



Photo 004. Boat in Nurkovcu / Čamac u Nurkovcu

# VARIABLES IN A MODEL FOR YIELD OF BIOGAS DERIVED FROM BIOLOGICAL SUBSTRATES

## VARIJABLE U BILANCI PRINOSA BIOPLINA IZ BIOLOŠKIH SUPSTRATA

BALICEVIC, Pavo; KRALIK, Davor; KRAUS, Drazen; JOVICIC, Daria & MIHIC, ur ica

**Abstract:** *The design and planning of biogas plants producing biogas by anaerobic fermentation process requires an accurate biogas yield determination. In this paper we develop a model for determining the quantity of manufactured biogas and the corresponding thermal energy. For this, we start with experimental data on organic substance composition in a substrate, which is then combined with physico-chemical laws for the model development. Application of the model was illustrated on a mid-sized pig farm example.*

**Key words:** *biogas, renewable energy sources, biological substrate, anaerobic fermentation, waste.*

**Sažetak:** *U projektiranju postrojenja za proizvodnju bioplina anaerobnim procesom vrenja potrebno je odrediti prinos bioplina. U radu je, na temelju fizikalno-kemijskih zakona i eksperimentalnih podataka o sadržaju organske tvari u supstratu, razvijen model određivanja količine proizvedenog bioplina i odgovarajuće toplinske energije. Primjena modela ilustrirana je na primjeru farme srednje veličine za uzgoj svinja.*

**Ključne riječi:** *bioplin, obnovljivi izvori energije, biološki supstrat, anaerobno vrenje, otpad.*



**Authors' data:** Pavo, **Balicevic**, prof. dr.sc., Poljoprivredni fakultet Sveučilišta J.J. Strossmayera u Osijeku, Petra Sva i a 1d, Osijek, Pavo.Balicevic@pfos.hr; Davor, **Kralik**, prof. dr. sc., Poljoprivredni fakultet, Osijek, davor.kralik@pfos.hr; Dražen, **Kraus**, univ. bacc. meh., Osijek; Daria, **Jovicic**, dipl. ing., Poljoprivredni fakultet, Osijek, daria.jovicic@pfos.hr; ur ica, **Kovacic**, dipl. ing., Poljoprivredni fakultet, Osijek, Durdica.Mihic@pfos.hr.

## 1. Uvod

Ubrzani rast potražnje za energijom u svijetu i današnje globalno opredjeljenje javnosti za povećanje udjela uporabe ekološki čiste energetske tehnologije doveli su do intenzivnog istraživanja i korištenja obnovljivih izvora energije. Prema podacima Energetskog instituta „Hrvoje Požar“ u Hrvatskoj je u 2012. godini proizvedeno 510 GWh iz obnovljivih izvora energije, što čini 4,9 % ukupne proizvodnje električne energije, ako se izuzmu velike hidroelektrane.

Obnovljivi izvori energije, kao i konvencionalni, nisu jednako raspoređeni u svijetu. Neke zemlje posjeduju veliki hidro-potencijal, druge pak mogu koristiti energiju zračnu ili Sunca ili raspoloživa značajna potencijalima energije vjetera, energije morskih valova, plime i oseke, geotermalne energije i druge. Veći dio teritorija Republike Hrvatske veoma je bogat biljnom masom koja nakon primarne uporabe u stojarstvu, peradarskom, prehrambenom i drvno-prerađivačkoj industriji, daje značajne količine bio-razgradivog otpada. Prema podacima Agencije za zaštitu okoliša za 2011. godinu ukupna površina poljoprivrednog zemljišta zauzima 2 767 000 ha, od toga je 1 548 000 ha pod usjevima, a 1 219 000 ha su livade i pašnjaci. Ukupna površina šumskog zemljišta zauzima 2 688 688 ha (podatci Šumskogospodarske osnove RH), uz godišnji prirast od 10,5 milijuna m<sup>3</sup> drvene mase. Uz propisani etat (sjevačka drvena zaliha) od 6,6 milijuna m<sup>3</sup> dobiva se 1,5 milijuna m<sup>3</sup> šumske biomase kao nusproizvod. Ostaci stojarstva, ekskrementi stojarstva, proizvodnje, otpaci drvno-prerađivačke industrije i drugi biljni ostaci čine biomasu, koja čini veliki energetski potencijal za proizvodnju bioplina. Istraživanja pokazuju da se u područjima intenzivne poljoprivredne proizvodnje, kao što je Slavonija, samo iz takvih ostataka biljne mase i otpada u stojarstvu može proizvesti bioplin, koji se dalje može uporabiti kao visokovrijedni izvor energije, [1,2].

U projektiranju postrojenja za proizvodnju bioplina i procjeni energetske učinkovitosti postrojenja važno je pravilno odrediti količinu bioplina koja se može proizvesti iz raspoložive biomase. Na količinu proizvedenog bioplina utječu i fizički, kemijski i biološki čimbenici, kao i uvjeti vođenja procesa. Stoga se u ovom radu razvija model proračuna prinosa bioplina iz supstrata dobivenog bilo iz biljne mase, bilo iz stajnjaka domaćih životinja. Model je razvijen na temelju bilance organskih tvari u supstratu i kemijskih produkata u procesu digestije.

## 2. Bilanca proizvodnje bioplina iz organskih tvari

Tehnološki proces proizvodnje bioplina zasniva se na anaerobnom vrenju organskih tvari u kojem se odvija proces razlaganja organske materije otopljene u vodi na jednostavne tvari djelovanjem bakterija, bez prisutnosti kisika. Da bi se proces mogao odvijati moraju biti ostvareni odgovarajući uvjeti kao što su temperatura, tlak, kiselost (pH-vrijednost), omjer sadržaja ugljika i dušika u supstratu i drugi. Ovi uvjeti povezani su s vrstom bakterija, o čemu ovisi sastav plinova koje one proizvode. U različitim fazama procesa anaerobnog vrenja nastaju metan, ugljični dioksid, amonijak, vodik, alkoholi i drugi jednostavni spojevi. Na svršetku procesa digestije

dobiva se bioplin koji je smjesa metana ( $67 \div 75$  %) i uglji nog dioksida ( $25 \div 34$  %) s primjesama sumporovodika (1%) i tragovima kisika, dušika, vodika i uglji nog monoksida, [3].

Prinos bioplina uvjetovan je strukturom organske materije, a posebno sadržajem nerazgradivih tvari i omjerom sadržaja ugljika i dušika u sirovini. Povoljan omjer tih tvari u supstratu može se posti i miješanjem organskih tvari s razli itim udjelima navedenih elemenata. U tablici 1. dani su podatci o omjerima sadržaja ugljika i dušika u organskoj suhoj tvari (OST) za razli ite vrste biljnih sirovina, kao i drugi podaci koji su potrebni za projektiranje i vo enje procesa proizvodnje bioplina, prema [4] i [5]. Udio OST u stajnjaku doma ih životinja ovisi o na inu uzgoja, o klimatskim uvjetima u oborima, te o vrsti sirovine i uvjetima hranjenja. Stoga se rezultati provedenih istraživanja pojedinih autora razlikuju. Primjerice u supstratu ekskremenata svinja na individualnim farmama u op ini Jagodnjak ispitivanjem je utvr en prosje ni sadržaj 15,8 % OST [6]. Prosje ne vrijednosti za stajnjake doma ih životinja mogu se uzeti prema [5] i navedeni su u tablici 2. Miješanje sirovina za dobivanje supstrata može se vršiti bez obzira da li one potje u od biljnih kultura ili od stajnjaka doma ih životinja.

Vrsta poljoprivredne kulture	Udio OST u biljnoj masi, $p_k$ kg OST /kg	Sadržaj dušika u masi OST %	Omjer sadržaja ugljika i dušika u masi OST $x_C : x_N$	Prinos bioplina po masi OST, $b_k$ $m_n^3/kg$ OST
Alge	0,12	1,9	100 : 1	0,42 ÷ 0,50
Djetelina pokošena	0,25	1,8 ÷ 2,8	(17 ÷ 27) : 1	0,43 ÷ 0,52
Krumpir - otpad prerade	0,075	1,5	25 : 1	0,31 ÷ 0,54
Kukuruzovina (suha)	1,0	0,8	50 : 1	0,38 ÷ 0,46
Liš e še erne repe	0,25	1,0	50 : 1	0,40 ÷ 0,50
Nelegumno povr e	0,20	2,5 ÷ 4,0	(11 ÷ 19) : 1	0,33 ÷ 0,36
Piljevina suha	1,0	0,1	(200 ÷ 500) : 1	0,12 ÷ 0,30
Trava svježa	0,25	4,0	(12 ÷ 25) : 1	0,28 ÷ 0,55
Vodeni ljljan	0,22	1,5 ÷ 4,0	(10 ÷ 20) : 1	0,45 ÷ 0,70
Žitni ostaci - suhi	1,0	0,7 ÷ 1,1	(100 ÷ 150) : 1	0,2 ÷ 0,3

Tablica 1. Sadržaj tvari i prinos bioplina kod razli itih biljnih ostataka

Kod upotrebe ostataka poljoprivrednih kultura, kao sirovine za pripremu supstrata, posebnu pažnju treba posvetiti fazi pripreme supstrata prije ulaganja u digestor. Biljnu masu potrebno je dobro usitniti i pomiješati s vodom kako bi se dobio pravilan omjer suhe tvari i vode. Organska suha tvar treba biti zastupljena s masenim udjelom  $8 \div 12$  % u pripremljenom supstratu. Supstrat se dovodi u digestor bilo kontinuirano

bilo periodi no, ali s prosje nom proto nom brzinom koja odgovara proto noj brzini proizvodnje bioplina.

Supstrat za proizvodnju bioplina može potjecati od stajnjaka razli itih doma ih životinja. Kako razli ite vrste životinja imaju razli ite težine uvedeno je, za potrebe izra unavanja i uspore ivanja parametara proizvodnje bioplina, tzv. uvjetno grlo (UG). Uvjetno grlo ozna va ekvivalentan broj jedinki neke životinjske vrste koji ini ukupnu masu od 500 kg. Za odre enu vrstu, za koju se vrši analiza, utvr uje se prosje an broj grla koji odgovara navedenoj masi. Recipro na vrijednost tog broja nazvana je faktorom težine vrste - € i navedena je u tablici 3.

Vrsta doma e životinje	Dotok teku eg stajnjaka $m_s$ kg/danUG	Sadržaj OST u masi stajnjaka $p_s$ (%)	Sadržaj dušika u masi OST (%)	Omjer ugljika i dušika u OST $x_C : x_N$	Volumenski prinos bioplina, $b$ $m_n^3/kg_{OST}$
Goveda	29	11,0	1,7 ÷ 6,0	(17 ÷ 25) : 1	0,16 ÷ 0,32
Krave muzare	45	10,5	1,7 ÷ 6,0	(17 ÷ 25) : 1	0,18 ÷ 0,33
Koke nesilice	58	11,03	6,0 ÷ 6,5	(7 ÷ 15) : 1	0,31 ÷ 0,62
Konji	32	10,94	2,3	25 : 1	0,20 ÷ 0,30
Rasplodne krma e	30	12,0	3,8	(6 ÷ 12) : 1	0,34 ÷ 0,55
Ovce	28	11,07	3,8	33 : 1	0,09 ÷ 0,31
Pili i brojleri	48	10,62	6,3	15 : 1	0,30 ÷ 0,56
Svinje u tovu	26	11,54	3,8	(6 ÷ 13) : 1	0,30 ÷ 0,55

Tablica 2. Sadržaj tvari i prinos bioplina za stajnjake doma ih životinja

Vrsta životinje	Prosje na masa jedne životinje, kg / kom	Broj jedinki po uvjetnom grlu kom / UG	Faktor težine vrste, € UG / kom
Goveda u tovu	350	1,30 ÷ 1,70	0,7
Krave muzare	600	0,75 ÷ 0,90	1,2
Koke nesilice	2,25	200 ÷ 250	0,0045
Konji	250	1,7 ÷ 2,5	0,5
Rasplodne krma e	165	2,7 ÷ 3,4	0,33
Ovce	62,5	6 ÷ 9	0,125
Pili i brojleri	0,60	600 ÷ 840	0,0012
Svinje u tovu	60	6 ÷ 9	0,13

Tablica 3. Faktori za prera unavanje broja životinja u uvjetna grla

Prosje an dnevni dotok teku eg stajnjaka  $m_s$  i odgovaraju i postotni sadržaj organske suhe tvari  $p_s$  dani su u tablici 2. za stajnjake razli itih doma ih životinja.

Odgovaraju i dnevni dotok organske suhe tvari  $m_d$  (sveden na uvjetno grlo), dobiven iz stajnjaka i iznosi:

$$m_d = \frac{m_S \cdot p_S}{100} \text{ kg/dan UG.} \quad (1)$$

Prosječan dnevni prinos bioplina  $V_B$  iz stajnjaka ovisi o vrsti životinje, o faktoru težine vrste  $\epsilon$  i broju grla  $z$  na farmi:

$$V_B = b \cdot m_d \cdot z \cdot \epsilon \text{ m}_n^3/\text{dan} . \quad (2)$$

gdje je  $b$  - specifični volumenski prinos bioplina (po kilogramu organske suhe tvari) sadržane u stajnjaku određene životinjske vrste, a naveden je u tablici 2.

Dnevni dotok tekućeg stajnjaka izražen volumenski:

$$V_S = m_S \cdot z \cdot \epsilon / \dots_s \text{ m}^3/\text{dan} . \quad (3)$$

Gustoća tekućeg stajnjaka kreće se u granicama  $\dots_s = 1020 \div 1030 \text{ kg/m}^3$ .

Kod suhog stajnjaka postotni sadržaj organske suhe tvari iznosi u prosjeku oko 25÷30 % za konje i perad, a za sve ostale domaće životinje 20÷25 %.

Ukoliko se u digester ulažu biljni ostaci neke poljoprivredne kulture s dnevnim dotokom biljne mase  $m_k$  (kg/dan) tada se dnevni prinos bioplina izražava prema podacima iz tablice 1.:

$$V_B = m_k \cdot p_k \cdot b_k \text{ m}_n^3/\text{dan} . \quad (4)$$

Nadalje je prikazan primjer primjene navedenih izraza za individualnu farmu srednje veličine koja uzgaja  $z = 1000$  grla svinja i raspolaže sa suhom kukuruzovinom u količini od  $m_k = 1000 \text{ kg/dan}$  koja se dodaje u supstrat. Primjer ilustrira metodu procjene potencijala za proizvodnju vlastite energije na farmi izgradnjom bio-plinskih postrojenja. Prema podacima iz tablica 2 i 3 za svinje u tovu je  $m_S = 26$ ,  $\epsilon = 0,13$ ,  $p_S = 11,54 \%$ ,  $b = 0,425$ . Prema izrazu (3) dnevni dotok tekućeg stajnjaka tada iznosi:

$$V_S = 26 \cdot 1000 \cdot 0,13 / 1020 = 3,31 \text{ m}^3/\text{dan} . \quad (5)$$

gdje umnožak  $1000 \cdot 0,13 = 130$  predstavlja broj uvjetnih grla na farmi. Prema (1) dnevni dotok organske suhe tvari iz stajnjaka po uvjetnom grlu je:

$$m_d = 26 \cdot 11,54 / 100 = 3 \text{ kg/dan UG} . \quad (6)$$

Dnevni prinos bioplina koji nastaje od stajnjaka procesom digestije iz supstrata iznosi prema (2):

$$V_B' = 0,425 \cdot 3 \cdot 130 = 166 \text{ m}_n^3/\text{dan}. \quad (7)$$

Dalje, treba odrediti dnevni prinos bioplina koji nastaje od 1 tona kukuruzovine dodane u supstrat. Prema podacima iz tablice 2 za suhu kukuruzovinu je  $p_k = 1$ ,  $b_k = 0,42$ . Uvrštavanje u izraz (4) daje:

$$V_B'' = 1000 \cdot 1 \cdot 0,42 = 420 \text{ m}_n^3/\text{dan}. \quad (8)$$

Zbrajanjem vrijednosti (7) i (8) dobiva se ukupna dnevna proizvodnja bioplina u digestoru iz mješavine supstrata u količini od  $586 \text{ m}_n^3/\text{dan}$ .

Suvremeni kotlovi na plinovita goriva postižu pri nominalnom opterećenju stupanj iskorištenja 92-95 % kod standardne izvedbe, 95-98 % kod niskotemperaturnih kotlova te do 108 % kod kondenzacijskih kotlova [7]. Prosječni pogonski stupanj iskorištenja ovisi o omjeru pogonskog vremena rada i vremena čekanja, odnosno o uvjetima potrošnje toplinske energije i znatno je manji. Računajući s donjom ogrjevnom vrijednošću metana  $H_d = 36 \text{ MJ/m}^3$ , sadržajem metana u bioplinau 75 % i prosječnim stupnjem iskorištenja kotla od 95 % može se izgaranjem bioplina u plinskom kotlu proizvesti dnevno toplinska energija u iznosu:

$$Q = 0,95 \cdot 586 \cdot 36 \cdot 0,75 = 15\,031 \text{ MJ/dan}, \quad (9)$$

što računajući s 18 sati dnevne uključenosti sustava grijanja odgovara snazi kotla

$$P = 15\,031/64,8 = 232 \text{ kW}. \quad (10)$$

Potrošnja energije za potrebe odvijanja samog procesa i energije potrebne za pogon postrojenja nije ovdje uzeta u obzir jer ovisi o izvedbi procesa i mjerama poduzetim u cilju povećanja stupnja energetske učinkovitosti.

### 3. Zaključak

Rješavanje energetske potrebe bioplina veoma pogoduje farmama koje bi bile locirane u selima Slavonije i Baranje. Ovakva postrojenja doprinose zaštiti okoliša, zbrinjavanju otpada, a proizvode i vrlo kvalitetno prirodno gnojivo. Suvremena rješenja digestorskih postrojenja u kojima su bioplin konkurentnim ostalim primarnim energentima.

Izloženi model određivanja prinosa bioplina temelji se na eksperimentalnim podacima o sadržaju OST u određenom supstratu i iskustvenim vrijednostima o količini proizvedenog bioplina iz takve suhe tvari. Ovi podatci ovise i o uvjetima vođenja procesa digestije pa ih je za zadane uvjete i određenu vrstu supstrata

potrebno to no utvrditi eksperimentalnim ispitivanjima. Podatci navedeni u radu predstavljaju srednje vrijednosti i mogu poslužiti za približnu procjenu prilikom izrade idejnog projekta postrojenja. No izložena metoda prora una je univerzalna, neovisna o uvjetima vo enja procesa i pruža mogu nost jednostavne i brze procjene kapaciteta proizvodnje bioplina. Prikazani numeri ki primjer daje zornu predodžbu o koli ini proizvedenog bioplina i toplinskoj energiji koja se može dobiti izgaranjem bioplina u suvremenim kotlovima u usporedbi s raspoloživom koli inom ulaznog supstrata.

Proces digestije može se izvesti s vrlo visokim stupnjem iskorištenja kada je za zagrijavnje supstrata raspoloživa toplinska energija niskotemperaturnih izvora poput geotermalnih izvora tople vode, otpadne industrijske topline, solarne energije i sli no.

## 8. Literatura

- [1] Udovi i , B. (2002). *Energetika i okoliš u globalizaciji*, Udovi i , ISBN 953-97998-2-1, Zagreb.
- [2] Rozman, V.; Kiš, D. & Kralik, D. (2009). Poljoprivreda u službi proizvodnje hrane ili energije?!, *Zbornik radova 44. Hrvatskog i 4. Me unarodnog simpozija agronoma*, Mari , S. & Lon ari , Z. (urednici), str. 19-28, ISBN 978-953-6331-67-3, Opatija, Velja a 2009, Poljoprivredni fakultet Sveu ilišta J. J. Strossmayera u Osijeku, Osijek.
- [3] Bali evi , I.; Madžarevi , P.; Majstorovi , V. & Magjer, S. (2001). Agrar energija i ekologija, Energetsko-ekološka studija, Ekološko društvo, Osijek.
- [4] Burton, C.H. & Turner, C. (2003). *Manure Managment– Strategies for Sustainable Agriculture*, Silsoe Research Institut, ISBN0-9531282-6-1, Bedford, UK.
- [5] ulabic, M. (1986). *Biogas, dobijanje, koriš enje i gradnja ure aja*, Tehni ka knjiga, ISBN 86-325-0030-9, Beograd.
- [6] Kuki , S.; Kralik, D.; Burns, R.; & Spaji , R. (2009). The Role of Regional biogas plants to Renowable Energy, *Proceedings of 2nd International Scientific and Professional Conference „Agriculture in Nature and Environment Protection“*, Jug, D. & Sori , R. (urednici), str. 197-198, ISBN 978-953-99440-8-5, Vukovar, June 2009, Osje ki list doo., Osijek.
- [7] Škunca, I. (2003). Stupanj djelovanja, *Plin*, Vol.3, No.2, Lipanj 2003, str.20-24, Hrvatska stru na udruga za plin, ISSN 1333-1132.
- [8] Majdandži , Lj. (2008). *Obnovljivi izvori energije*, Graphis d.o.o., ISBN 978-953-279-004-7, Zagreb.
- [9] Bali evi , P.; Šumanovac, L.; Novak, I. & Mudri, A. (2013). Konstrukcijska razrada tla nih posuda bioplinskog postrojenja, *Zbornik radova 48. hrvatskog i 8. me unarodnog simpozija agronoma*, Mari , S. & Lon ari , Z. (urednici), str. 712-717., ISBN 978-953-7871-08-6, Dubrovnik, Velja a 2013, Poljoprivredni fakultet Sveu ilišta J. J. Strossmayera u Osijeku, Osijek.
- [10] Twidell, J.V. & Weir A.D. (2006). *Renawable energy recources*, Taylor & Francis, ISBN 0-419-25320-3, New York.