poskusa zastupitve pilotne naprave in priporočil operaterja Bioplinarne Petrol Ihan smo se odločili, da za vodenje doziranja substrata uporabimo meritev razmerja VFA/ALK v fermentorju.

4 Vodenje doziranja substrata na osnovi razmerja VFA/ALK

Razvit je bil algoritem vodenja doziranja substrata na osnovi spremljanja razmerja VFA/ALK v fermentorju. Algoritem smo v krmilniku implementirali s šestimi bloki: inicializacija, priprava in merjenje vzorca, filtri, PI regulator, varnostni mehanizmi in preračuni. Shema vodenja doziranja substrata v SIEMENS SIMATIC okolju je prikazana na Sliki 3.



Slika 3: Shema vodenja doziranja anaerobnega fermentorja.

Inicializacija se zažene ob zagonu vodenja. Zaželeno je, da se izvede brez neželenega nihanja doziranja substrata.

Za vodenje potrebujemo meritev razmerja VFA/ALK v fermentorju, ki se lahko določi laboratorijsko ali npr. z merilnikom AnaSense [10].

Meritve VFA in ALK v anaerobnem fermentorju vsebujejo šum in se pred uporabo pri vodenju filtrirajo z nizkopasovnim filtrom.

Algoritem preveri, če so izmerjene vrednosti znotraj predvidenih območij.

Jedro vodenja predstavlja PI regulator z zaščito pred integralskim pobegom, ki prilagaja doziranje tako, da drži izmerjeno razmerje VFA/ALK v fermentorju na želeni konstantni vrednosti. Želena razmerje se lahko nastavi blizu mejne vrednosti, ki še omogoča stabilen proces anaerobne fermentacije, s čimer se maksimizira proizvodnjo bioplina.

Algoritem vsebuje zaščito pred zastupitvijo, ki temelji na spremljanju dnevne relativne spremembe razmerja VFA/ALK v fermentorju. Če je vrednost tega razmerja nad želeno vrednostjo in če se razmerje v enem dnevu relativno preveč poveča, algoritem ustavi doziranje.

Algoritem operira z vrednostmi, ki so normirane z volumnom fermentorja in jih je pred uporabo potrebno pretvoriti v realne vrednosti.

Algoritem je napisan v programskem jeziku SCL (Structured Control Language). Gre za višjenivojski programski jezik, ki omogoča naprednejšo tehniko programiranja in temelji na programskem jeziku Pascal.

Vnos parametrov in prikaz procesnih spremenljivk vodenja poteka preko operaterskega panela v nadzornem sistemu.

5 Preizkus vodenja na pilotni napravi anaerobnega fermentorja

Načrtano vodenje smo preizkusili na pilotni napravi anaerobnega fermentorja. Doziranje realnih bioloških odpadkov in analiziranje vzorca iz fermentorja se je izvajalo ročno enkrat na dan. Vrednosti VFA in ALK v fermentorju so se določale laboratorijsko po metodi titracije.

Ker je doziranje in analiziranja fermentorja potekalo enkrat dnevno smo čas vzorčenja vodenja nastavili na 1 dan. Časovne konstante procesov v anaerobnem fermentorju so res precej velike, kljub temu pa je uporabljen čas vzorčenja nekoliko predolg. Ob uporabi sprotnega merilnika razmerja VFA/ALK in

samodejnega doziranja substrata bi bilo smiselno čas vzorčenja skrajšati npr. na nekaj ur.

Parametre PI regulatorja smo nastavili na osnovi odziva na stopničasto spremembo doziranja substrata v pilotnem fermentorju z uporabo nastavitvenih pravil, ki se uporabljajo pri regulaciji z vgrajenim modelom [13].

Priporočena vrednost razmerja VFA/ALK v fermentorju je v literaturi okoli 0,3, pri našem preizkusu pa smo jo nastavili na 0,25.

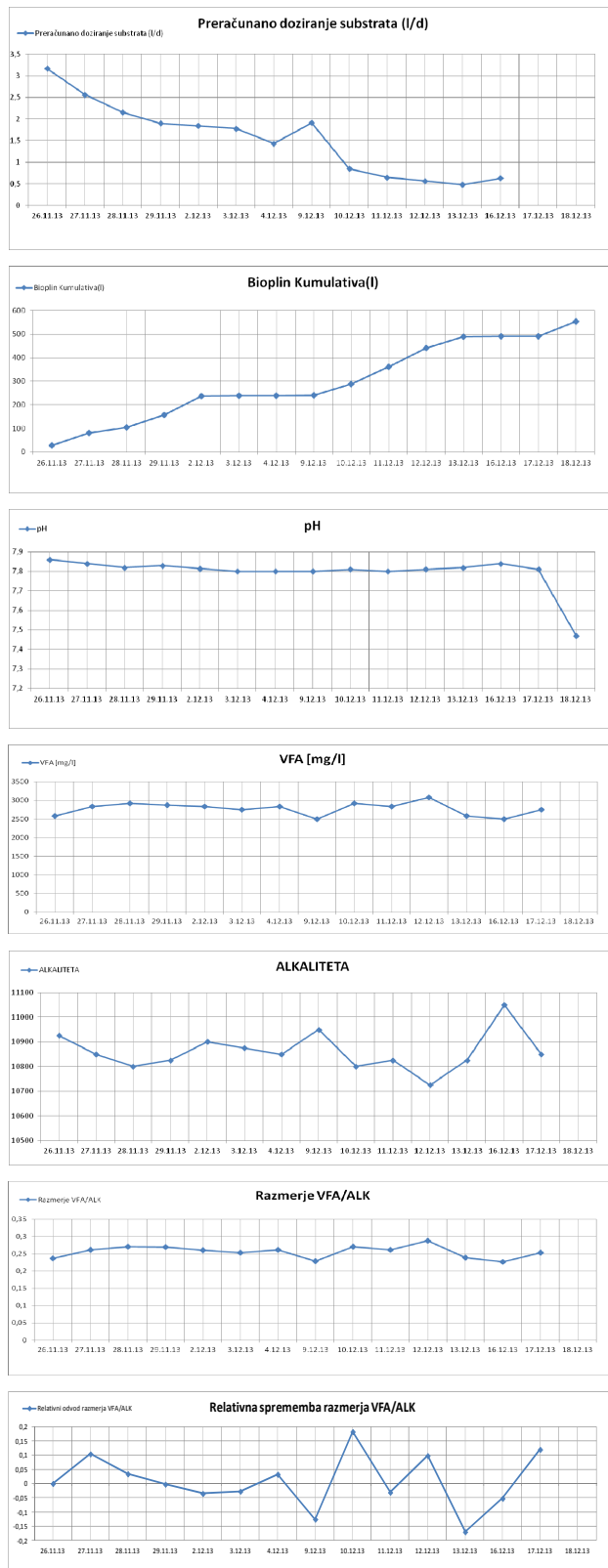
Mejno vrednost dnevne spremembe razmerja VFA/ALK smo nastavili na osnovi meritev na realnem fermentorju za obdobje zadnjih nekaj let. Predpostavili smo, da se razmerje VFA/ALK v enem dnevu lahko poveča za največ 90 %. Če je ta sprememba večja, obstaja nevarnost zastupitve fermentorja in doziranje se ustavi.

Najvišjo dovoljeno vrednost doziranja substrata smo nastavili na 5 % volumna fermentorja na dan. Vrednosti parametrov vodenja doziranja so podane v Tabeli 1, rezultati preizkusa delovanja predlaganega vodenja pa so prikazani na Sliki 4.

Tabela 1: Vrednosti parametrov vodenja doziranja.

Parameter	Vrednost
Želena vrednost razmerja VFA/ALK	0,25
Proporcionalno ojačenje	0.1 volumna fermentorja/d
Integracijska časovna konstanta	2 d
Maksimalna vrednost doziranja	5 % volumna fermentorja/d
Mejna vrednost relativne dnevne spremembe razmerja VFA/ALK	0,9
Čas vzorčenja	1 d

Predlagano vodenje drži razmerje VFA/ALK blizu zelene vrednosti. Doziranje se med preizkusom zmanjšuje, verjetno zaradi slabšanja sestave substrata.



Slika 4: Rezultati preizkusa vodenja pilotnega fermentorja. Od zgoraj navzdol: doziranje substrata, kumulativna proizvedenega bioplina, pH, VFA, ALK, razmerje VFA/ALK, relativna dnevna sprememba razmerja VFA/ALK.

Vodenje je nekoliko preveč konservativno v smislu proizvodnje bioplina, omogoča pa stabilno delovanje fermentorja.

Proizvodnjo bioplina bi lahko nekoliko povečali s povišanjem zelene vrednosti razmerja VFA/ALK. Pri tem pa je potrebno paziti, da se preveč ne približamo točki zastrupitve.

6 Zaključek

V prispevku je predstavljeno vodenje doziranja anaerobnega fermentorja, ki temelji na sprotni meritvi razmerja VFA/ALK v fermentorju in vzdrževanju tega razmerja na želeni vrednosti. Vodenje vsebuje PI regulator in zaščito pred predoziranjem, ki spremlja dnevno spremembo razmerja.

Vodenje smo preizkusili na pilotni napravi anaerobnega fermentorja pri doziranju realnih organskih odpadkov. Vodenje zagotavlja stabilno proizvodnjo bioplina ter preprečuje zastrupitev procesa.

Vodenje bi bilo mogoče izboljšati npr. z upoštevanjem kakovosti substrata in z optimizacijo zelene vrednosti razmerja VFA/ALK, kar bi omogočalo dodatno maksimizacijo proizvodnje bioplina.

7 Zahvala

Delo je bilo izvedeno v okviru Kompetenčnega centra za sodobne tehnologije vodenja. Center delno financirata Republika Slovenija, Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo ter Evropska unija (EU) - Evropski sklad za regionalni razvoj v okviru Operativnega programa krepitev regionalnih razvojnih potencialov za obdobje 2007 - 2013.

8 Literatura

[1] Steyer J.P., Bernard O., Batstone D.J. and Angelidaki I. (2006). Lessons learnt from 15 years

- of ICA in anaerobic digesters. *Water Science & Technology*, 53, 4-5, 25-33.
- [2] Estaben M., Polit M., Steyer J.P. (1997). Fuzzy control for an anaerobic digester. *Control Eng. Practice*, 5, 98, 1303-1310.
- [3] Steyer J.P., Buffière P., Rolland D., Moletta R. (1999). Advanced control of anaerobic digestion processes through disturbances monitoring. *Wat. Res.*, 33, 9, 2059-2068.
- [4] Bernard O., Polit M., Hadj-Sadok Z., Pengov V., Dochain D., Estaben M., Labat P. (2001). Advanced monitoring and control of anaerobic wastewater treatment plants: software sensors and controllers for an anaerobic digester. *Water Science & Technology*, 43, 7, 175-182.
- [5] Murnleitner E., Becker M.T., Delgado A. (2002). State detection and control of overloads in the anaerobic wastewater treatment using fuzzy logic. *Water Research*, 36, 201-211.
- [6] Liu J., Olsson G., Mattiasson B. (2004). Control of an anaerobic reactor towards maximum biogas production. *Water Science and Technology*, 50, 11, 189-198.
- [7] Liu J., Olsson G., Mattiasson B. (2006). Extremum-seeking with variable gain control for intensifying biogas production in anaerobic fermentation. *Water Science & Technology*, 53 4-5, 35-44.
- [8] Rodríguez J., Ruiz G., Molina F., Roca E., Lema J.M. (2006). A hydrogen-based variable-gain controller for anaerobic digestion processes. *Water Science & Technology* 54, 2, 57-62.
- [9] Boe K., Steyer J.P., Angelidaki I. (2008). Monitoring and control of the biogas process based on propionate concentration using online VFA measurement. *Water Science and Technology*, 57, 5, 661-666.
- [10] Molina F., Ruiz-Filippi G., Garcia C., Lema J.M., Roca E. (2009). Pilot-Scale Validation of a New Sensor for On-Line Analysis of Volatile Fatty Acids and Alkalinity in Anaerobic Wastewater Treatment Plants. *Environmental Engineering Science*. 26 (3), 1-9. *Water Science & Technology*, 61, 11, 2825-2834.
- [11] Alferes J., Irizar I. (2010). Combination of extremum-seeking algorithms with effective hydraulic handling of equalization tanks to control anaerobic digesters.
- [12] García-Diéguez C., Molina F., Roca E. (2011). Multi-objective cascade controller for an anaerobic digester. *Process Biochemistry*, 46, 900-909.
- [13] Olsson G., Newell B. (1999). *Wastewater treatment systems, modelling, diagnosis and control*. IWA Publishing, London.