

PROIZVODNJA ENERGIJE IZ POLJOPRIVREDNOG OTPADA I KORIŠĆENJE NUS PROIZVODA KAO ORGANSKOG ĐUBRIVA

Ljiljana Tanasić¹, Milan Glišić², Suzana Knežević³, Vladimir Stepić⁴

Rezime: proizvodnja i primena biogasa, kao obnovljive energije, pomaže poboljšanju energetske bilansa zemlje i doprinosi očuvanju prirodnih resursa i zaštiti životne sredine. U ovom radu je predstavljen ekološki efikasan način zbrinjavanja poljoprivrednog otpada, tako da otpad dobija novu ekonomsku vrednost u vidu električne energije. Sporedni proizvod u ovom procesu dobija se u vidu organskog đubriva sa visokim performansama. U radu je opisan proces dobijanja biogasa, uz korišćenje različitih sirovina, kao i mogući načini njegove primene u energetske svrhe. Proizvodnja električne energije iz poljoprivrednog otpada je primarni cilj i svrha biogasnog postrojenja. Održivosti ovog procesa čini kako proizvodnja obnovljivog energenta, tako i primena visokokvalitetnog organskog đubriva, koje nastaje kao NUS proizvod. Primenom organskog đubriva poboljšava se kvalitet samog zemljišta i smanjuje potreba za korišćenjem veštačkih đubriva, što predstavlja pozitivan uticaj na životnu sredinu.

Ključne reči: Biogas, obnovljiva energija, organsko đubrivo

ENERGY PRODUCTION FROM AGRICULTURAL WASTE AND USE OF NUS PRODUCTS AS ORGANIC FERTILIZER

Abstract: The production and application of biogas, as a renewable help, helps to improve the country's energy balance and contributes to the preservation of natural resources and environmental protection. In this paper, an ecologically efficient way of disposal of agricultural waste is presented, so that the waste acquires a new economic value in the form of electricity. The secondary product in this process is obtained in the form of organic fertilizer with high performance. The paper describes the process of obtaining biogas, using different raw materials, as well as possible ways of its application for energy purposes. The production of electricity from agricultural waste is the primary goal and purpose of a biogas plant. The sustainability of this process is made both by the production of renewable energy and by the application of high-quality organic fertilizer, which is produced as a UXO product. Applying organic fertilizer improves the quality of the soil itself and reduces the need to use artificial fertilizers, which represents a positive impact on the environment.

Key words: Biogas, renewable energy, organic fertilizer

1. UVOD

Biogasne elektrane su postrojenja koja za dobijanje biogasa iz stajnjaka životinjskog porekla, drugih organskih đubriva, energetske useva i poljoprivrednih ostataka, koriste bakteriološki proces koji se naziva anaerobna digestija. Biogas se može konvertovati u električnu i toplotnu energiju. Struja može da se prodaje po povlašćenoj tarifi, a toplota da se koristi za grejanje ili hlađenje zgrada, u tehnološkom procesu, staklenicima, sušarama. Anaerobna digestija je stabilna i dokazana tehnologija koja pruža rešenje za snabdevanje energijom, uz brigu za životnu sredinu. Pretvaranjem otpada u energiju, elektrane na biogas redukuju neprijatne mirise i patogene bakterije, proizvode visokokvalitetno đubrivo i značajno smanjuju emisiju gasova sa efektom staklene bašte.

Iako je proizvodnja električne energije primarni cilj i svrha elektrana na biogas, potrebno je istaći brojne pozitivne uticaje na životnu sredinu. Osim energije iz obnovljivih izvora, biogasna postrojenja

¹dr. profesor strukovnih studija, Akademija strukovnih studija Šabac, Odsek za poljoprivredno-poslovne studije i turizam, Vojvode Putnika 56, 15000 Šabac, e-mail: ljiljana3101@gmail.com

²dr. predavač, Akademija strukovnih studija Šabac, Odsek za poljoprivredno-poslovne studije i turizam, Vojvode Putnika 56, 15000 Šabac, e-mail: milan11glisic@gmail.com

³mr. predavač, Akademija strukovnih studija Šabac, Odsek za poljoprivredno-poslovne studije i turizam, Vojvode Putnika 56, 15000 Šabac, e-mail: sdknez@gmail.com

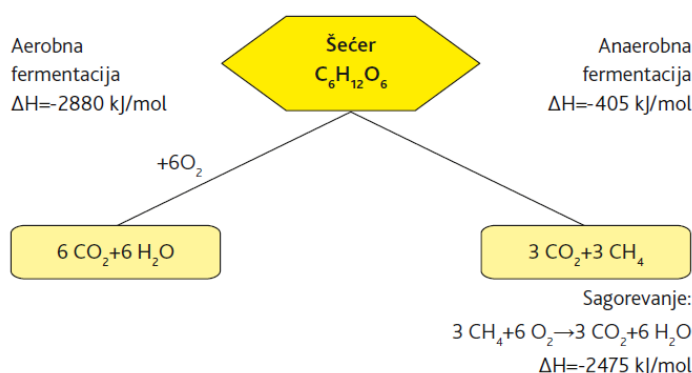
⁴master inž., nastavnik pr. nastave, Akademija strukovnih studija Šabac, Odsek za poljoprivredno-poslovne studije i turizam, Vojvode Putnika 56, 15000 Šabac, e-mail: sdknez@gmail.com

proizvode i visokokvalitetna đubriiva bogata hranljivim materijama i humusom, što čini tehnologiju biogasa zaista pogodnom za mnoge svrhe. Proizvodnjom kvalitetnog organskog đubriiva poboljšava se kvalitet samog tla i smanjuje potreba za upotrebom veštačkih đubriiva. Ako se koriste čiste biorazgradive sirovine, digestat se može koristiti u poljoprivredi kao organsko đubriivo ili sredstvo za poboljšanje tla.

2. NASTANAK BIOGASA

Biogas nastaje u biološkom procesu, bez prisustva kiseonika (odnosno anaerobno) iz organske mase formira mešavina gasova, takozvani biogas. Ovaj u prirodi veoma široko rasprostranjen proces odvija se na primer u močvarama, na dnu mora i okeana, u jamama za tečni stajnjak kao i u buragu preživara. Pri tome se organska masa pomoću niza mikroorganizama gotovo u celini konvertuje u biogas. Uz to dodatno nastaje izvesna količina energije (toplota) i nova masa-organsko đubriivo.

Značaj anaerobne fermentacije najlakše se uviđa poređenjem s aerobnom (primer je proces kompostiranja), a osnovna razlika je u nastalim produktima. Šematski prikaz aerobne i anaerobne fermentacije šećera dat je na Slici 1. Suština je da se nakon anaerobne fermentacije oslobađa značajno manje toplotne energije. Aerobnom fermentacijom organska masa se razgrađuje do ugljendioksida, dok se anaerobnom dobija metan. Metan je gorivi gas, a cilj je upravo njegova proizvodnja i energetska korišćenje.



Slika 1 - Poređenje procesa aerobne i anaerobne fermentacije šećera

Formirana mešavina gasova sastoji se pretežno od metana (50–75% vol.) i ugljendioksida (25–45% vol.). Pored toga se u biogasu nalaze i male količine vodonika, vodonik-sulfida, amonijaka i drugih gasova u tragovima. Na sastav načelno utiču korišćeni supstrati, postupak fermentacije i različite tehnički uslovi, Tabela 1 [1].

Tabela 1 - Sastav biogasa [1]

sastojak	hemijski simbol	zapreminski udeo, %
metan	CH ₄	50 – 75
ugljendioksid	CO ₂	25 – 45
vodena para	H ₂ O	2 – 7
kiseonik	O ₂	< 2
azot	N ₂	< 2
amonijak	NH ₃	< 1
vodonik	H ₂	< 1
vodonik-sulfid	H ₂ S	20 – 20.000

*ppm (milionitih delova)

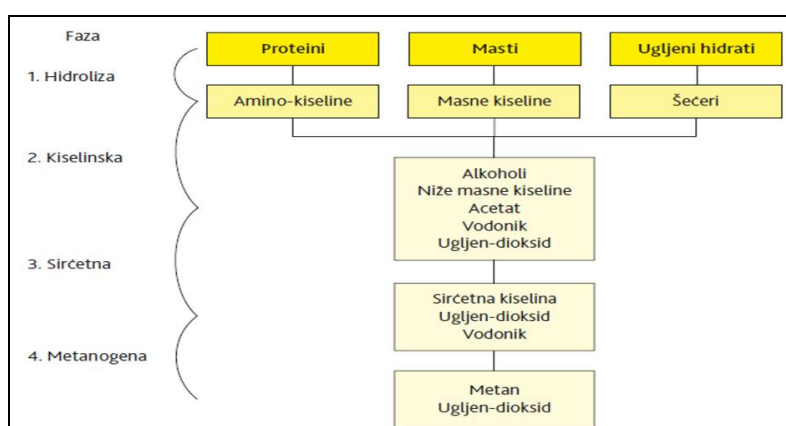
18. KONFERENCIJA SA MEĐUNARODNIM UČEŠĆEM RIZIK I BEZBEDNOSNI INŽENJERING

Poljoprivredna biogas postrojenja pogodna su za korišćenje otpada poljoprivredne proizvodnje (stajnjak, ostaci biljne proizvodnje), ili energetske biljake (kukuruzna silaža, sirak). Stajnjak može da bude jedini supstrat, mada se veće energetske vrednosti postižu kombinovanjem stajnjaka kao glavnog suprata i kukuruzne silaže, energetske biljake i žetvenih ostataka ostalih ratarskih kultura kao kospuratata.

Tehnologija biogas postrojenja i vrsta supstrata koji se koristi u određenom postrojenju su dva odlučujuća faktora:

- Konfiguracija postrojenja za proizvodnju biogasa najviše zavisi od vrste i karakteristike supstrata.
- Konfiguracija opreme utiče na količinu i kvalitet biogasa (procenat metana).

Proces proizvodnje biogasa, odnosno anaerobne fermentacije, odvija se u četiri faze: hidroliza, kiselinska, sirćetna i metanogena, Slika 2.



Slika 2 - Šematski prikaz anaerobne razgradnje po fazama [2]

U svakoj fazi učestvuju druge grupe bakterija, a produkti prethodne faze su polazne sirovine za odvijanje naredne faze. Sve faze odvijaju se prostorno i vremenski paralelno, a svakoj grupi bakterija odgovaraju drugačiji uslovi. Zapreminski udeli prikazani su u Tabeli 1, u opsezima, a zavise od sirovine (supstrata) i uslova u kojima biogas nastaje.

U **prvoj fazi, tzv. „hidrolizi“**, se kompleksna jedinjenja ulazne sirovine (npr. ugljeni hidrati, proteini, masti) razlažu na jednostavnija organska jedinjenja (npr. aminokiseline, šećer, masne kiseline). Hidrolitičke bakterije uključene u taj proces u tu svrhu oslobađaju enzime koji organsku masu razlažu biohemijskim putem [3], [4].

U **drugoj fazi, takozvanoj „kiselinskoj fazi“** (acidogenezi), nastali intermedijarni proizvodi se pomoću fermentativnih (acidogenih) bakterija dalje razlažu na niže masne kiseline (sirćetna, propionska i buterna kiselina) kao i ugljendioksid i vodonik. Međutim, pored toga se formiraju i male količine mlečne kiseline i alkohola. Na vrstu proizvoda nastalih u ovoj fazi utiče koncentracija intermedijarno formiranog vodonika. Ovi proizvodi se nakon toga u okviru faze **acetogeneze, tj. „sirćetne faze“**, pomoću acetogenih bakterija konvertuju u prekursorsne supstance biogasa (sirćetna kiselina, vodonik i ugljendioksid). U tom kontekstu veliki značaj ima parcijalni pritisak vodonika. Previsok sadržaj vodonika iz energetske razloga sprečava konverziju intermedijarnih proizvoda acetogeneze. Kao posledica toga dolazi do akumulacije organskih kiselina, npr. propionske, izobuterne, izovalerijanske i kapronske kiseline, i inhibiranja nastanka metana. Acetogene bakterije (koje formiraju vodonik) iz tog razloga moraju da oforme tesnu životnu zajednicu sa metanogenim arheja koji prilikom nastanka metana zajedno sa ugljen-dioksidom troše i vodonik (interspecijski transfer vodonika) i tako za acetogene bakterije obezbeđuju prihvatljive uslove u okruženju [5].

18. KONFERENCIJA SA MEĐUNARODNIM UČEŠĆEM RIZIK I BEZBEDNOSNI INŽENJERING

U narednoj fazi „**metanogenezi**“, poslednjoj fazi nastanka biogasa, se pre svega sircetna kiselina kao i vodonik i ugljendioksid pomoću strogo anaerobnih metanogenih arheja konvertuju u metan. Hidrogenotrofni metanogeni metan proizvode od vodonika i ugljendioksida, dok acetoklastični metanogeni metan formiraju cepanjem kiselina. Pod uslovima koji preovlađuju u poljoprivrednim biogas postrojenjima se formiranje metana u slučaju većih opterećenja organskom materijom pretežno odvija u reakciji sa vodonikom, a samo u slučaju relativno malih opterećenja organskom materijom razlaganjem sircetne kiseline [6].

Generalno uzevši, sve četiri faze anaerobne razgradnje u jednostepenom procesu odvijaju vremenski istovremeno. Međutim, bakterije pojedinačnih faza razgradnje imaju različite zahteve u pogledu svog životnog okruženja (npr. pH vrednost, temperatura), stoga je neophodno u procesu pronaći balans. Pošto metanogeni mikroorganizmi usled male brzine rasta predstavljaju najslabiju kariku biocenoze i najosetljivije reaguju na uslove u okruženju,

moraju da se prilagode zahtevima metanogena. Pokušaj da se hidroliza i kiselinska faza koracima prostorno odvoje sa dva odvojenim procesa od metanogene faze (vođenje dvostepenog procesa), u praksi uspeva samo uslovno, pošto uprkos niskoj pH vrednosti u fazi hidrolize ($\text{pH} < 6,5$) ipak delom dolazi do formiranja metana. Stoga, gas formiran u fazi hidrolize pored ugljen-dioksida i vodonika sadrži i metan, zbog čega taj gas mora da se iskoristi ili tretira da bi se izbegli negativni uticaji na životnu sredinu i bezbednosni rizici [7].

3. STABILNOST PROCESA I POTREBNI USLOVI

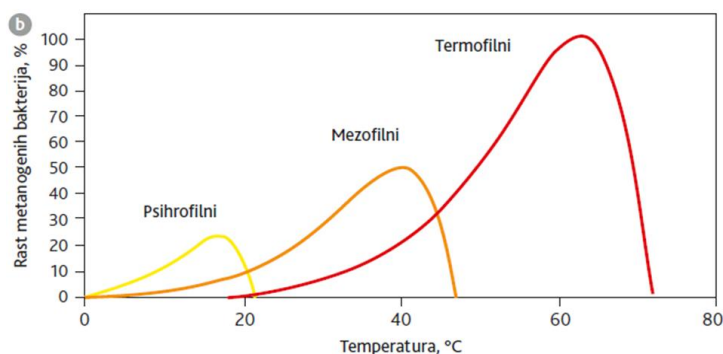
Prilikom proizvodnje biogasa, bitno je da se u fermentorima obezbedi stabilnost procesa anaerobne fermentacije. Satehničkog aspekta, stabilnost podrazumeva ujednačen prinos biogasa približno jednakog sastava, a sa biohemijskog približno jednak sastav i količinu produkata četiri faze fermentacije (Slika 2.).

Obezbeđenjem potrebnih uslova za stabilan proces ostvaruje se pogonska sigurnost, što može da bude ključno za ekonomičan rad biogas postrojenja. Na stabilnost procesa utiču mnogobrojni parametri koji zavise od tehničke izvedbe biogas postrojenja i pogonskih uslova u kojima rade, kao i supstrata koji se koriste. Uticajni parametri mogu da se podele na: fizičke, hemijske i mikrobiološke. Od fizičkih parametara zavise hemijski i mikrobiološki, koji su opet međusobno zavisni.

Fizičke parametre najjednostavnije je kontrolisati i njima upravljati. Najvažniji su: obezbeđenje anaerobnih uslova, mešanje sadržaja fermentora, održavanje temperature u fermentoru, kao i vreme zadržavanja u njemu, usklađeno sa količinom supstrata. Potrebno je da se u potpunosti ostvare anaerobni uslovi, jer i najmanja količina kiseonika dovodi do umiranja bakterija i prekida procesa fermentacije. Mešanje je neophodno, da bi se ostvario što bolji kontakt bakterija i supstrata, kao i ujednačenost temperature i raspodele supstrata po celoj zapremini fermentora. Ukoliko mešanje ne bi bilo dobro, u fermentoru bi se na površini formirala kora koja bi smanjila kontakt supstrata sa bakterijama i predstavljala prepreku za prolaz biogasa. Sa druge strane, ukoliko bi mešanje bilo vrlo intenzivno, remetila bi se simbioza metanogenih i bakterija sircetne faze, što remeti stabilnost procesa.

Temperatura utiče na brzinu odvijanja procesa anaerobne fermentacije. Na višoj temperaturi povećava se aktivnost i brzina razmnožavanja metanogenih bakterija, Slika 3.

18. KONFERENCIJA SA MEĐUNARODNIM UČEŠĆEM RIZIK I BEZBEDNOSNI INŽENJERING



Slika 3 - Uticaj temperature na rast populacije metanogenih bakterija [8]

Načelno važi da se hemijske reakcije odvijaju utoliko brže što je veća okolna temperatura. To, međutim, samo uslovno može da se primeni na proces biološke razgradnje i konverzije. Ovde treba uzeti u obzir da za različite mikroorganizme uključene u metaboličke procese postoje različite optimalne temperature. Ukoliko se te optimalne temperature ne dostignu, odnosno prekorače, to može da dovede do inhibicije i u ekstremnom slučaju do nepopravljivog oštećenja uključenih mikroorganizama. Mikroorganizmi uključeni u razgradnju prema optimalnoj temperaturi mogu da se podele u tri grupe. Ovde se pravi razlika između psihrofilnih, mezofilnih i termofilnih mikroorganizama. Psihrofilni proces se odvija na temperaturama u rasponu od 15 do 25°C, mezofilni na temperaturama od 35 do 45°C, a termofilni na temperaturama preko 55°C, Slika 3. Ovaj proces se naziva još i anaerobna digestija.

Praksa je u tom pogledu pokazala da su granice između temperaturnih opsega prelazne i da u prvoj liniji brze promene temperature dovode do oštećenja mikroorganizama, dok u slučaju spore promene temperature metanogeni mikroorganizmi mogu da se prilagode različitim temperaturnim nivoima. Za stabilan tok procesa je stoga odlučujuća ne toliko apsolutna temperatura, već mnogo više konstantan nivo temperature.

Za pH vrednost važe slične uslovljenosti kao i za temperaturu. Mikroorganizmi uključeni u različite faze razgradnje zahtevaju različite pH vrednosti pri kojim mogu optimalno da rastu. Tako se optimalna pH vrednost hidrolizujućih i acidogenih bakterija kreće od 5,2 do 6,3 (Weiland, 2001.). One ne zavise nužno od toga i još uvek supstrate mogu da razgrade i pri nešto većim pH vrednostima. Time se jedino malo smanjuje njihova aktivnost. Naspram toga je acetogenim bakterijama i metanogenim arhejama obavezno potrebna pH vrednost u neutralnom opsegu od 6,5 do 8 (Lebuhn et al. 2008.). Ako se proces fermentacije odvija samo u jednom fermentoru, pH vrednost shodno tome mora da se održi na tom nivou. Nezavisno od toga da li je proces jednostepen ili višestepen, pH vrednost unutar sistema se automatski podešava alkalnim i kiselim metaboličkim proizvodima koji se formiraju u toku anaerobne razgradnje.

Za stabilan tok procesa potreban je uravnotežen odnos makro- i mikroelemenata. Azot posle ugljenika predstavlja najpotrebniju hranljivu materiju. On je potreban za formiranje enzima koji sprovode metabolizaciju. Zato je odnos C/N korišćenih supstrata od značaja. Ako je taj odnos previsok (mnogo C i malo N), postojeći ugljenik usled nedovoljne metabolizacije ne može da se konvertuje u celini, tako da se ne ostvaruje maksimalno moguć prinos metana. U suprotnom slučaju, usled viška azota može da dođe do nastanka prekomerne količine amonijaka (NH₃), koji već u malim koncentracijama inhibira rast bakterija i čak može i da dovede do potpunog uništenja celokupne populacije mikroorganizama. Stoga za neometani tok procesa odnos C/N mora da se kreće u rasponu od 10 do 30.

Inhibitori. Ako je nastanak gasa, odnosno odvijanje procesa inhibirano, za to mogu da postoje različiti razlozi. To s jedne strane mogu biti operativno-tehnički razlozi. S druge strane, inhibitori mogu da usporavaju dalje odvijanje procesa. To su materije koje pod određenim okolnostima već u neznatnim količinama mogu da umanje kapacitet razgradnje, odnosno da u slučaju toksične koncentracije

18. KONFERENCIJA SA MEĐUNARODNIM UČEŠĆEM
RIZIK I BEZBEDNOSNI INŽENJERING

obustave proces razgradnje. Treba praviti razliku između inhibitora koji u fermentor dospevaju dodavanjem supstrata i onih koji nastaju kao intermedijarni proizvodi pojedinih faza razgradnje.

U toku fermentacije formira se niz materija koje mogu da inhibiraju proces. Pri tome u tom kontekstu treba ukazati na veliku sposobnost bakterija da se prilagode, pošto ne može da se pođe od opšte važećih apsolutnih granica. Pre svega, anjonski slobodni amonijak (NH_3) već u malim koncentracijama deluje štetno na bakterije [9].

4. PRINOS BIOGASA

Za proizvodnju i kvalitet biogasa veoma značajnu ulogu ima poreklo supstrata–biomase i njihove najznačajnije karakteristike kao što su suva materija (SM), organska suva materija (oSM), hranljive materije (N, P, K) ili postojeće organske štetne materije, Tabela 2. Osim toga se pružaju informacije o očekivanim prinosima gasa i kvalitetu gasa, na osnovu dobijenih podatak, kao i o načinu manipulisanja supstratima. Supstrati podležu godišnjim promenama kvaliteta, zbog čega podaci o materijalnim karakteristikama i o prinosima ne predstavljaju apsolutne vrednosti.

Tabela 2. Karakteristike različitih vrsta supstrata i prinos metana

supatrat	% SM	% OSM	N	NH_3	P_2O_5	prinos biogasa Nm^3/t	udeo CH_4 % vol.
			%				
tečni goveđi stajnjak	10	80	6	3	2	25	56
čvrsti goveđi stajnjak	20	72	2,5	10	7	110	56
svinjski stajnjak	30	82	3	1,5	1	30	65
živinsk stajnjak	40	75	18	/	14	270	64
silaža kukuruza	30	95	1,5	/	/	180	55
silaža trave	40	85	5	15	0,6	190	54
šećerna repe	23	90	2,6	0,2	0,4	175	53
pivski trop	23	75	4	1,5	/	120	60
pulpa krmpira	13	90	0,7	0,2	1,8	80	60

Podaci o prinosima biogasa, odnosno metana, navedeni su uvek u normiranim kubnim metrima (Nm^3). Pošto zapremina gasa zavisi od temperature i vazdušnog pritiska (zakon idealnog gasnog stanja), normiranje zapremine omogućava poređenje različitih uslova rada. Normirana količina gasa odnosi se na temperaturu od 0°C i vazdušni pritisak od 1.013 mbara. Osim toga, na taj način za udeo metana u biogasu može da se odredi egzaktna donja toplotna moć koja za metan iznosi $9,97 \text{ kWh}/\text{Nm}^3$. Na osnovu donje toplotne moći opet može da se izvede zaključak o proizvodnji energije, što može biti potrebno za različite interne komparativne obračune.

Proizvodnja biogasa predstavlja takođe odličan način da se smanji količina otpadnog organskog materijala i pritom proizvedu vredni resursi. Kao krajnji nusproizvod biogas postrojenja dobija se visoko kvalitetno organsko đubrivo koje se zatim iznosi na obradive površine.

4.1. Kvalitet organskog đubriva

Čistoća sirovina definiše kvalitet proizvoda koji izlazi iz digerstora (digestat), a samim tim i uslove za pripremu i mogućnosti primene digestata. Supstrati za proizvodnju biogasa je široko rasprostranjen naziv sirovine za proizvodnju biogasa: Supstrati iz poljoprivrede: (organsko đubrivo - govedarstvo i svinjarstvo, žetveni ostaci), Supstrati iz prerađivačke agroindustrije (Proizvodnja piva, Proizvodnja alkohola, Proizvodnja biodizela, Prerada krompira (proizvodnja skroba), Proizvodnja šećera), Zeleni i travnati otpad, otpad... Većinu vrsta biootpada i sporednih proizvoda životinjskog porekla (izuzev stajnjaka i nekih sporednih proizvoda biljnog porekla, koji se u praksi mogu direktno

razbacivati) potrebno je podvrgnuti sanitaciji radi uništenja ili smanjenja na prihvatljivo nizam, sanitarni nivo patogena životinjskog i biljnog porekla odnosno neželjenog semena.

5. ZAKLJUČAK

Biogas elektrane ne bi trebalo posmatrati isključivo kao proizvođače električne energije, već ih treba sagledati kroz celokupan proces. Iako je proizvodnja električne energije primarni cilj i svrha biogas elektrana, nikako ne bi trebalo zanemariti i njihove mnogobrojne pozitivne uticaje na životnu sredinu. Putem proizvodnje kvalitetnog organskog đubriva poboljšava se kvalitet samog zemljišta i smanjuje potreba za upotrebom veštačkih đubriva.

Međutim, ono što je možda najbitnije, biogasne elektrane rešavaju mnoge ekološke probleme, zbrinjavajući biološki i organski otpad. Ovde ne govorimo samo o ekološki efikasnom načinu zbrinjavanja otpada, već o tome da taj otpad dobija novu ekonomsku vrednost u vidu električne i toplotne energije, kao i organskog đubriva.

6. LITERATURA

- [1] Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (2001): *Energie aus Biomasse-Grundlagen, Techniken und Verfahren*; Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York.
- [2] Oechsner, H.; Lemmer, A. (2009): Was kann die Hydrolyse bei der Biogasvergärung leisten?, *VDI-Berichte 2057*, S. 37–46.
- [3] Gerardi, M.H. (2003): *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken. <http://dx.doi.org/10.1002/0471468967>
- [4] Nuruol Syuhadaa Mohd, Taqsim Husnain, Baoqiang Li, Baoqiang Li, Arifur Rahman, Rumana Riffat, Investigation of the Performance and Kinetics of Anaerobic Digestion at 45°C, **Journal of Water Resource and Protection**, Vol.7 No. 14, September 22, 2015.
- [5] Wandrey, C.; Aivasidis, A. (1983): Zur Reaktionskinetik der anaeroben Fermentation; *Chemie-Ingenieur-Technik* 55, Nr. 7, S. 516-524, Weinheim.
- [6] Bauer C.; Korthals. M.; Gronauer. A.; Lebuhn, M. (2008): Methanogens in biogas production from renewable resources - a novel molecular population analysis approach. *Water Sci. Tech.* 58, No. 7, S. 1.433-1.439
- [7] Oechsner, H.; Huelsemann, B.; Martínez, H.C.: "Transferability of Results from Laboratory Scale to Biogas Plants at Real Scale", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 29(2): 93-103, 2020, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- [8] J.B. Holm-Nielsen, T. Al Seadi, P. Oleskiewicz-Popiel (2009) The future of anaerobic digestion and biogas utilization *Bioresource Technology* 100(22):5478-84.
- [9] Schattner, S.; Gronauer, A.: *Methangärung verschiedener Substrate - Kenntnisstand und offene Fragen*, Gülzower Fachgespräche, Band 15: Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial, S. 28-38, Weimar, 2000.