

## MODELING OF THE CALCULUS FOR ENERGY LOSSES IN BIOREACTORS CONSTRUCTIONS

### MODELIRANJE IZRAČUNA ENERGETSKIH GUBITAKA U KONSTRUKCIJAMA BIOREAKTORA

BALICEVIC, Pavo; BALICEVIC, Vedrana; BARAC, Zeljko & MARIJANOVIC, Kruno

**Abstract:** *Biogas production by the process of anaerobic fermentation of organic matter takes place in bioreactors of various sizes and construction designs. The consumption of thermal energy for heating the substrate in the reactor significantly reduces the degree of energy efficiency of the process. The estimation of heat loss is a extensive procedure because it depends on several physical properties, which need to be determined first. In this paper, a model for calculating the heat loss through reactor walls is developed for the most common construction designs. Based on this model, a computer program was developed that allows for fast and accurate execution of the heat loss calculation for a given construction design.*

**Key words:** *biogas, biological substrate, anaerobic fermentation*

**Sažetak:** *Proizvodnja bioplina procesom anaerobnog vrenja organske tvari odvija se u bioreaktorima različitih veličina i konstrukcijskih izvedbi. Potrošnja toplinske energije za zagrijavanje supstrata u reaktoru značajno umanjuje stupanj energetske učinkovitosti procesa. Procjena toplinskih gubitaka je vrlo opsežan postupak jer ovisi o više fizikalnih svojstava koje prethodno treba utvrditi. U radu je razvijen model izračuna toplinskih gubitaka kroz stijenske reaktora najčešćih konstrukcijskih izvedbi. Na osnovi modela kreiran je računalni program koji omogućava brzo i točno izvođenje proračuna toplinskih gubitaka za zadanu izvedbu.*

**Ključne riječi:** *bioplin, biološki supstrat, anaerobno vrenje*



**Authors' data:** Pavo, **Baličević**, prof.dr.sc., Poljoprivredni fakultet, Petra Svačića 1d, Osijek, pavo.balicevic@pfos.hr; Vedrana, **Baličević**, mag.ing.inf., Fakultet elektrotehnike i računarstva, Unska 3, Zagreb, vedrana.balicevic@fer.hr; Kruno, **Marijanović**, mag.ing.agr.; Željko Barać, mag.ing.agr., Poljoprivredni fakultet, Osijek, zeljko.barac@pfos.hr

## 1. Uvod

Proizvodnja bioplina procesom anaerobnog vrenja organske tvari odvija se u fermentorima različitih konstrukcijskih izvedbi. Tijekom odvijanja procesa vrenja potrebno je temperaturu supstrata u fermentoru održavati u zadanim granicama, ovisno o vrsti procesa. Gubici topline koji nastaju uslijed odvođenja topline kroz stijenke fermentora značajno umanjuju energetske stupanj iskorištenja cjelokupnog procesa proizvodnje i uporabe bioplina. Svrha ovog rada je razraditi postupak proračuna toplinskih gubitaka u fermentoru i utvrditi podatke nužne za određivanje brojnih koeficijena i veličina potrebnih za izvođenje toplinskog proračuna fermentora. Primjena takvog postupka u fazi konstruiranja fermentora pruža mogućnost optimiranja njegove geometrije i procjene učinkovitosti u izboru procesa uporabe energije koja se može dobiti iz bioplina.

S obzirom na brzinu protjecanja supstrata kroz fermentor razvijeno je više različitih izvedbi protočnih i šaržnih fermentora [1]. U primjeni se najčešće pojavljuje jednostupanjski proces anaerobne razgradnje kod kojeg se sve faze procesa (hidroliza, acidogeneza, acetogeneza i metanogeneza) provode u jednom reaktoru. Nedostatak ovakve izvedbe fermentora je relativno nizak prinos metana i otežana razgradnja organske tvari iz svježe dodanog supstrata za neke vrste bakterija.

Ovaj nedostatak otklanja se tako da se umjesto jednog uporabe dva fermentora povezana protokom supstrata, [2]. Proces fermentacije odvija se u dva odvojena prostora koji su u pogonu naizmjenično, no i ovdje se radi o jednostupanjskom procesu. Pri tome se 80 % bioplina proizvede u prvom prostoru. Drugi prostor omogućava porast prinosa metana za 15 do 18 % u odnosu na odvijanje procesa u jednom reaktoru. Zadržavanje supstrata u drugom prostoru je kraće pa se on često koristi i za međuskadištenje, pri čemu se može kombinirati kontinuirano i šaržno punjenje.

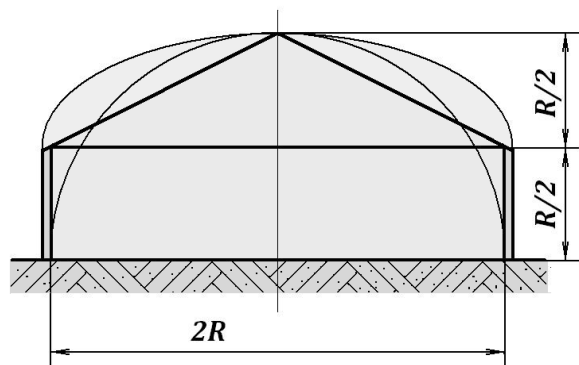
## 2. Konstrukcijska izvedba fermentora

Ovdje se razmatra primjena dva povezana protočna fermentora u kojima se odvija jednostupanjski proces anaerobne razgradnje organske tvari. Pretpostavljeno je odvijanje termofilnog procesa pri temperaturi supstrata od 55 °C u trajanju od 15 dana. Uz ostvarivanje povoljnih uvjeta odvijanja ovakvog procesa te uslijed protoka supstrata kroz oba fermentora pretpostavlja se prinos bioplina 80 % od raspoloživog kapaciteta supstrata [3].

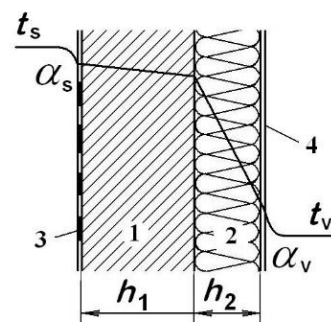
Oba reaktora, fermentor i postfermentor su cilindričnog oblika, izrađeni od armirano-betonske stijenke debljine 250 mm i podne ploče debljine 250 mm. Spremnici su odozgo zatvoreni konusnom krovnom ljuskom koja je izrađena od čeličnog lima i ukružena čeličnom podkonstrukcijom. Sve površine plašta reaktora obložene su izolacijskim materijalom debljine 150 mm koji je zaštićen aluminijskim limom od vremenskih nepogoda. Odabran je omjer polumjera i visine cilindričnog plašta  $R/H=2$  i visina konusnog krova  $h=R/2$ , kao što je prikazano na sl. 1. Obujam ovakve konstrukcije jednak je obujmu polusfere jednakog polumjera. Uz zadani obujam

spremnika  $V_1=4000 \text{ m}^3$  dimenzije spremnika, polumjer  $R$  i visina  $H$  cilindričnog plašta iznose:

$$R_1 = \sqrt[3]{3V_1/2\pi} = 12,4 \text{ m}, \quad H_1 = 6,2 \text{ m}. \quad (1)$$



Slika 1. Cilindrični spremnik s konusnim krovom



Slika 2. Detalj izolacije stijenki

Završna faza fermentacije obavlja se u postfermentoru. Prema iskustvenim podacima najpovoljniji omjer obujmova oba rektora je 70% : 30 % pa postfermentor poprima slijedeće dimenzije:

$$V_2 = V_1 \cdot 30/70 = 1700 \text{ m}^3, \quad R_2 = 9,33 \text{ m}, \quad H_2 = 4,66 \text{ m}. \quad (2)$$

### 3. Proračun gubitaka topline kroz stijenke

Provest će se proračun toplinskih gubitaka kroz stijenke reaktora. Za provođenje postupka potrebno je utvrditi površine oplošja reaktora, koeficijente prolaza topline kroz te površine i temperature okoline s vanjskih strana površina. Gubici topline kroz stijenke fermentora ovise o stupnju izolacije stijenki i o vanjskim atmosferskim uvjetima, prvenstveno o temperaturi okolnog zraka i brzini vjetra. Kako se ovi uvjeti značajno mijenjaju tijekom godine potrebno je provesti proračun za odgovarajući vremenski interval rada fermentora tijekom godine. Ovdje se razmatra rad fermentora u nepovoljnim uvjetima okoline pa je odabran interval mjeseca siječnja s prosječnom temperaturom okolišnjeg zraka od  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  i prosječnom temperaturom površinskog sloja tla od  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  u području Istočne Slavonije [4, 5].

Količina topline koja se odvodi kroz stijenke posude iznosi:

$$Q_g = A_z \cdot k_z \cdot (t_s - t_z) + (A_s \cdot k_s + A_b \cdot k_b) \cdot (t_s - t_0) \quad (3)$$

gdje je:  $A_z$ - površina stijenke posude u dodiru sa zemljom,  $A_s$ - površina stijenke posude u dodiru sa supstratom iznad razine tla,  $A_b$ - površina stijenke posude u dodiru s parama bioplina,  $t_s$ - temperatura tekućeg supstrata u digestoru,  $t_0$ - temperatura okolišnjeg uzduha,  $t_z$ - srednja temperatura sloja tla stabilne temperature uz ukopani

dio stijenske,  $k_z, k_s, k_b$ - koeficijenti prolaza topline kroz odgovarajuće dijelove stijenki.

Prvi pribrojnik na desnoj strani izraza (3) predstavlja gubitak topline iz posude odvođenjem u tlo, a drugi pribrojnik gubitak topline u okolišnji uzduh. Izmjere spremnika i oznake fizikalnih veličina za proračun prema izrazu (3) prikazane su na slici 2.

Koeficijenti prolaza topline na pojedinim dijelovima stijenske izračunavaju se prema poznatom općem izrazu iz termodinamike, uzimajući u obzir otpore na svim slojevima stijenki [6]. Na dijelu stijenske koja je s vanjske strane u dodiru sa zemljištem, a sa unutarnje strane s tekućim supstratom koeficijent prolaza topline  $k_z$  slijedi iz izraza:

$$\frac{1}{k_z} = \frac{1}{\alpha_s} + \frac{h_s}{\lambda_s} + \frac{h_i}{\lambda_i} + \frac{h_z}{\lambda_z} + \frac{1}{\alpha_z} \quad (4)$$

gdje je:  $\alpha_s$ - koef. prijelaza topline na površini stijenske koja dodiruje supstrat ( $\alpha_s=100\div300$  W/m<sup>2</sup>K kod mješanja supstrata mješalicom),  $\alpha_z$  - koeficijent prijelaza topline na vanjskoj površini stijenske koja dodiruje sloj zemlje ( $\alpha_z=6,5\div14$  W/m<sup>2</sup>K, ovisno o vrsti i nasipnoj gustoći tla),  $\lambda_s, \lambda_i, \lambda_z$ - koeficijenti vodljivosti topline kroz stijenkku, izolaciju i sloj zemlje,  $h_s, h_i, h_z$ - debljine stijenki posude, izolacije i sloja zemlje koji sudjeluje u prijenosu topline.

Debljina sloja zemlje  $h_z$  mjerena od ukopane stijenske do sloja tla stabilne temperature, prema iskustvenim podacima iznosi  $h_z = R/2$ .

Uvrštavanjem u izraz (4) vrijednosti  $\lambda_s = 1,7$  W/mK za beton,  $\lambda_i = 0,04$  W/mK za izolacijski materijal i  $\lambda_z = 1$  W/mK za zemlju,  $\alpha_s = 200$  W/m<sup>2</sup>K,  $\alpha_z = 10$  W/m<sup>2</sup>K, uz debljine slojeva stijenske  $h_s = 0,25$  m, izolacije  $h_i = 0,15$  m i sloja zemlje  $h_z = 6,2$  m dobiva se koeficijent prolaza topline kroz stijenkku prema zemlji  $k_z = 0,098$  W/m<sup>2</sup>K.

Temperatura površinskog sloja tla  $t_p$  mijenja se tijekom godine, u drugoj kontinentalnoj zoni (nizinska kontinentalna područja), između maksimalne vrijednosti +15°C i minimalne -5 °C. Temperatura zemljišta na dubini od 15 m, u područjima koja nisu izložena geotermalnim izvorima topline, ostaje nepromijenjena tijekom godine i iznosi +5 °C. Vrijednosti temperature sloja zemlje na određenoj dubini  $z$  (m) mjerenoj od površine, određuju se pomoću izraza izvedenog rješavanjem Fourier-ove jednadžbe provođenja topline kroz zemljište [7].

$$t_z = 5 + (t_p - 5) \cdot e^{-0,362 \cdot z} \quad (5)$$

Prosječna temperatura sloja zemlje ispod poda reaktora na dubini  $h_z = 6,2$  m prema ovom izrazu iznosi  $t_z = 4,5$  °C tijekom mjeseca prosinca.

Na dijelu stijenke posude koja je s vanjske strane iznad razine zemljišta, a s unutarnje strane dodiruje tekući supstrat odgovarajući koeficijent prolaza topline  $k_s$  izračunava se prema izrazu:

$$\frac{1}{k_s} = \frac{1}{\alpha_s} + \frac{h_s}{\lambda_s} + \frac{h_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_v} \quad (6)$$

gdje je:  $\alpha_v$ - koef. prijelaza topline na vanjskoj površini stijenke koja dodiruje okolišnji uzduh. Vrijednost ovog koeficijenta ovisi o brzini strujanja okolišnjeg uzduha. Primjerice kod brzine strujanja  $v_o = 5 \text{ m/s}$  iznosi  $\alpha_v = 27,2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . Uvrštavanjem prethodno navedenih vrijednosti u izraz (6) dobiva se koeficijent prolaza topline kroz stijenku od supstrata na okolišnji uzduh  $k_s = 0,254 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ .

Konačno, na gornjem dijelu stijenke koja s unutarnje strane dodiruje plinovitu fazu, a s vanjske okolišnji uzduh, koeficijent prolaza topline  $k_b$  slijedi iz izraza:

$$\frac{1}{k_b} = \frac{1}{\alpha_u} + \frac{h_s}{\lambda_s} + \frac{h_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_v} \quad (7)$$

gdje je:  $\alpha_u$ - koef. prijelaza topline na unutarnjoj površini stijenke koja dodiruje plinovitu fazu (prosječna eksperimentalna vrijednost je  $\alpha_u = 8,3 \div 9 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ),. Uvrštavanjem navedenih vrijednosti u izraz (7), uzevši za čeličnu stijenku krova  $h_s = 0,01 \text{ m}$  i  $\lambda_s = 53 \text{ W/mK}$ , dobiva se koeficijent prolaza topline kroz stijenku od supstrata preko bioplina na okolišnji uzduh  $k_b = 0,247 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ .

Vrijednosti navedenih koeficijenata prijelaza topline na vanjskim i unutarnjim površinama stijenke, dane su u literaturi [8, 9].

Površine oplošja spremnika kroz koje se gubi toplina, za konstrukciju oblikovanu prema slici, iznose:  $A_z = R_1^2 \cdot \pi = 483 \text{ m}^2$ ,  $A_s = R_1^2 \cdot \pi = 483 \text{ m}^2$ ,  $A_b = s \cdot R_1 \cdot \pi = 540 \text{ m}^2$ .

Uvrštavanjem navedenih podataka u izraz (3) slijede ukupni gubici topline kroz stijenke fermentora:

$$Q_{g1} = 483 \cdot 0,098 \cdot (55 - 4,5) + (483 \cdot 0,254 + 540 \cdot 0,247) \cdot (55 - 0,5) \approx 16345 \text{ W} \quad (8)$$

Analognim putem dobiju se gubici topline kroz stijenke postfermentora:

$$Q_{g2} = 273 \cdot 0,115 \cdot (55 - 4,2) + (273 \cdot 0,254 + 306 \cdot 0,247) \cdot (55 - 0,5) \approx 9495 \text{ W} \quad (9)$$

Količina pripremljenog supstrata koja se dnevno ubacuje u fermentor uz 15-dnevno trajanje procesa fermentacije i uz pretpostavku 66 % popunjenosti obujma fermentora,

[10] iznosi:

$$S = 0,66 \cdot V_1 \cdot \rho_{st} / n = 0,66 \cdot 4000 \cdot 1050 / 15 = 184\,800 \text{ kg/dan} \quad (10)$$

Računajući sa koncentracijom od 10 % otopljene suhe tvari u supstratu i prinosom bioplina od  $b=0,42 \text{ m}_n^3/\text{kg}_{st}$  uz stupanj razgradnje biomase od 80 %, dobiva se dnevni prinos bioplina:

$$V_B = 0,8 \cdot D_{st} \cdot b = 0,8 \cdot 18480 \cdot 0,42 = 6209 \text{ m}_n^3/\text{dan} \quad (11)$$

Računajući sa sadržajem metana 60 % u sastavu bioplina i njegovom donjom ogrijevnom moći  $H_d = 35,83 \text{ MJ/m}_n^3$  dobiva se toplinska snaga proizvedenog bioplina, [11]:

$$Q = 0,6 \cdot V_B \cdot H_d = 0,6 \cdot 6209 \cdot 35\,830 / 86400 \approx 1545 \text{ kW} \quad (12)$$

Gubicima topline kroz stijenke fermentora treba dodati toplinu potrebnu za zagrijavanje supstrata prije ubacivanja u prvi reaktor:

$$Q_s = S \cdot c \cdot (t_s - t_0) = 184\,800 \cdot 4,1 \cdot (55 - 0,5) / 86400 \approx 478 \text{ kW} \quad (13)$$

$$Q_g = Q_{g1} + Q_{g2} + Q_s \approx 504 \text{ kW} \quad (14)$$

Usporedbom dobivenih vrijednosti vidi se da gubici topline kroz stijenke reaktora iznose cca 5 %, a toplina utrošena za zagrijavanje supstrata 95 % ukupnih gubitaka topline. Toplina potrebna samo za održavanje procesa čini cca 33 % topline koja se može dobiti izgaranjem proizvedenog bioplina. Pri tome nije uzet u obzir stupanj iskorištenja sustava za zagrijavanje supstrata.

#### 4. Zaključak

Primjena metode izračuna koja je ovdje razvijena, uz odgovarajući algoritam za računalo, omogućava projektantu postrojenja za proizvodnju bioplina jednostavan postupak određivanja gubitaka topline, bez zamornog ulaženja u pojedinosti izračuna. Provedena analiza ukazuje na mogućnosti poboljšanja uobičajene konstrukcijske izvedbe fermentora u cilju smanjenja toplinskih gubitaka. Usporedbom gubitaka topline na pojedinim dijelovima stijenke fermentora vidljivo je da su toplinski gubici po jedinici površine stijenke najmanji na dijelovima stijenke koja je ukopana u zemlju. Taj utjecaj više dolazi do izražaja u geografskim područjima s toplijom klimom i višom temperaturom tla. Nadalje, za optimiranje konstrukcije fermentora važna je činjenica da je omjer toplinskih gubitaka prema količini proizvedene toplinske energije manji što je obujam reaktora veći.

Proračun toplinskih gubitaka u fermentoru je sastavni dio procesa projektiranja bioplinskog postrojenja. Poznavanje tih gubitaka je važno i radi projektiranja procesa iskorištavanja energije koja se može dobiti izgaranjem bioplina. Visok energetski stupanj djelovanja može se ostvariti ako se proizvodnja bioplina integrira s proizvodnjom električne energije u kombiniranom procesu. No optimalne vrijednosti

stupnja djelovanja mogu se ostvariti samo ako omjer stvarne potrošnje toplinske i električne energije odgovara projektiranom omjeru u cijelom periodu rada postrojenja. Ovaj uvjet je u praksi teško ostvariti. Stoga je za utvrđivanje potrebnog toplinskog kapaciteta postrojenja, uz točno određivanje toplinskih gubitaka, nužno poznavati i točne iznose stvarnih potreba za potrošnjom toplinske energije.

Razvijena metoda proračuna toplinskih gubitaka topline prikladna je za uobičajenu konstrukcijsku izvedbu fermentora cilindričnog oblika s konusnim ili kupolastim krovom, prema opisanim podacima. Vrijednosti koeficijenata koje su potrebne za proračun navedene su u širokom području promjene okolišnih uvjeta i ne ovise o izvedbi fermentora. Stoga se prikazani postupak može primjeniti i za drugačije izvedbe fermentora jednostavnom zamjenom odgovarajućih izraza za izračun površina.

## 5. Literatura

- [1] Twidell, J.V. & Weir A.D. (2006). *Renawable energy recources*, Taylor & Francis, ISBN 0-419-25320-3, New York.
- [2] Rutz, D. (2012). *Održivo korištenje toplinske energije iz bioplinskih postrojenja*, WIP Renewable Energies, ISBN 978-953-6474-80-6, Munchen.
- [3] Burton, C.H. & Turner, C. (2003). *Manure Managment - Strategies for Sustainable Agriculture*, Silsoe Research Institut, ISBN 0-9531282-6-1, Bedford, UK.
- [4] Kukić, S.; Kralik, D.; Burns, R. & Spajić, R. (2009). The Role of Regional biogas plants to Renowable Energy, *Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Scientific and Professional Conference „Agriculture in Nature and Environment Protection“*, Jug, D. & Sorić, R. (urednici), str. 197-198, ISBN 978-953-99440-8-5, Vukovar, June 2009, Osječki list doo., Osijek.
- [5] Baličević, P.; Baličević, V. & Livazović, A. (2015). Energy Efficiency of Biogas-Solar Plant, *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca*, Vol.72, No.2, (November 2015), ISSN 1843-5246, pp 339-345.
- [6] Reynolds, W.C. (1968). *Thermodynamics*, McGraw-Hill Book Com., New York.
- [7] Incropera, F.P. & DeWitt, D.P. (1981). *Fundamentals of Heat Transfer*, John Wiley & Sons, ISBN 0-471-42711-X, New York.
- [8] Đulabic, M. (1986). *Biogas, dobijanje, korišćenje i gradnja uređaja*, Tehnička knjiga, ISBN 86-325-0030-9, Beograd.
- [9] Zrnić, S.J. (1978). *Grijanje i klimatizacija*, Naučna knjiga, Beograd.
- [10] Baličević, P.; Kralik, D.; Kraus, D.; Jovičić, D. & Mihić, Đ. (2014). Bilanca i varijable prinosa bioplina iz bioloških supstrata, *Proceedings of 4th International Conference "Vallis Aurea" Focus on: Regional and Innovation Development*, Katalinic, B. (urednik), pp. 31-37, ISBN 978-3-902734-02-0, Požega, September 2014, Polytechnic in Pozega, Požega.
- [11] Labudović, B. (2000). *Ukapljeni naftni plin*, Energetika Marketing, ISBN 953-6759-06-3, Zagreb.



Photo 004. TU Wien / TU Beč