

Slobodan Cvetković^{1*}, Mirjana Kijevčanin²

¹Ministarstvo zaštite životne sredine Republike Srbije, Beograd, Srbija

²Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-Metalurški fakultet, Beograd, Srbija

Naučni rad

ISSN 0351-9465, E-ISSN 2466-2585

UDC:621.3.017:676.012.3:66.012.3

<https://doi.org/10.5937/zasmat2104269C>



Zastita Materijala 62 (4)

269 - 276 (2021)

Bilansiranje energetske tokova u životnom ciklusu proizvodnje toplotne energije iz biogasa

IZVOD

Biogas predstavlja obećavajući izvor za dobijanje energije u budućim energetske sistemima. U ovom radu sprovedeno je razmatranje energetske tokova u životnom ciklusu realnog biogasnog postrojenja (Mirotin-Vrbas) za proizvodnju toplotne energije, počev od proizvodnje kukuruzne silaže, transporta kravljeg stajnjaka, procesa anaerobne fermentacije i proizvodnje biogasa, do korišćenja čvrstog i tečnog digestata za proizvodnju biljnih kultura. Za evaluaciju energetske tokova korišćena su četiri energetske indikatora. Dobijeni rezultati su pokazali da ovaj biogasn sistem ima pozitivan energetske bilans od 62.418 GJ i energetske efikasnost od 6,1 što ukazuje da u pogledu supstitucije potrošnje fosilnih goriva ovaj sistem za proizvodnju toplotne energije predstavlja dobru alternativu.

Ključne reči: biogas; toplotna energija; životni ciklus; energija; energetske efikasnost.

1. UVOD

Savremeni svet ima sve veću potrebu za energijom. Procenjuje se da će između 2012. i 2040. godine energetske potrošnja porasti za oko 48% [1]. Upotreba konvencionalnih tehnologija za proizvodnju energije iz fosilnih goriva dovela je do porasta zagađenja životne sredine, odnosno do povećanja emisije gasova staklene bašte koji utiču na klimatske promene i pogoršanja kvaliteta vazduha.

Razvoj tranzicionih energetske strategija mnogih država definisan je njihovim opredeljenjem za postizanje ciljeva postavljenih Pariskim klimatskim sporazumom iz 2015. godine, gde je glavni cilj je da se održi porast globalne prosečne temperatura znatno ispod 2°C u poređenju sa predindustrijskim nivoom [2]. Očigledno, da je potrebno izvršiti uvođenje novih energetske izvora koji bi doveli do sigurnog snabdevanja energijom, smanjenja zagađenja životne sredine i ublažavanja klimatske promena.

Svet se posle naftne krize sedamdesetih godina prošlog veka okrenuo proizvodnji energije iz obnovljivih izvora. U 2019. godini oko 11% globalne primarne energije dolazilo je iz obnovljivih izvora [3]. Jedan od načina proizvodnje obnovljive energije je primena anaerobne digestije i proizvodnja biogasa. Anaerobna digestija predstavlja biohemijski proces razgradnje složenih organskih jedinjenja u anaerobnim uslovima. Kao finalni proizvod ovog procesa nastaje biogas, koji se primarno sastoji od metana (50-70%) i ugljen-dioksida (30-49%), vodonik sulfida, vodene pare, azota i amonjaka [4]. Takođe, ovim procesom nastaje i digestat koji nije mogao da se razgradi anaerobnim procesom [5]. Dobijeni biogas može se koristiti u proizvodnji energije, proizvodnji energenata ili u proizvodnji hemijskih proizvoda. Mogućnosti korišćenja biogasa u energetske svrhe prikazane su na slici 1.

Republika Srbija je postala članica Energetske zajednice sa Evropskom Unijom (EU) 2006. godine i prihvatila je obavezu većeg korišćenja obnovljivih izvora energije u energetske proizvodnji u koje spada i proizvodnja energije iz biogasa. Proizvodnja primarne energije iz biogasa u Srbiji beleži značaj porast u periodu od 2013. do 2019. godine (slika 2) [6].

*Autor za korespondenciju: Slobodan Cvetković

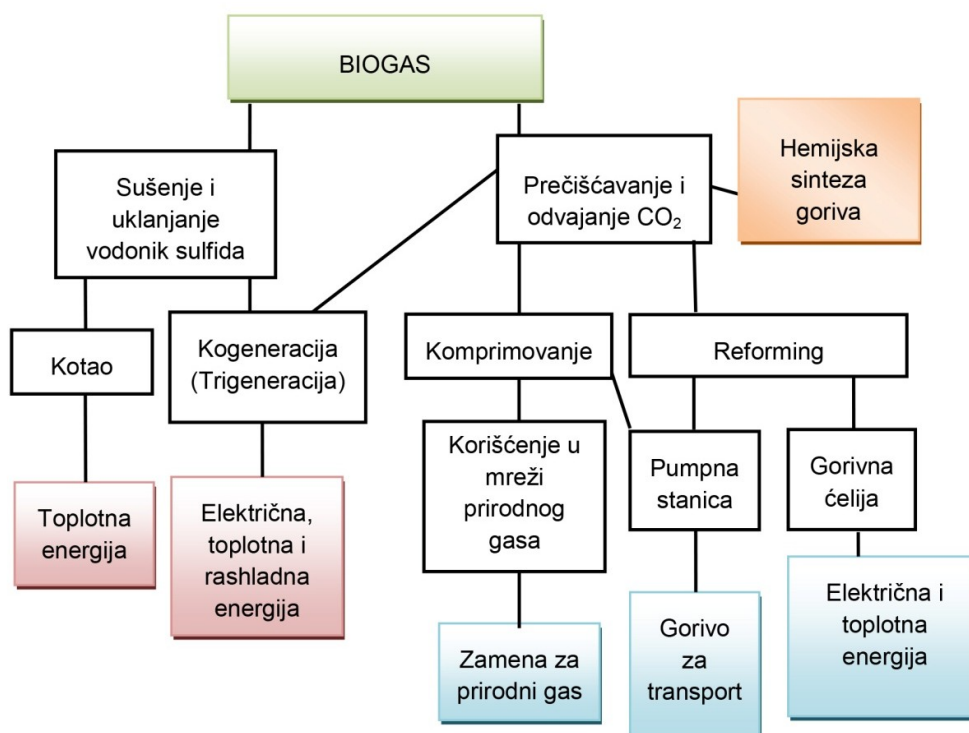
E-mail: ing.slobodancvetkovic@yahoo.com

Rad primljen: 15. 07. 2021.

Rad korigovan: 08. 09. 2021.

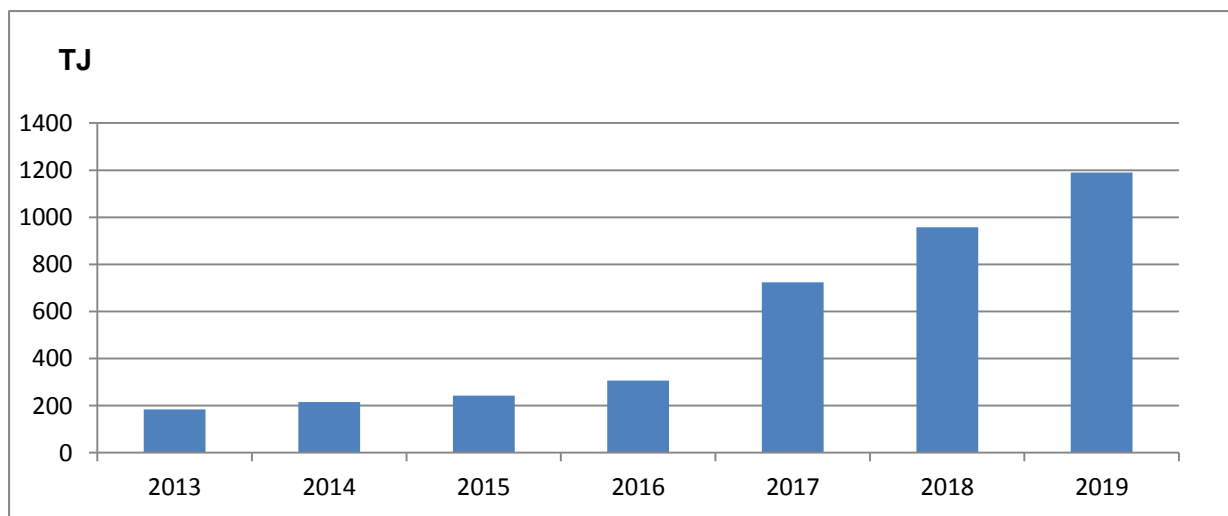
Rad prihvacen: 17. 09. 2021.

Rad je dostupan na sajtu: www.idk.org.rs/casopis



Slika 1. Šematski dijagram puteva za korišćenje biogasa sa procesom predtretmana [5]

Figure 1. Schematic diagram of pathways for utilization of biogas with pretreatment process [5]



Slika 2. Proizvodnja primarne energije iz biogasa u Srbiji u periodu od 2013. do 2019. godine [6]

Figure 2. Primary energy production from biogas in Serbia in a period from 2013 to 2019 [6]

Biogas se može koristiti u kotlovima direktno za proizvodnju tople vode ili pare. Takođe, proizvedeni biogas iz anaerobne digestije može se koristiti u miksu sa prirodnim gasom za proizvodnju toplotne energije. Cena proizvodnje biogasa za dobijanje toplotne energije nije konkurentna ceni prirodnog gasa pa se bez državnih podsticaja ova opcija manje koristi na biogasnim postrojenjima. Proiz-

vedena topla voda ili para, mogu se koristiti za grejanje digestora ili se koriste u drugim sistemima (grejanje stambenih i drugih površina, staklenici i dr). Kada se biogas koristi za proizvodnju toplotne energije, preporuka je da koncentracija vodonik sulfida ne prelazi 1.000 ppm [7]. Vodena para iz biogasa može prouzrokovati probleme u mlaznici gasa i treba je pre toga ukloniti. U ovom procesu stepen energetske efikasnosti iznosi 80 do 90% [8].

Istraživanja energetskih tokova u životnom ciklusu biogasa

Analiza životnog ciklusa (eng. Life Cycle Assessment-LCA), procenjuje uticaj određenih procesa, proizvoda i njihovih aktivnosti na životnu sredinu. Analiza u ovom radu obuhvata obezbeđenje i pripremu sirovina, proces proizvodnje, transport, distribuciju, ponovno korišćenje, reciklažu, odlaganje proizvoda ili kraj proizvodnog procesa.

Analiza energetskih tokova u životnom ciklusu (LCEA), određuje energetske performanse posmatranog energetskog sistema. Jedan od načina za procenu energetskih performansi biogas postrojenja u LCEA je određivanje odnosa dobijene izlazne energije sa ulaznom (uloženom) primarnom energijom [9] za različite faze u životnom ciklusu biogasnog postrojenja. Seppälä i saradnici [9] izučavali su energetske performanse biogasnog postrojenja kroz životni ciklus, gde se biogas proizvodio iz kodigestije stajnjaka krava sa travom, ostacima šećerne repe i slame. Dobijeno je da odnos izlazne energije i ulazne (uložene) primarne energije za različite faze u životnom ciklusu biogasnog postrojenja ima vrednosti od 3.5 do 8.2. U prikazanoj analizi, energetski ulaz je obuhvatio uzgoj useva, transport, anaerobnu digestiju i prečišćavanje biogasa, dok je izlazna energija bila proizvedena toplota, električna energija i energetski sadržaj u biometanu. Ovo istraživanje uključivalo je direktne energetske inpute, kao i indirektnu energiju za proizvodnju veštačkih đubriva koja su korišćena za uzgoj biljnih kultura.

Prade i saradnici [10] razmatrali su energetske karakteristike biogasnog postrojenja kroz životni ciklus, gde se kao sirovina za proizvodnju biogasa koristila industrijska konoplja. Dobijeno je da je odnos dobijene izlazne energije i ulazne (uložene) primarne energije za različite faze u životnom ciklusu korišćenja biogasa bio od 2.6 do 2.7. Ulazna energija obuhvatila je direktnu i indirektnu energiju uloženu u uzgoj konoplje, žetvu, transport, anaerobnu digestiju, prečišćavanje biogasa i korišćenje digestata kao đubriva, dok je izlazna energija obuhvatila energiju dobijenu iz biogasa u kogeneraciji i saobraćaju.

Pöschl i saradnici [11] u svojim istraživanjima odredili su energetske efikasnost biogasnog postrojenja u LCEA, odnosom uložene i izlazne primarne energije. Njihovo istraživanje je uključilo uzgoj useva, tretman, sakupljanje i transport sirovina, rad biogasnog postrojenja, upotrebu biogasa, kao i dobijanje i upotrebu digestata u ulaznu primarnu energiju. Energetski izlaz dat je kao energetski sadržaj u biogasu i odnos uložene primarne energije i izlazne energije, koji je bio u rasponu od 0.105 do 0.64 u zavisnosti od sirovine za anaerobnu digestiju i načina korišćenja biogasa.

U studiji Cropgen [12], kao indikator energetskih performansi biogasnih postrojenja u životnom ciklusu, korišćena je razlika između izlazne energije i ulazne (uložene) primarne energije u biogasno postrojenje.

U istraživanjima Havukainen i saradnika [13] energetske karakteristike biogasnog postrojenja kroz životni ciklus, određene su odnosom neto izlazne energije i ukupne suve materije sirovina za anaerobnu digestiju i koji je iznosio od 4 do 7 MJ/kg suve materije ulazne sirovine za anaerobnu digestiju.

Cilj istraživanja u ovom radu bio je evaluacija energetskih tokova u životnom ciklusu biogasnog postrojenja za proizvodnju toplotne energije i određivanje njihovih odnosa, počev od proizvodnje kukuruzne silaže, transporta stajnjaka krava, anaerobne digestije i proizvodnje biogasa, do korišćenja čvrstog i tečnog digestata na poljoprivrednom zemljištu za proizvodnju silaže. Za energetske analizu biogasnog sistema korišćena su četiri energetska indikatora. Rezultati istraživanja u ovom radu dobijeni su na osnovu realnih podataka iz biogasnog postrojenja Mirotin Energo u Vrbasu.

2. MATERIJALI I METODE

Razmatranje energetskih tokova u životnom ciklusu biogasa u ovom istraživanju sprovedeno je u skladu sa preporukama ISO 14040, 2006 [14] i ISO 14044, 2006 [15] i zasnovano je na podacima dobijenim merenjem ili procenom na biogasnom postrojenju Mirotin u Vrbasu.

2.1 Materijali

2.1.1 Opis industrijskog sistema izabranog za LCEA

Mirotin-Energo d.o.o. je vlasnik biogasnog postrojenja snage 1.5 MW_e i koje u svom vlasništvu ima 5.000 ha poljoprivrednog zemljišta, kao i farmu sa oko 2.000 krava za proizvodnju mleka. Na ovom biogasnom postrojenju primenjena je tehnologija, čiji fermentor je realizovan sa dva koncentrična kruga (prečnik 42 i 24 metra) i koji obezbeđuje uštedu energije od 8-10% u odnosu na klasična rešenja. Kao sirovine za proizvodnju biogasa u postrojenju koriste se kukuruzna silaža i stajnjak sa farme krava. Proizvedeni biogas se koristi u kogenerativnom uređaju za proizvodnju toplotne i električne energije. Proizvedena električna energija se isporučuje nacionalnoj energetske mreži.

Za proizvodnju kukuruzne silaže potrebno je obezbediti opremu i sredstva koja zahtevaju uloženu energiju u vidu fosilnih goriva za poljoprivredne mašine, indirektno energije (zaštita bilja, đubrivo i seme) i ljudskog rada. Na farmi krava kompanije Mirotin generiše se značajna količina stajnjaka koji se skladišti u sabirne tankove i transportuje do

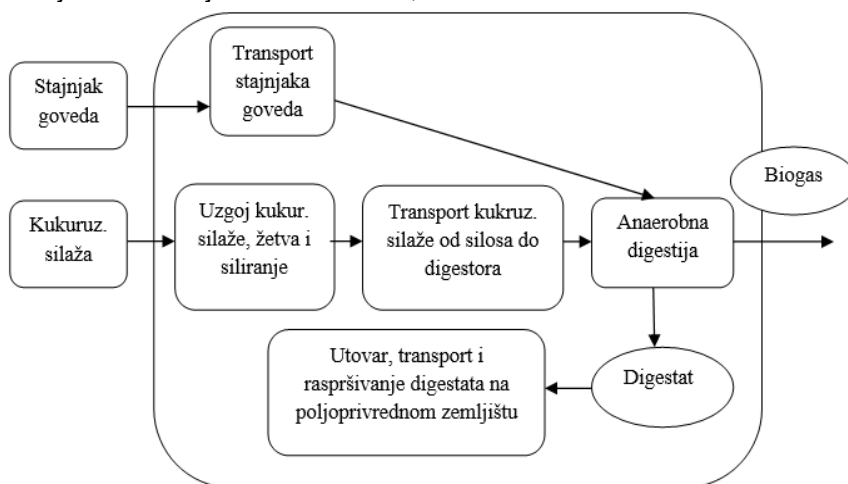
biogas postrojenja pumpom snage 15 kW. Tokom procesa anaerobne digestije održava se temperatura mezofilnog procesa konstantnom, između 37 i 40 °C. Takođe, neophodno je obezbediti električnu energiju za mešanje sirovog materijala u anaerobnom digestoru. Dobijena gasna smeša (biogas) prosečno sadrži od 50 do 55% metana sa energetskim sadržajem od 19 do 22 MJ/m³_N. Nakon procesa separacije u postrojenju se dobija digestat u čvrstoj i tečnoj formi. Digestat se transportuje do poljoprivrednog zemljišta na udaljenosti do 10 km,

distribuirano po tlu i koristi za uzgoj poljoprivrednih kultura.

2.2. Metod

2.2.1. Granica sistema za LCEA

U ovom radu pretpostavljen je i definisan scenario (E1) za korišćenje biogasa za proizvodnju toplotne energije sa granicama sistema za LCEA, koje su prikazane na slici 3.



Slika 3. Granice sistema za LCEA analizu u scenariju (E1)

Figure 3. System boundaries for LCEA analysis in scenario (E1)

U ovom scenariju pretpostavljeno je da se za uzgoj kukuruzne silaže kao đubrivo koriste čvrsti i tečni digestat nastali u biogasnom proizvodnji. Takođe pretpostavljeno je da se energija za grejanje anaerobnog fermentora uvodi iz energetskog sistema izvan granice za LCEA. Proizvedeni biogas se dalje koristi u kotlovima za proizvodnju toplotne energije. U scenariju je pretpostavljeno i da će se sirovine za anaerobnu fermentaciju (kukuruzna silaža i kravlji stajnjak), proizvoditi na poljoprivrednom zemljištu i farmi u vlasništvu kompanije Mirotin.

Korišćenje biogasa za proizvodnju toplotne energije u ovom scenariju predstavlja najjednostavniju tehnološku opciju u odnosu na druge mogućnosti korišćenja biogasa za dobijanje energije kao što su kogeneracija, dobijanje komprimovanog biometana ili hemijska konverzija biogasa u vodonik i druge energente. Ove tehnologije sadrže dodatne energetske ulaze koji smanjuju stepen energetske efikasnosti u odnosu na sistem gde se biogas koristi za proizvodnju toplotne energije.

2.2.2. Materijalno i energetsko bilansiranje biogasnog procesa

U cilju uspostavljanja modela biogasnog postrojenja i analize energetskih tokova u predloženom scenariju u ovom poglavlju izvršena je analiza

materijalnih tokova i definisani su energetski ulazi u posmatranoj granici biogasnog sistema. Maseni tokovi analizirani na biogasnom postrojenju Mirotin su: M_1 maseni bilans kravljeg stajnjaka (26.800 t/godišnje); M_2 maseni bilans kukuruzne silaže (10.363 t/godišnje); M_3 maseni bilans ukupnog digestata (30.930 t/godišnje); M_4 maseni bilans tečnog digestata (24.470 t/godišnje); M_5 maseni bilans čvrstog digestata (6.434 t/godišnje) i M_6 zapreminski protok biogasa (3.903.163 m³_N/godišnje). Udeo suve materije u stajnjaku krava bio je 22%, dok je udeo suve materije u kukuruznoj silaži iznosio 32%. Pretpostavljeni udeo metana u proizvedenom biogasu u ovom radu iznosio je 53,5%.

Definisanje ulaznih energetskih tokova i proračun energetskog bilansa

U LCE analizi razmatrana su dva oblika energije: direktna i indirektna energija. Direktna energija je energija koja se koristi u samom procesu proizvodnje kukuruzne silaže, kao što je fosilno gorivo koje koriste poljoprivredne mašine (traktori, kombajni i dr.), kao i električna i toplotna energija neophodne za proizvodni sistem dobijanja biogasa. Indirektnu energiju predstavlja energija neophodna za sirovine korišćene u proizvodnji kukuruzne silaže (đubrivo, seme i dr.).

Prema EU direktivi o obnovljivim izvorima energije [16], energija utrošena za izradu mašina i opreme nije uključena u ovu analizu. Takođe, kao energetski ulaz, u diskusiji nije uključen, ni ljudski rad.

Energetske karakteristike pretpostavljenog scenarija određene su na četiri načina, korišćenjem sledećih indikatora [13,17]:

- Razlika izlazne energije i ukupne primarne ulazne energije, gde je izlazna energija energetski sadržaj biogasa, dok ulazna primarna energija predstavlja zbir utrošene primarne energije za biogasno postrojenje unutar granica sistema za LCEA (energetski bilans);
- Odnos izlazne energije i ulazne primarne energije (energetska efikasnost) (μ);
- Odnos izlazne energije i zbira parazitske električne energije i toplotne energije koje se koriste za proizvodnju biogasa (μ_p). Parazitska električna i parazitska toplotna energija predstavljaju električnu i toplotnu energiju dostavljenu izvan granice sistema za LCEA. Parazitska energija u scenariju (E1) sastoji se od: ulazne energije za transport stajnjaka, energije potrebne za proces anaerobne digestije i ulazne energije za razdvajanje digestata;
- Odnos energetskog bilansa i suve materije ulazne sirovine (E_{FTS}).

Prva dva indikatora su izabrana u cilju procene uticaja određenih procesa na energetske performanse biogasnog postrojenja, počev od snabdevanja materijalima za anaerobnu konverziju, preko anaerobne digestije, proizvodnje energije i energenata dobijenih iz biogasa pa do korišćenja digestata na poljoprivrednom zemljištu. Takođe, ovi pokazatelji karakterišu obnovljivost energije biogasa kao energenta.

Indikator koji predstavlja odnos izlazne energije i sume parazitske električne energije i toplotne energije, (μ_p), je izabran da pokaže potrebu za fosilnim gorivima u biogasnom postrojenju, imajući u vidu da su u Srbiji najvažniji izvori za proizvodnju električne energije i toplote fosilni izvori: ugalj i prirodni gas. Četvrti indikator povezuje energetske performanse biogas postrojenja sa fizičkim karakteristikama materijala za anaerobnu digestiju.

Energetski ulazi u posmatranom životnom ciklusu biogasnog postrojenja bili su:

- Energetski ulaz za proizvodnju useva, P_{crop} , u GJ. Energetski ulaz povezan sa mineralnim đubrivom korišćenim u proizvodnji kukuruzne silaže nije uključen u proračun jer se pretpostavlja da će mineralno đubrivo biti kompletno zamenjeno digestatom. Energetski ulaz za mineralno đubrivo u kultivaciji kukuruzne silaže iznosi okvirno 8,3 GJ/ha [18], pa se energetski ulaz za proizvodnju kukuruz-

ne silaže umanjuje za ovu vrednost. Na osnovu poljoprivredne prakse u Republici Srbiji u ovom radu je usvojena vrednost prinosa kukuruzne silaže od 40 t/ha.

- Energetski ulaz za transport kukuruzne silaže, $P_{transp\ crop}$, u MJ. U ovom istraživanju usvojena je dužina transportnog puta kukuruzne silaže od 200 m.
- Energetski ulaz za transport stajnjaka krava, $P_{transp\ manure}$, u digestor je određen na osnovu merenja na licu mesta i iznosi 3.500 kWh/godišnje.
- Energetski ulaz za anaerobnu digestiju, $P_{digestion}$, je određen na osnovu podataka sa lica mesta u iznosu od 1.356 MWh/godišnje toplotne energije i 441 MWh/godišnje električne energije. $E_{digestion}$ je proračunata u vrednosti 6.469 GJ/godišnje u (E1).
- Energetski ulaz za separaciju digestata, $P_{digest\ sep}$, u MJ.
- Energetski ulaz za tečni digestat (utovar, transport i distribucija), P_{ldig} , u MJ. U ovom radu usvojena je dužina transporta tečnog digestata od 7 km.
- Energetski ulaz za čvrsti digestat (utovar, transport i distribucija), P_{sdig} , u MJ. U ovom radu usvojena je dužina transporta od 3 km.

Navedeni energetski ulazi određeni su prema bilansu mase u biogasnom postrojenju Mirotin i specifičnim unosima energije koji su dati u tabeli 1.

Tabela 1. Specifični ulazi energije koji su korišćeni za određivanje različitih unosa energije

Table 1. Specific energy inputs used for determination of different energy inputs

	GJ/ha	MJ/t	MJ/t·km	Izvor
K_1	16,6			[12]
K_2	/		12,6	[19,20]
K_3	/	78,6	/	[20,21]
K_4	/	0,63	/	[20,23]
K_5			2,84	[20,23]
K_6	/	20,16	/	[20,23]
K_7	/	3,78	/	[11]
K_8	/		3,15	[11]
K_9	/	25,83	/	[11]

K_1 energetski ulaz za proizvodnju kukuruzne silaže po hektaru obradive površine;

K_2 energetski ulaz za transport kukuruzne silaže po toni i kilometru (MJ/(t·km));

K_3 ulazna energija za separaciju digestata po toni digestata;

K_4 energetski ulaz za utovar tečnog digestata;

K_5 energetski ulaz za transport tečnog digestata;

K_6 energetski ulaz za distribuciju tečnog digestata;

K7 energetski ulaz za utovar čvrstog digestata;
K8 energetski ulaz za transport čvrstog digestata;
K9 energetski ulaz za distribuciju čvrstog digestata.

Energetsko bilansiranje

Energetski bilans za (E1), E_{b1} , računat je iz izraza:

$$E_{b1} = E_{out1} - E_{in1} \quad (1)$$

$$E_{in1} = E_{crop} + P_{transp\ crop} + P_{trans\ manure} + P_{digestion} + P_{digest\ sep} + P_{ldig} + P_{sdig} \quad (2)$$

$$E_{out1} = 0.535 \cdot M_6 \cdot LHV_{CH_4} \quad (3)$$

Gde LHV_{CH_4} donja toplotna moć biometana koja je iznosila 35.8 MJ/m^3

μ_1 je u ovom scenariju izračunat kao:

$$\mu_1 = E_{out1}/E_{in1} \quad (4)$$

μ_p je u ovom scenariju izračunat kao:

$$\mu_p = E_{out1}/(P_{transp\ manure} + P_{digestion} + P_{digest\ sep}) \quad (5)$$

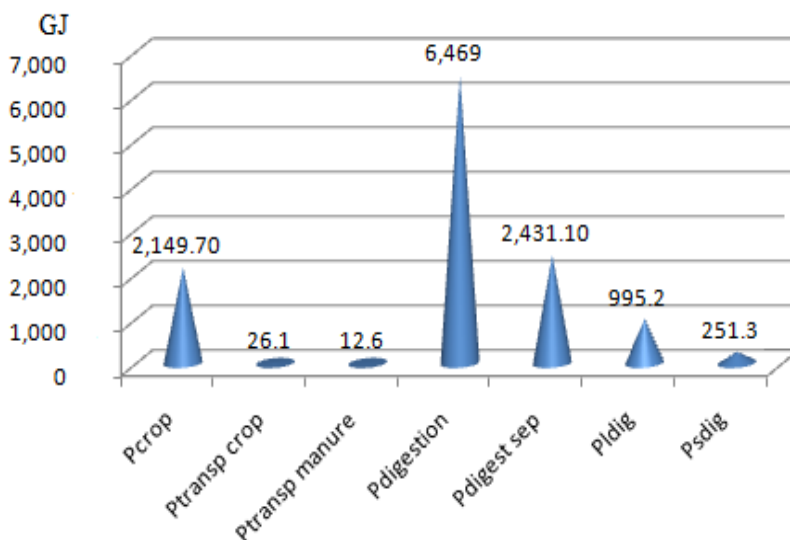
E_{FTS} je u (E1) dobijen iz:

$$E_{FTS} = E_{b1}/M_{FTS} \quad (6)$$

M_{FTS} (ukupna suva materija) je iznosila 9.212 t u ovom radu.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Rezultati proračuna za scenario (E1) pokazuju da ukupan energetski ulaz iznosi 12.335 GJ , a struktura energetskih ulaza prikazana je na slici 4.



Slika 4. Energetski ulazi u scenariju (E1)

Figure 4. Energy inputs in scenario (E1)

Kako se vidi sa slike 4, vrednost energetskog ulaza za proces anaerobne digestije je najveća i iznosi 52.44% ukupnog energetskog ulaza. Ovaj scenario ima pozitivan energetski bilans od 62.418 GJ (tabela 2).

Tabela 2. Izračunati enregetski indikatori u scenariju (E1)

Table 2. The calculated energy indicators in scenario (E1)

E_{b1} (GJ)	μ_p	E_{FTS} (MJ/kg)
62.418	8,37	6,77

Rezultat za energetsku efikasnost (μ) iznosi $6,1$ (tabela 3) i pokazuje da je sa energetskog aspekta ovaj scenario održiv. U (E1) pretpostavljeno je da će se digestat koristiti za proizvodnju silaže. Na taj način značajno je smanjena energija potrebna za proizvodnju kukuruzne silaže, jer digestat zamenjuje veštačko đubrivo koje ima visoku indirektnu

potrošnju energije usled korišćenja prirodnog gasa u proizvodnom procesu.

Rezultat za energetsku efikasnost dobijen u analizi scenarija (E1) pokazuje dobro slaganje sa drugim radovima (tabela 3) (10-12,24,25) koji su analizirali energetsku efikasnost u životnom ciklusu proizvodnje toplotne energije iz biogasa, u kojima su dobijene vrednosti energetske efikasnosti u opsegu od $1,5$ do $13,1$. Manje vrednosti koje su dobijene u citiranim radovima, mogu se objasniti različitim izborom granice sistema za LCE analizu, kao i različitim sirovinama koje su se koristile u anaerobnoj digestiji. U posmatranim radovima najveći udeo energetskog ulaza odnosi se na kultivaciju biljnih kultura i proces anaerobne digestije. Različite biljne kulture u uzgoju imaju različite potrebe za korišćenjem mineralnih đubriva koja imaju veliki indirektni energetski ulaz, što dovodi do smanjenje energetske efikasnosti posmatranog biogasnog sistema. Današnji biogas

reaktori troše do 30% energije dobijenog biogasa [11] u cilju obezbeđenja potrebne temperature za anaerobnu digestiju. U studiji [11] i ovom radu pretpostavljeno je da se energija za anaerobni

fermentor obezbeđuje iz sistema van granice za LCEA, dok se u ostalim posmatranim radovima ta energija obezbeđuje iz sistema unutar granice za LCEA.

Tabela 3. Energetska efikasnost u životnom ciklusu biogasa za proizvodnju toplotne energije u različitim radovima

Table 3. Energy efficiency in a life cycle of biogas for heat production in different studies

Pöschl i saradnici [11]	Prade i saradnici [10]	Uellendahl i saradnici [24]	Cropgen [12]	Berglund i Börjesson [25]	Ovaj rad
1,5-9,52	2,6-2,7	6,8-13,1	2,1-3,9	2,5-5	6,1

Rezultat za energetska efikasnost (6,1) dobijen u (E1), znatno je veći od vrednosti energetske efikasnosti (0,83-0,93), koje se dobijene u LCEA analizama koje su razmatrale korišćenje fosilnih izvora (ugalj, nafta, prirodni gas) za proizvodnju toplotne energije [26].

U scenariju (E1), μ_p , je određen prema jednačini (5) i bio je 8,37 (tabela 2), što znači da parazitska energija predstavlja 11,95% od ukupne izlazne energije. Dobijeni rezultat je u skladu sa vrednošću za parazitsku energiju (11%), dobijenu u studiji [12]. Najveći deo parazitske ulazne energije odnosi se na ulaznu energiju potrebnu za zagrevanje fermentora u kojem se odvija anaerobna digestija.

Vrednost dobijena za E_{FTS} u (E1) je određen prema jednačini (6) i iznosila je 6,77 MJ/kg suve materije ulazne sirovine (tabela 2) i u dobroj je korelaciji sa rezultatom dobijenim u istraživanjima Havukainen i saradnika [13], i gde je iznosio 4-7 MJ/kg suve materije ulazne sirovine.

U energetskom proračunima za pretpostavljeni scenario korišćene su različite pretpostavke i aproksimacije, koje mogu dovesti do određenog stepena nesigurnosti u sprovedenim proračunima. Procenjeni prinos kukuruzne silaže od 40 t/ha zasnovan je na nepotpunim agrotehničkim merama koje se primenjuju na poljoprivrednom zemljištu i koje su karakteristične za poljoprivrednu proizvodnju u Republici Srbiji. Aproksimacija dužine transporta tečnog i čvrstog digestata do poljoprivrednog zemljišta, takođe može uticati na određene nesigurnosti pri određivanju realnih energetskih ulaza ovih faza životnog ciklusa biogasa. Proračun energetskog izlaza zasnovan na donjoj toplotnoj moći biometana, može takođe uneti izvesne nesigurnosti u proceni energetskog izlaza u scenariju.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu kroz primenu četiri indikatora izvršena je evaluacija energetskih tokova u životnom ciklusu biogasnog postrojenja za proizvodnju toplotne energije (scenario E1), počev od proizvodnje kukuruzne silaže, transporta stajnjaka, anaerobne digestije i proizvodnje biogasa, do koriš-

ćenja čvrstog i tečnog digestata za proizvodnju silaže. Dobijeni rezultati pokazali su da ovaj scenario ima pozitivan energetski bilans od 62.418 GJ i energetska efikasnost od 6,1. Ovi rezultati ukazuju da je vrednost energije sadržana u biogasu za proizvodnju toplotne energije (obnovljiva energija), znatno veća od primarno uložene fosilne energije u prethodnim fazama životnog ciklusa, što rezultuje smanjenom emisijom u životnu sredinu iz posmatranog energetskog sistema. Rezultati ove analize zasnivaju se na podacima sa realnog biogas postrojenja Mirotin u Vrbasu što omogućava da se prošire postojeće baze podataka za buduću energetska analizu biogasnih postrojenja u cilju proizvodnje toplotne energije.

Zahvalnica/Acknowledgements

Autori se zahvaljuju kompaniji Mirotin, Vrbas za pomoć u realizaciji ove studije.

5. LITERATURA

- [1] A.O.Avcioğlu, M.A.Dayıoğlu, U.Türker (2019) Assessment of the energy potential of agricultural biomass residues in Turkey, *Renew. Energy*, 138, 610-619.
- [2] A.Welfle, P.Thornley, M.Roder,(2020) A review of the role of bioenergy modelling in renewable energy research & policy development, *Biomass Bioenergy*, 136, 105542.
- [3] Ourworlddata. (<https://ourworldindata.org/renewable-energy>) (3.7.2021.)
- [4] A.Hagen, H.Langnickel, X.Sun (2019) Operation of solid oxide fuel cells with alternative hydrogen carriers, *Int. J. Hydrogen Energy*, 44, 18382- 18392.
- [5] M.Martinov, K.Kovacs, Đ.Đatkov (2012) Biogas technology, Faculty of Technical Science, Novi Sad.
- [6] Zavod za statistiku RS (<https://www.stat.gov.rs/media/5769/bilans-biogasa-2019.pdf>) (3.7.2021.)
- [7] Q.Sun, H.Li, J.Yan, L.Liu, Z.Yu, X.Yu (2015) Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 51, 521-532.
- [8] R.Kapoor, P.Ghosh, B.T.Virendra, K.Vijay, V.Vijay, I.S.Thakur, H.Kamyab, D. DucNguyen, A.Kuma (2020) Advances in biogas valorization and utilization systems: A comprehensive review, *J. Clean. Prod.*, 273, 123052.

- [9] M.Seppälä., T.Paavola, A.Lehtomäki, O.Pakarinen, J.Rintala (2008) Biogas from energy crops—optimal pre-treatments and storage, co-digestion and energy balance in boreal conditions, *Water Sci. Technol.*, 58, 1857-1863.
- [10] T.Prade, S.E.Svensson, J.E.Mattsson (2012) Energy balances for biogas and solid biofuel production from industrial hemp, *Biomass Bioenergy*, 40, 36–52.
- [11] M.Pöschl, S.Ward, P.Owende (2010) Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways, *Appl. Energy*, 87, 3305–3321.
- [12] Cropgen 2007. University of Vienna (2007) An overall energy balance for energy production taking into account energy inputs associated with farming.
- [13] J.V.Havukainen, V.Uusitalo, A.Niskanen, V.Kapustina, M.Horttanai (2014) Evaluation of methods for estimating energy performance of biogas production, *Renew. Energy*, 66, 232-240.
- [14] ISO 14044 (2006) Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. International Organization for Standardization.
- [15] ISO 14040 (2006) Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. International Organization for Standardization.
- [16] Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources.
- [17] S.Cvetković, T.Kaludjerović Radoičić, B.Vukadinovic, M.Kijevčanin (2016) A life cycle energy assessment for biogas energy in Serbia, *Energy Sources Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 38(20), 3095–3102.
- [18] A.Salter, C.Banks (2009) Establishing an energy balance for crop-based digestion. *Water Sci.Technol.*, 59, 1053-1060.
- [19] P.A.Gerin, F.Vliegen, J.M.Jossart (2008) Energy and CO₂ balance of maize and grass as energy crops for anaerobic digestion, *Bioresour. Technol.*, 99, 2620–2627.
- [20] KTBL (2008) Association for Technology and Structures in Agriculture. Diesel fuel consumption during agricultural processes.
- [21] A.Lootsma, T.Raussen (2008) Current practise for pre-treatment and utilization of digestate. *Kasseler Abfall - und Bioenergieforum*, Germany: Witzenhausen.
- [22] C.Becker, H.Döhler, H.Eckel, N.Fröba, T.Georgieva, J.Grube, S.Hartmann, A. Hauptmann, P.Jäger, S.Klages, S.Kröttsch, N.Sauer, S.Nakaki, A.Niebaum, U.Roth, B. Wirth, S.Wulf, Y.Xin (2007) Empirical values for biogas. 1st ed. Germany: Darmstadt.
- [23] KTBL (2009) Association for Technology and Structures in Agriculture (KTBL). Business planning agriculture 2008/09 – data for business planning in agriculture. Germany: Darmstadt.
- [24] H.Uellendahl, G.Wang, H.Møller, U.Jørgensen, I.V.Skiadas, H.N.Gavala, B.K.Ahring (2008) Energy balance and cost-benefit analysis of biogas production from perennial energy crops pretreated by wet oxidation, *Water Sci. Technol.*, 58(9), 1841-1847.
- [25] M.Berglund, P.Börjesson (2006) Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production, *Biomass Bioenergy*, 30, 254–266.
- [26] N.D.Mortimer (1991) Energy analysis of renewable energy sources, *Energy Policy*, 19 (4), 374-385.

ABSTRACT

BALANCING OF ENERGY FLOWS IN A LIFE CYCLE OF THERMAL ENERGY PRODUCTION FROM BIOGAS

Biogas is a promising source for energy production in future energy systems. In this paper, the energy flows in the life cycle of a real biogas plant (Mirotin-Vrba) for thermal energy production were considered, starting from corn silage production, cow manure transport, process of anaerobic digestion and biogas production, to the use of solid and liquid digestate for production of crops. Four energy indicators were used to evaluate energy flows in this work. The obtained results showed that this biogas system has a positive energy balance of 62.418 GJ and an energy efficiency of 6,1, which indicates that in terms of substitution of fossil fuel consumption, this system for heat production is a good alternative.

Key words: biogas, heat energy, life cycle, energy, energy efficiency.

Scientific paper

Paper received: 15. 07. 2021.

Paper corrected: 08. 09. 2021.

Paper accepted: 17. 09. 2021.

Paper is available on the website: www.idk.org.rs/journal