

UTICAJ INDUSTRIJSKOG ZAGAĐENJA NA ANAEROBNU DIGESTIJU MULJA NA POSTROJENJU ZA PREČIŠĆAVANJE KOMUNALNIH OTPADNIH VODA

Nataša Stanojković, dipl.hem

JKP Vodovod Leskovac, natasa.stanojkovic@vodovodle.rs

Rezime: Anaerobna digestija mulja predstavlja ključni proces u postrojenjima za prečišćavanje otpadnih voda, koji omogućava stabilizaciju mulja i proizvodnju biogasa. Međutim, prisustvo industrijskih zagađivača u komunalnim otpadnim vodama može značajno narušiti stabilnost procesa. U ovom radu analiziran je uticaj industrijskog zagađenja, prvenstveno poreklom iz tekstilne industrije, na rad anaerobnog digestora. Analiza je sprovedena na osnovu operativnih podataka, uključujući alkalitet (ALK), isparljive masne kiseline (VFA) i odnos VFA/ALK kao indikatora stabilnosti procesa. Rezultati ukazuju na inhibiciju metanogene aktivnosti usled prisustva toksičnih jedinjenja karakterističnih za tekstilne otpadne vode, kao što su sintetičke boje i surfaktanti. Kao posledica navedenog, zabeleženo je smanjenje efikasnosti proizvodnje biogasa. Nakon redukcije dotoka zagađenja, uočen je postepen oporavak sistema i ponovno uspostavljanje stabilnih uslova anaerobne digestije.

Ključne reči: anaerobna digestija; otpadne vode; mulj; industrijsko zagađenje; tekstilne otpadne vode; VFA; alkalitet; biogas

IMPACT OF INDUSTRIAL POLLUTION ON ANAEROBIC SLUDGE DIGESTION AT A MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT PLANT

Abstract: Anaerobic sludge digestion is a key process in wastewater treatment plants, enabling sludge stabilization and biogas production. However, the presence of industrial pollutants in municipal wastewater can significantly compromise process stability. This study investigates the impact of industrial contamination, primarily originating from textile industry discharges, on the performance of an anaerobic digester. The analysis is based on operational data, including alkalinity (ALK), volatile fatty acids (VFA), and the VFA/ALK ratio as a process stability indicator. The results indicate inhibition of methanogenic activity due to the presence of toxic compounds typically associated with textile wastewater, such as synthetic dyes and surfactants. Consequently, a reduction in biogas production efficiency was observed. Following a decrease in pollutant loading, a gradual recovery of the system was recorded, accompanied by the re-establishment of stable anaerobic digestion conditions.

Key words: anaerobic digestion; wastewater treatment; sewage sludge; industrial pollution; textile wastewater; VFA; alkalinity; biogas

UVOD

Postrojenja za prečišćavanje komunalnih otpadnih voda imaju ključnu ulogu u zaštiti životne sredine, pri čemu se tokom procesa generiše mulj koji se stabilizuje postupkom anaerobne digestije. Ovaj proces omogućava smanjenje zapremine mulja uz istovremenu proizvodnju biogasa kao obnovljivog izvora energije. Stabilnost anaerobne digestije u značajnoj meri zavisi od kvaliteta ulazne otpadne vode. U uslovima prisustva industrijskih ispusta u javnu kanalizacionu mrežu dolazi do unosa potencijalno toksičnih jedinjenja koja mogu narušiti mikrobiološku ravnotežu procesa. Industrijski zagađivači, posebno poreklom iz tekstilne industrije, mogu izazvati inhibiciju metanogene aktivnosti i smanjenje efikasnosti produkcije biogasa [3].

TEORIJSKI OKVIR

Anaerobna digestija predstavlja složen biološki proces razgradnje organske materije u odsustvu kiseonika, pri čemu dolazi do stabilizacije mulja i formiranja biogasa, čije su glavni komponente metan (CH_4) i ugljen-dioksid (CO_2). Proces se odvija kroz više međusobno povezanih faza, pri čemu se metanogeneza identifikuje kao najosetljivija i ključna faza za ukupnu efikasnost sistema [4].

Stabilnost anaerobne digestije uslovljena je ravnotežom između produkcije i potrošnje isparljivih masnih kiselina (VFA), kao i puferskim kapacitetom sistema izraženim kroz alkalitet [1]. Odnos VFA/ALK predstavlja široko prihvaćen indikator stabilnosti procesa, pri čemu povećanje ovog odnosa ukazuje na akumulaciju kiselina i potencijalnu inhibiciju metanogene aktivnosti.

Anaerobni mikroorganizmi, a posebno metanogene arheje, karakterišu se visokom osetljivošću na prisustvo toksičnih supstanci. Industrijski zagađivači mogu izazvati inhibiciju procesa delovanjem na enzimske sisteme ili narušavanjem ćelijske strukture mikroorganizama, čime je smanjena brzina konverzije VFA u metan [2].

Tekstilne otpadne vode sadrže specifične zagađujuće materije, uključujući sintetičke boje i surfaktante, koje ispoljavaju izražen inhibitorni efekat na metanogene mikroorganizme. Njihovo prisustvo dovodi do akumulacije VFA, smanjenja alkaliteta i destabilizacije procesa. Važna karakteristika ovakvih poremećaja jeste vremensko kašnjenje između unosa zagađenja i manifestacije negativnih efekata, usled postepenog narušavanja mikrobiološke aktivnosti, što može rezultovati naglom destabilizacijom sistema nakon perioda prividne stabilnosti.

METODOLOGIJA

Monitoring stabilnosti anaerobne digestije vršen je praćenjem odnosa

VFA/ALK, prema metodi koju su 1986. godine definisali Ripley i saradnici, a koja omogućava ranu detekciju destabilizacije procesa. Metod se zasniva na dvostrukoj titraciji: do pH 5,75 za određivanje parcijalnog alkaliteta (bikarbonatni pufer) i do pH 4,3 za određivanje ukupnog alkaliteta povezanog sa isparljivim masnim kiselinama. Odnos ovih vrednosti korišćen je kao indikator stabilnosti procesa, pri čemu vrednosti iznad 0,3 ukazuju na početnu destabilizaciju, dok vrednosti iznad 0,4 označavaju ozbiljan poremećaj procesa [1,5].

Podaci korišćeni u radu prikupljeni su u okviru redovnog operativnog monitoringa na komunalnom postrojenju za prečišćavanje otpadnih voda u Leskovcu. Parametri VFA i alkaliteta praćeni su na dnevnom nivou, dok su za potrebe analize prikazane mesečne srednje vrednosti.

REZULTATI I DISKUSIJA

U prvih šest meseci 2025. godine digester je radio u stabilnom režimu, što potvrđuju niske vrednosti odnosa VFA/ALK u opsegu 0,12–0,15 (Tabela 1). Ove vrednosti ukazuju na uspostavljenu ravnotežu između acidogene i metanogene faze, kao i na efikasnu konverziju isparljivih masnih kiselina u metan, što je u skladu sa referentnim vrednostima za stabilan rad anaerobne digestije [1].

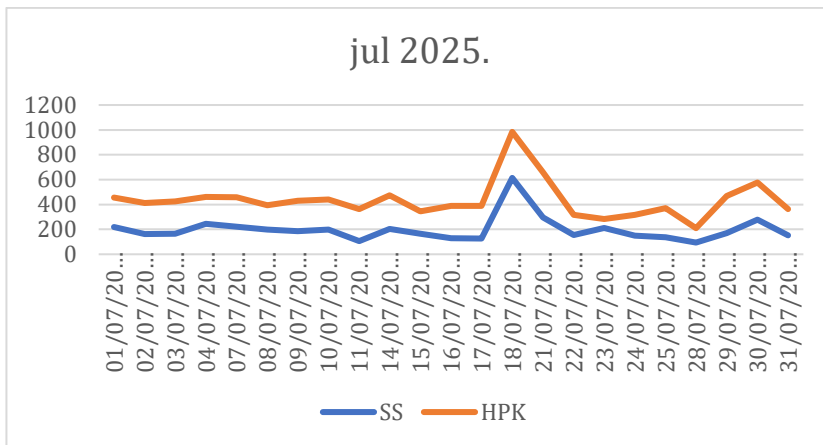
Tabela 1. Mesečne promene alkaliteta i VFA u toku godine
Table 1. Monthly changes in alkalinity and VFA during the year

Mes.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
VFA	317	321	311	282	266	252	286	288	333	305	228	183
ALK	2058	2116	2089	2259	2241	2170	1989	1650	1455	1648	1825	1743
VFA/ ALK	0,15	0,15	0,15	0,12	0,12	0,12	0,15	0,18	0,23	0,19	0,12	0,11

Sredinom jula 2025. godine (u periodu od petka, 18.07. do ponedeljka, 21.07.), na ulazu u postrojenje registrovan je dotok otpadne vode sa povišenim organskim i suspendovanim opterećenjem. Izmerena vrednost hemijske potrošnje kiseonika (HPK) iznosila je 984 mgO₂/dm³, dok je koncentracija suspendovanih materija bila 614 mg/dm³, što značajno premašuje projektovane vrednosti (500 mgO₂/dm³ i 295 mg/dm³).

U kontrolnom merenju, izvršenom u ponedeljak, 21.07., registrovane su i dalje

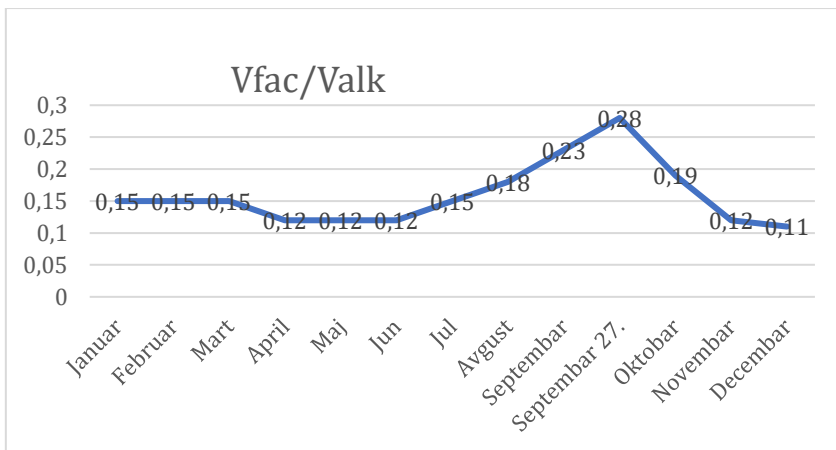
povišene koncentracije (HPK: 658 mgO₂/dm³; suspendovane materije: 296 mg/dm³), što ukazuje na produženo trajanje hidrauličkog i organskog opterećenja sistema, kao i na izostanak brzog povratka u projektovane operativne uslove.



Grafik 1. Prikaz ulaska hemijskog zagađenja
Graph 1. Presentation of the entry of chemical pollution

Ovakvo produženo opterećenje identifikovano je kao inicijalni poremećaj koji je prethodio promenama u stabilnosti anaerobne digestije. U periodu nakon incidentnog opterećenja uočene su prve promene u ključnim parametrima stabilnosti procesa. Krajem jula i početkom avgusta registrovano je povećanje koncentracije isparljivih masnih kiselina (VFA), praćeno istovremenim smanjenjem alkaliteta, što je rezultovalo porastom odnosa VFA/ALK sa 0,15 na 0,18. Navedene promene ukazuju na početno narušavanje ravnoteže između produkcije i potrošnje kiselina u okviru anaerobnog procesa.

Tokom avgusta i septembra evidentirana je izražena destabilizacija procesa. Koncentracija VFA dostigla je maksimalnu vrednost od 406 mg/L, dok je istovremeno zabeleženo značajno smanjenje alkaliteta, što je imalo za posledicu povećanje odnosa VFA/ALK na maksimalnu vrednost od 0,28, registrovanu 27.09. (Grafik 2). Ovi rezultati ukazuju na progresivnu akumulaciju organskih kiselina i smanjenu sposobnost sistema za njihovu efikasnu neutralizaciju i konverziju.



Grafik 2 – VFA/ALK odnos kroz vreme
Graph 2 - VFA/ALK relationship over time

Istovremeno je registrovano značajno povećanje koncentracije vodonik-sulfida (H_2S), pri čemu su izmerene vrednosti bile u opsegu od 300 do 500 ppm, dok se uobičajene koncentracije kreću u intervalu od 50 do 100 ppm. Maksimalna vrednost od 500 ppm zabeležena je 02.09.

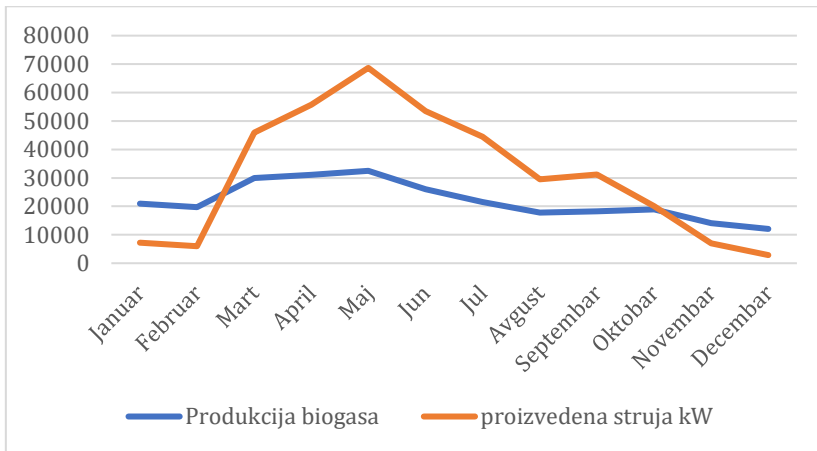
Povišene koncentracije H_2S ukazuju na intenziviranje aktivnosti sulfat-redukujućih bakterija (SRB), čime se dodatno potvrđuje izražen poremećaj u radu digestora. Uticaj povišenih koncentracija H_2S na proces metanogeneze manifestuje se kroz dvostruki mehanizam inhibicije. S jedne strane, dolazi do kompeticije za ključne supstrate (molekularni vodonik, H_2 , i acetatni jon), pri čemu SRB, kao termodinamički i kinetički efikasnije, brže troše raspoložive resurse, što za posledicu ima smanjenje stope produkcije metana. S druge strane, izražena je direktna celularna toksičnost, budući da nedisovani oblik H_2S difunduje kroz ćelijsku membranu metanogenih arheja, uzrokujući denaturaciju proteina i inhibiciju intracelularnih metaboličkih puteva [2, 3].

Kao posledica navedenih poremećaja, došlo je do smanjenja efikasnosti konverzije intermedijarnih produkata u metan, što se direktno odrazilo na pad produkcije biogasa. Ova uzročno-posledična veza potvrđuje da je destabilizacija procesa bila dominantno kontrolisana inhibicijom metanogene faze, indukovanom kombinovanim efektom akumulacije VFA i povećane koncentracije H_2S .

Pored narušavanja mikrobiološke stabilnosti anaerobne digestije, evidentiran je i značajan pad energetskog učinka sistema. Smanjenje produkcije biogasa, registrovano tokom septembra (za 44% u odnosu na maksimalne vrednosti zabeležene

u maju), reflektovalo se na rad kogenerativne jedinice i posledično na proizvodnju električne energije.

U stabilnom operativnom periodu proizvodnja električne energije iznosila je približno 70.000 kWh (Grafik 3), dok je u avgustu zabeležen pad na 29.534 kWh, što predstavlja smanjenje od približno 57%. U oktobru je proizvodnja dodatno opala na 19.995 kWh, odnosno za oko 71% u odnosu na referentni period. Ovi rezultati jasno ukazuju na značajno smanjenje energetske efikasnosti sistema usled destabilizacije procesa anaerobne digestije



Grafik 3. Godišnja proizvodnja biogasa i električne energije
Graph 3. Annual production of biogas and electricity

U poslednjem kvartalu zabeležen je postepen oporavak sistema, što je potvrđeno smanjenjem koncentracije isparljivih masnih kiselina (VFA), povećanjem alkaliteta i smanjenjem odnosa VFA/ALK na vrednosti ispod 0,15.

Međutim, izostanak korelacije između mikrobiološkog oporavka i produkcije biogasa tokom zimskog perioda pripisan je hidrauličkom razblaženju efluenta, uzrokovanom infiltracijom podzemnih voda i povećanim dotokom atmosferskih voda. Ovi faktori dovode do smanjenja specifičnog organskog opterećenja digestora, čime se ograničava potencijal za generisanje biogasa uprkos stabilizaciji mikrobiološke aktivnosti.

ZAKLJUČAK

Destabilizacija procesa praćena je direktnim negativnim posledicama po operativnu i energetske efikasnost postrojenja. Rezultatima sprovedene analize

potvrđeno je da industrijska opterećenja, posebno ona poreklom iz tekstilne industrije, značajno narušavaju stabilnost anaerobne digestije mulja.

Analizom vremenske dinamike promena utvrđeno je postojanje vremenskog kašnjenja između pojave incidentnog opterećenja i potpune destabilizacije procesa, što ukazuje na kumulativni, odnosno hronični efekat toksičnih jedinjenja na metanogene mikroorganizme. Navedeni efekat manifestuje se povećanjem koncentracije isparljivih masnih kiselina (VFA), smanjenjem alkaliteta, porastom odnosa VFA/ALK, kao i značajnim povećanjem koncentracije vodonik-sulfida (H_2S).

Dobijeni rezultati ukazuju da je stabilnost anaerobne digestije u velikoj meri zavisna od kontrole industrijskih ulaza u kanalizacioni sistem, pri čemu se kao posebno kritični identifikuju tekstilni ispusti. Takođe, naglašava se potreba za implementacijom sistema ranog upozorenja u cilju pravovremenog reagovanja i unapređenja upravljanja procesom.

LITERATURA

1. Appels, L. et al. (2008). Principles and potential of anaerobic digestion of waste-activated sludge
2. Chen, Y., Cheng, J.J., Creamer, K.S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process
3. Metcalf & Eddy (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery
4. Rajeshwari, K.V. et al. (2000). Anaerobic digestion of industrial wastewater
5. Ripley, L.E. et al. (1986). Monitoring anaerobic digestion process stability