

# Anaerobna digestija i kogeneracija u procesu prečišćavanja otpadnih voda

## REZIME

Jedan od problema tretmana otpadnih voda je odlaganje mulja koje učestvuje u ceni operacionih troškova i do 50%. Rešenje ovog problema je anaerobna digestija koja ima sposobnost da pretvara organsku materiju u biogas (sa 60-70% metana;  $CH_4$ ) i, takođe, da redukuje količinu finalnog obrađenog mulja - digestata za odlaganje. Zbog toga, anaerobna digestija optimizuje troškove tretmana otpadnih voda, njen uticaj na životnu sredinu i smatra se glavnim i suštinskim delom modernog postrojenja za tretman otpadnih voda. Da bi se poboljšao proces digestije i povećala proizvodnja biogasa u anaerobnim digestorima, mogu se primeniti različite vrste predtretmana. Koristeći proces kogeneracije, proizvedeni biogas iz digestora se može koristiti za proizvodnju električne energije (za prodaju elektro-distribucionoj kompaniji po povlašćenoj ceni ili za snabdevanje sopstvenog postrojenja i obližnjih potrošača) i/ili toplotne energije (za zagrevanje digestora ili toplifikacije obližnjih domaćinstava i staklenih bašti). Kogeneracija je ekološki vrlo prihvatljiva, zato što se u toku procesa ne ispušta metan u atmosferu.

U Republici Srbiji zakonska regulativa o obradi i upotrebi kanalizacionih muljeva praktično ne postoji. U Evropskoj Uniji Direktiva o kanalizacionom mulju 86/278/EEC propisuje načine korišćenja stabilizovanog mulja i podstiče primenu mulja u poljoprivredi kao dodatka đubriva. Ipak, ograničenja u praksi dovela su do toga da se oko 60% mulja u EU i dalje odlaže na deponije ili spaljuje u specijalnim postrojenjima za spaljivanje mulja i otpada.

Samo nekoliko većih gradova imaju postrojenja u kojima se tretira mulj koji obezbeđuje dobijanje biogasa i koja imaju mogućnost za primenu kogeneracije. U šumadijskom okrugu se dnevno proizvede 2.000  $m^3$  gasa što je značajan potencijal za primenu kogeneracije. U radu je analiziran grad Kragujevac sa apektom mogućnosti uvođenja kogeneracije u Centralno postrojenje za tretman otpadnih voda. Urađen je proračun, 3D model i tehnico-ekonomska analiza primene kogeneracije u datom postrojenju za tretman otpadnih voda.

**Ključne reči:** digestija, kogeneracija, tretman otpadnih voda

## ANAEROBIC DIGESTION AND COGENERATION SYSTEM IN THE WASTEWATER TREATMENT PLANT

## ABSTRACT

*One of the problems in wastewater treatment is sludge disposal which participates up to 50% in operating costs. The solution to this problem is anaerobic digestion, which has the ability to convert organic matter into biogas (with 60-70% methane -  $CH_4$ ) and also to reduce the amount of the final treated sludge - disposal of digestate. Therefore, the anaerobic digestion optimizes wastewater treatment costs, its impact on the environment, and it is considered as a major and essential part of modern plants for wastewater treatment. In order to improve digestion process and increase the production of biogas, different types of pretreatment technologies can be applied. Using cogeneration, biogas produced by digester can be used in electricity production (to be sold to distributional electric company at a discount price or to supply their equipment and nearby consumers) and/or thermal energy (for heating the digester or nearby households and greenhouses). Cogeneration is environmentally friendly because the process does not release methane into the atmosphere.*

*In Republic of Serbia, the legislative on the use of sewage sludge is practically non existant. In the European Union, Directive 86/278/EEC on sewage sludge prescribes possible use of stabilized sludge and encourages the use of sludge in agriculture as a fertilizer supplement. However, practical limitations have led to the fact that about 60% of sludge in the EU is still disposed on landfills or incinerated in special plants for incineration of sludge and waste.*

*Only a few major cities have plants for treating sludge that provide biogas and therefore have potential application of cogeneration. In Sumadija region, 2.000 m<sup>3</sup> of gas is produced each day which represents significant potential for cogeneration application. In this paper the city of Kragujevac was analyzed from the aspect of the possibility of using cogeneration plant in the Central wastewater treatment plant. Calculation, 3D model and techno-economic analysis of cogeneration implementation in already mentioned wastewater treatment plant were made and presented in the paper.*

**Key words:** digestion, cogeneration, wastewater treatment

## 1. UVOD

Energetska kriza ranih 70-ih godina prošlog veka rezultirala je porastom svesti o korišćenju obnovljivih izvora energije, uključujući i biogas iz anaerobne digestije. Zanimanje za upotrebu biogasa povećalo se zbog globalnih npora usmerenih na zamenu fosilnih goriva obnovljivim izvorima, te traženja ekološki prihvatljivog rešenja za obradu organskog otpada. Korišćenjem anaerobnih digestora smanjuje se pritisak na deponije i emisiju gasova koji izazivaju efekat staklene baštice.

U poređenju sa drugim biogorivima, biogas iz anaerobne digestije predstavlja važan prioritet u Evropskim direktivama koje predviđaju njegovo korišćenje u transportu i dobijanju energije. Biogas predstavlja jeftin obnovljiv izvor energije koji daje mogućnost prerade i recikliranja raznih ostataka iz prerade otpadnih voda na održiv i ekološki prihvatljiv način. Istovremeno, biogas sa sobom povlači i nekoliko socio-ekonomskih koristi za društvo, kao celinu, ali i za investitore uključene u njegovu proizvodnju i iskorišćavanje. [1]

## 2. ULOGA DIGESTORA U PREČIŠĆAVANJU OTPADNIH VODA

Centralizovano prečišćavanje otpadnih voda naselja je dominantna praksa u svetu u oblasti prečišćavanja otpadnih voda. Njega sačinjavaju procesi prečišćavanja otpadnih voda naselja koncipirani kao procesi u koima se obrađuju sve otpadne vode koje dospevaju javnom kanalizacijom, sa poželjnim izuzetkom atmosferskih otpadnih voda, ukoliko je u naselju predviđena ili izgrađena posebna kanalizacija za tzv. atmosferske vode.

Anaerobna digestija je proces u kojem se kompleksna organska jedinjenja razgrađuju delovanjem različitih vrsta bakterija u anaerobnim uslovima (bez prisustva kiseonika). Kod biogasnih postrojenja, rezultati anaerobne digestije su biogas i digestat. U slučajevima kada se za proces anaerobne digestije koristi homogena mešavina iz dva ili više različita supstrata (kao na primer gnojnica i organski otpad iz prehrambene industrije), postupak se naziva kodigestija.

Anaerobna digestija se primenjuje radi stabilizacije i smanjenja konačne količine otpadnog mulja.

Tehnologija tretiranja otpadnih muljeva anaerobnom digestijom danas je veoma razvijena. Zavisno od nacionalnih propisa i prioriteta, u zemljama EU se od 30 do 70 % otpadnih muljeva obrađuje postupkom anaerobne digestije. Tečni ostatak se može koristiti kao dubrivo na poljoprivrednim površinama ili za proizvodnju energije spaljivanjem. U nekim zemljama muljevi se odlažu na odlagališta otpada. Ovakva praksa negativno utiče na životnu sredinu jer dolazi do procedivanja hranljivih materija u podzemne vode i emisije zagađujućih materija u atmosferu, te je stoga zabranjena u većini Evropskih zemalja. [1]

Proces nastanka biogasa rezultat je niza povezanih procesnih koraka tokom kojih se inicijalni supstrat razlaže na sve jednostavnije spojeve, sve do nastanka biogasa. U pojedinim fazama proizvodnje biogasa deluju specifične grupe mikroorganizma. Biogas dobijen anaerobnom digestijom organskih otpadnih materija spada u grupu gorivih gasova. Sastav i osobine biogasa menjaju se u zavisnosti od vrste polaznog materijala (biomase) i od tehnoloških uslova za vreme procesa digestije. Analize toplotne moći biogasa se donekle razlikuju od autora do autora, ali se uglavnom kreću oko 20 MJ/m<sup>3</sup>. Toplotna moć biogasa može se povećati ukoliko se odstrani ugnjen-dioksid (CO<sub>2</sub>). Takođe, dobro je odstraniti i vlagu iz biogasa, tj. osušiti ga. Sušenjem biogasa vodonik-sulfid (H<sub>2</sub>S) koji se u njemu nalazi prestaje da bude korozivan, ali zadržava i dalje svoj karakterističan upozoravajući miris.

Efikasnost anaerobne digestije zavisi od nekoliko ključnih parametara, pa je vrlo važno osigurati optimalne uslove za razvoj anaerobnih mikroorganizama. Na njihov rast i aktivnost utiče nedostatak kiseonika, temperatura, pH vrednost, snabdevenost hranljivim materijama, intenzitet mešanja kao i prisutnost inhibitora. Metanske bakterije strogi su anaerobi i zato se mora sprečiti svaki dotok kiseonika u digestor.

Dužina trajanja postupka anaerobne digestije u direktnoj je vezi s temperaturom na kojoj se postupak odvija. Stabilnost temperature je ključna za anaerobnu digestiju. U praksi radna temperatura se bira prema vrsti supstrata, a neophodna temperatura se održava putem podnih ili zidnih sistema grejanja unutar digestora (Tabela 1).

**Tabela 1. - Temperatura i dužina trajanja procesa**

Temperaturna zona	Procesne temperature	Minimalno vreme trajanja procesa
Psihofilno	< 20 °C	70 do 80 dana
Mezofilno	30 do 42 °C	30 do 40 dana
Termofilno	43 do 55 °C	15 do 20 dana

### 3. RADNI PARAMETRI DIGESTORA

Biogasna postrojenja se grade prema ekonomskim i tehnološkim parametrima. Za maksimalni prihod biogasa, dobijen potpunom digestijom supstrata potrebno je dugo vreme hidrauličkog zadržavanja i odgovarajuća veličina digestora. U praksi se izbor sistema za digestiju (veličina i tip digestora) temelji na kompromisu između maksimalnog prinosa biogasa i opravdanog ulaganja u postrojenje. [2] U tom smislu unos organske materije je važan radni parametar koji pokazuje koliko suve organske materije može biti unešeno u digestor, po zapremini i u jedinici vremena, što je iskazano u sledećoj jednačini:

$$BR = m \cdot c / VR \quad (1)$$

gde je:

BR - unos organske materije [kg/d·m<sup>3</sup>]  
m - masa supstrata unošena po jedinici vremena [kg/d]

c - sadržaj organske materije [%]

VR - zapremina digestora [m<sup>3</sup>]

Još jedan važan parametar za dimenzioniranje digestora je vreme hidrauličkog zadržavanja (VHR). Vreme hidrauličkog zadržavanja je prosečni vremenski interval zadržavanja supstrata u digestoru. VHR ([dan]) je u korelaciji sa zapreminom digestora (VR, [m<sup>3</sup>]) i zapreminom supstrata (V, [m<sup>3</sup>/d]) unesenog u jedinci vremena, a može se izračunati prema sledećoj jednačini:

$$VHR = VR / V \quad (2)$$

Vreme zadržavanja sadržaja u digestoru mora biti dovoljno dugo kako bi se osiguralo da je količina bakterija iznesenih obrađenim ostatkom (digestatom)

manja od novonastalih bakterija (koje se nalaze u delu supstrata koji ostaje u digestoru). Uobičajeno vreme potrebno za razmnožavanje bakterija je 10 ili više dana. Kratko vreme zadržavanja u digestoru omogućava preradu veće količine supstrata, ali rezultira manjim prinosom gase. Stoga je neophodno prilagoditi vreme hidrauličkog zadržavanja specifičnom stepenu razgradnje korišćenog supstrata. Ukoliko se zna ciljno vreme hidrauličkog zadržavanja, dnevni unos supstrata i vreme potrebno za njegovu razgradnju, moguće je izračunati potrebnu zapreminu digestora.

### 4. PROJEKTOVANJE DIGESTORA

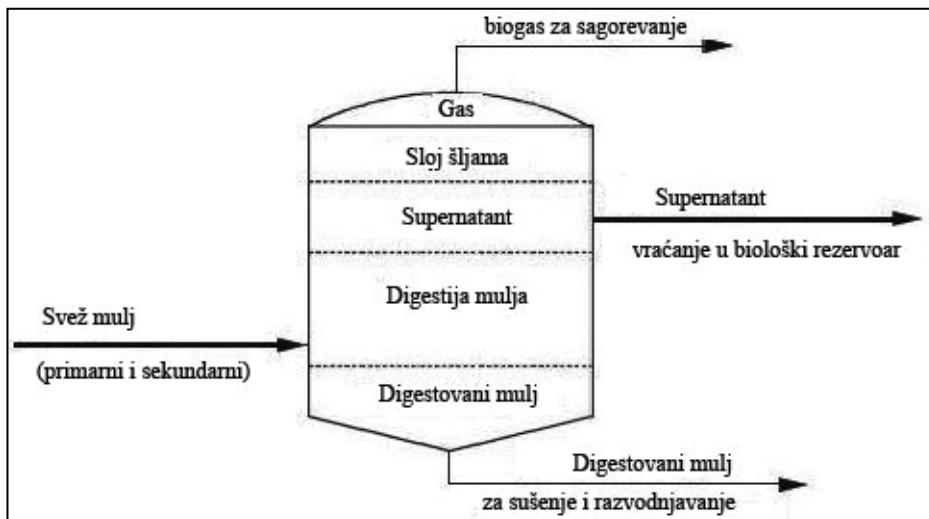
Pri projektovanju digestora posmatrano je Centralno postrojenje za tretman otpadnih voda u Cvetojevcu u okolini Kragujevca koje je projektovano za 125.000 ES. Na ulazu u digestor stiže 25.000 kg/dan svežeg mulja, tj. godišnje 9.125 t. Mulj ima gustinu od 1.012 kg/m<sup>3</sup> (mulj još uvek ima veliki procenat vode u sebi, gustine neznatno veće od gustine vode). Za proizvodnju biogasa najvažniji je organski deo mulja, koji se anaerobnom obradom pretvara u biogas. Uobičajena smanjenja volatilnih suvih materija u digestorima je od 50 – 60 %.

Frakcija čestica koje se prevedu u drugi oblik (tj. ispare) je 55% odnosno 13.750 kg/dan. Neorganski ostatak sačinjava 11.250 kg/dan, a u digestor dolazi 6% mulj ili:

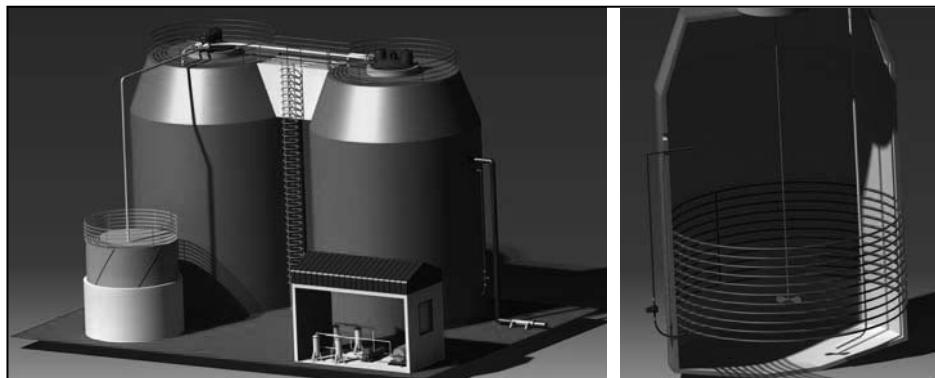
$$\frac{11250 \frac{\text{kg}}{\text{dan}} \cdot 0,001 \frac{\text{t}}{\text{kg}}}{0,06 \frac{\text{t}}{\text{m}^3}} = 187,5 \frac{\text{m}^3}{\text{dan}}$$

Vreme hidrauličkog zadržavanja umnogome zavisi od temperature, izbora mešanja supstrata u digestoru i od toga da li je primenjeno predgrevanje mulja. Svi ovi parametri u optimalnim uslovima pospešuju proizvodnju biogasa, a samim tim i smanjuju hidrauličko vreme zadržavanja mulja u digestoru.

Digestor radi u mezofilnom režimu, sa radnom temperaturom mulja od 33 – 38 °C. Primjenjuje se kombinovano mešanje, što podrazumeva mehaničko mešanje, recirkulaciju mulja i recirkulisanje biogasa. Za dodatno zagrevanje koristi se eksterni razmenjivač toplove (naročito u zimskom periodu). Unutrašnje zagrevanje digestora se vrši toplovodnim cevima postavljenim po obodu digestora (slika 2). Unutrašnji zid digestora je čelične konstrukcije. Zatim sledi sloj izolacije od mineralne vune, koji je prekriven presavijenim čeličnim limom. 3D model datog po-



Slika 1. - Jednostepeni anaerobni digestor sa slojem mulja [3]



Slika 2. - Postrojenje za proizvodnju biogasa iz otpadnih voda

strojenja za tretman otpadnih voda (*slika 2*) urađen je u programskom paketu DASSAULT SYSTEMS - CATAIA V5R16.

Potrebno vreme hidrauličkog zadržavanja je 24 dana. Pošto se koristi dvostepena digestija, potrebna

i za proizvodnju biogasa iz različitih supstrata, bilo da je u pitanju samo jedna vrsta supstrata, ili mešavina više različitih.

Od potrebnih podataka za rad programa koriste se:

- Izbor supstrata,
- Količina supstrata na godišnjem nivou,
- Izbor primjenjenog kogeneracijskog motora.

Program proračunava unešene podatke, i daje izlazne vrednosti (*slika 4*):

- ✓ Potrebnu zapreminu digestora,
- ✓ Količinu proizvodnje gase,
- ✓ Efikasnost kogeneracijskog postrojenja,
- ✓ Proizvodnju električne i toplotne energije,
- ✓ Prihod od prodaje proizvedene električne struje,
- ✓ Vrednost investicije,
- ✓ Ukupan godišnji prihod.

Sve dobijene podatke moguće je ekstraktovati u Excel dokument.

Efikasnost kogeneracijskog postrojenja je 30% za dobijanje termalne i 36% za dobijanje električne energije. Te vrednosti se mogu povećati, u zavisnosti od izabranog gasnog motora. Povećanjem efikasnosti gasnog motora, povećavaju se ukupni prihodi kogeneracijskog postrojenja. Vrednost subvencionisanog kWh proizvedenog kogeneracijom je 6,7 c€/kWh, a cenu kWh proizvedenog konvencionalnim putem, kao i cenu radnog časa treba smanjiti, tj. prilagoditi vrednostima koje se primenjuju u Srbiji. [5]

Za rad postrojenja koristi se „Jenbacher\_ov“ motor: J420 GS, snage 40 kW, sa električnim stepenom korisnosti od 40,6%, i termičkim stepenom korisnosti od 44,5%. Postrojenje proizvodi 804,825 kW energije iz metana, pa se

no.	name	amount	t/unit	amount in t
1	Sewage sludge	9,125.00	1.00	9,125.00

Slika 3. - Unošenje ulaznih podataka u „biogas kalkulator“ za proračun proizvodnje biogasa i ostalih radnih parametara [4]

general information	CHP efficiency	initial data
digestor size and storage demand	electrical 40 % thermal 45 %	total weight of the material: 9,125.00 engine type: gas engine engine power: 40kW
digestor: hydraulic retention time [days]: 24 required working digestor volume [m³]: 600.00 volume load (kg org DM/m³): 1.17 DM content of input mix: 4.00%	energy production	date: 03/09/2012
required storage volume: total input [t/a]: 9,125.00 mass loss (<15 kg/m³ BOD): -167.67 balance [t/a]: 8,957.33 Volume for 6 month storage: 4,476.66	electrical efficiency: Η <sub>el</sub> =40% total electricity production [kWh]: 321,930.00 electricity sales [kWh]: 321,930.00	
gas utilisation	thermal energy: Η <sub>th</sub> =45% heat demand BOP [kWh]: 362,171.25 heat sales [kWh]: 362,171.25 Surplus heat[kWh]: 72,434.25 299,737.00	investment costs
gas amount [m³/a]: 134,137.50 methane content [%]: 60.00% methane energy content [kWh]: 80,482.50 methane energy price [kWh]: 804,625.00 continuous power output biogas [kW]: 37 resulting full load hours [h/a]: 8048 corresponding load (CHP): 22 corresponding load (%): 91.87%	income from electricity sales	total cost of plant: 120,000.00€ running costs: interest 12% (6.50%): 3,900.00€ maintenance, repair (2.00%): 2,400.00€ maintenance CHP (1.00%kWh): 3,219.30€ insurance (0.50%): 600.00€ labour costs (4.0h/d): 4,300.00€ substrate costs: 0.00€ costs ignition oil: 0.00€
income from electricity sales	total income electricity sales: 20,764.49€ thermal energy: 14,480.85€ fertiliser value (10.00/t N): 0.00€	
total income:	35,251.34€	
annual income:	8,752.04€	

Slika 4. - Izlazni parametri vezani za rad kogeneracijskog postrojenja

dobija da se proizvede 321.930 kWh električne energije. Termički stepen korisnosti je nešto viši, 45%, pa je proizvodnja toplotne energije 362.171,25 kWh. Od te vrednosti se oduzima 20% za grijanje sopstvenog postrojenja, pa preostaje 289.737 kWh za prodaju.

Subvencionisana prodajna cena električne energije je 6,7 s€/kWh [5], pa je prihod od prodaje električne energije distributivnoj mreži 21.569,31 €. Kada se od te vrednosti oduzme 804,83 € za napajanje postrojenja, preostaje prihod od 20.764,49 € godišnje.

Ukupna vrednost investicije za ovakvo postrojenje, pod opisanim uslovima je 120.000 €. Ukupna godišnja dobit se dobija kada se od godišnjeg prihoda od prodaje električne i toplotne energije oduzmu godišnji troškovi postrojenja koji iznose 26.499 €, pa je ukupna dobit postrojenja na godišnjem nivou 8.752 €.

## 5. ZAKLJUČAK

Potrošnja energije je u porastu, pa će uskoro biti potrebni novi izvori za proizvodnju električne i toplotne energije, kako u sektoru industrije tako i u opštoj potrošnji. Osnovna prednost kogeneracije je povećana iskoristivost energenata u odnosu na konvekcionalne elektrane koje služe samo za proizvodnju električne energije, kao i u odnosu na toplane koje služe samo za proizvodnju toplotne energije koja služi za tehnološke svrhe ili za proizvodnju tople vode. Primena kogeneracijskih postrojenja prvenstveno se razmatra zbog njihove velike efikasnosti, a samim tim postiže se velika ekonomska dobit.

Uzimajući u obzir da će vremenom zalihe konvencionalnih energenata biti sve manje i manje, kogeneracija iz otpadnih voda će biti neophodno rešenje.

Ukoliko u nekom većem gradu postoji reka sa velikim protokom (i velikim zagadenjem), postavljanje centralnog sistema za prečišćavanje otpadnih voda je ekonomski prihvatljivo i ekološki potrebno rešenje. Izgradnjom ovakvog postrojenja rešio bi se problem otpadnih voda.

Najveći problem izgradnje centralnog sistema za prečišćavanje otpadnih voda je visoka cena investicije. Prodajom proizvedene električne energije postrojenje ostvaruje prihod kojim se vrši povraćaj investicionih troškova, a po isteku perioda otplate, ostvaruje se potrebna dobit.

Proizvodnja i korišćenje biogasa iz anaerobne digestije ima pozitivan učinak na okolinu i društveno-ekonomske koristi za društvo u celini, tako i za same poljoprivrednike. Iskorišćavanje unutrašnjeg vrednognog lanca biogasa poboljšava lokalne ekonomske uslove i osigurava radna mesta u ruralnim područjima, te povećava kupovnu moć u regiji. Samim tim, poboljšava životni standard i doprinosi ekonomskom i socijalnom razvoju.

## 6. ZAHVALNICA

Ovaj rad je nastao kao rezultat istraživanja na projektu „ISTRAŽIVANJE KOGENERACIONIH

POTENCIJALA U KOMUNALNIM I INDUSTRIJSKIM ENEREGANAMA REPUBLIKE SRBIJE I MOGUĆNOSTI ZA REVITALIZACIJU POSTOJEĆIH I GRADNJU NOVIH KOGENERACIONIH POSTROJENJA (III 42013)“ koje je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

## 7. LITERATURA

- [1] Seadi T. Al: Priručnik za biopljin, Zagreb, 2008.
- [2] Martinov M.: Studija o proceni ukupnih potencijala i mogućnostima proizvodnje i korišćenja biogasa na teritoriji AP Vojvodine, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2011.
- [3] Haandel A., Lubbe J.: Handbook Biological Wastewater Treatment, Quist Publishing, 2007. ISBN 978-98-77983-22-5
- [4] <http://www.biogascalculator.wfgsha.de/> (pristupljeno 07.01.2013.)
- [5] Službeni glasnik RS, broj 84/04, Uredba o merama podsticaja za proizvodnju električne energije korišćenjem obnovljivih izvora energije i kombinovanom proizvodnjom električne i toplotne energije