

## **Biogas tehnologija u funkciji proizvodnje energije**

### **Biogas technology in the function of energy production**

*Slobodan Cvetković<sup>1</sup>, Mina Popović<sup>2</sup>, Verica Ljubić<sup>3</sup>, Jovana Perendija<sup>4\*</sup>*

<sup>1,2,3,4</sup>Univerzitet u Beogradu, Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju, Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Njegoševa 12, 11000 Beograd, Srbija / University of Belgrade, Institute of Chemistry, Technology and Metallurgy, National Institute of the Republic of Serbia, Njegoševa 12, 11000 Belgrade, Serbia

\*Autor za prepisku / Corresponding author

Rad primljen / Received: 05.07.2022, Rad prihvaćen / Accepted: 07.11.2022.

**Sažetak:** Potreba za smanjenjem upotrebe fosilnih goriva, zbog štetnog uticaja na životnu sredinu i sve veća potražnja za energijom, doveli su do proizvodnje energije iz obnovljivih izvora. Pristup čistoj i obnovljivoj energiji postao je imperativ za društveni napredak. Poboljšanje postojećih resursa biomase u efikasne nosioce energije kao što je biogas iz anaerobne digestije ima potencijal da obezbedi čistu i pouzdanu energiju, uz zaštitu životne sredine, racionalno korišćenje prirodnih resursa i stvaranje novih radnih mesta. Uz smanjenje emisije gasova staklene bašte, biogas poboljšava energetska sigurnost i, kao obnovljivi izvor energije, omogućava eksploataciju otpadnih tokova. Biogas proizveden u sistemu anaerobne digestije se obično sagoreva u kogeneracionoj jedinici da bi se proizvela toplota, električna energija i energija za hlađenje. Konačno, biogas se može prečistiti u biometan, koristiti kao gorivo u vozilima ili ubrizgati u nacionalne mreže prirodnog gasa. Digestat kao nusproizvod anaerobne digestije je pouzdan materijal za upotrebu kao đubrivo u poljoprivredi. U ovom radu sumirano je korišćenje biogasa za proizvodnju toplotne, električne energije, rashladne energije, kao i goriva sa pregledom postojećih tehnologija za njegovu upotrebu. Takođe, ovaj rad pruža priliku da se razmotri uloga biogasa u budućim energetska sistemima.

**Ključne reči:** biogas, obnovljivi izvori, otpad, anaerobna digestija, kogeneracija, proizvodnja energije, biometan, energetska sigurnost, zaštita životne sredine.

**Abstract:** The need to reduce the use of fossil fuels, due to the harmful impact on the environment and the growing energy demand, have led to the production of energy from renewable sources. Access to clean and renewable energy has become imperative for social progress. Improving existing biomass resources into efficient energy carriers such as biogas from anaerobic digestion has the potential to provide clean and reliable energy, with environmental protection, rationally using natural resources and generation of new jobs. Along with reducing greenhouse gas emissions, biogas improves energy security and, as a renewable energy source, enables the exploitation of waste streams. Biogas produced in an anaerobic digestion system is usually burned in a cogeneration unit to produce heat, electricity, and cooling energy. Finally, biogas can be purified into biomethane, used as a fuel for vehicles, or injected into national natural gas networks. Digestate as a by-product of anaerobic digestion is a reliable material for use as a fertilizer in agriculture. This paper summarizes the use of biogas for the production of heat, electricity, cooling energy, as well as fuel with an overview of existing technologies for its use. Also, this paper provides an opportunity to consider the role of biogas in future energy systems.

**Keywords:** biogas, renewable sources, waste, anaerobic digestion, cogeneration, energy production, biomethane, energy security, environmental protection.

<sup>1</sup>[orcid.org/0000-0003-4417-4443](https://orcid.org/0000-0003-4417-4443), email: [slobodan.cvetkovic@ihtm.bg.ac.rs](mailto:slobodan.cvetkovic@ihtm.bg.ac.rs),

<sup>2</sup>[orcid.org/0000-0003-4795-6950](https://orcid.org/0000-0003-4795-6950), email: [mina.popovic@ihtm.bg.ac.rs](mailto:mina.popovic@ihtm.bg.ac.rs),

<sup>3</sup>[orcid.org/0000-0002-8648-6421](https://orcid.org/0000-0002-8648-6421), email: [verica.ljubic@ihtm.bg.ac.rs](mailto:verica.ljubic@ihtm.bg.ac.rs),

<sup>4</sup>[orcid.org/0000-0002-6318-9053](https://orcid.org/0000-0002-6318-9053), email: [j.nikolic.ihtm@tesla.rcub.bg.ac.rs](mailto:j.nikolic.ihtm@tesla.rcub.bg.ac.rs)

## UVOD / INTRODUCTION

Suočavanje sa klimatskim promenama zahteva brzu tranziciju sa fosilnih na obnovljive izvore energije u koje spada i biogas (Žikić et al., 2021). Sadašnji trendovi razvoja ukazuju da je biogas važna komponenta energetske miksa u mnogim državama Evrope i Azije (Rafiee et al., 2021; Scarlet et al., 2018). Tok viška materijala, koji je ranije smatran neupotrebljivim otpadom, iz poljoprivrede, industrijskih procesa i raznih ljudskih aktivnosti može se kroz proizvodnju biogasa transformisati u veoma korisne nosioce energije, organsko đubrivo obogaćeno hranljivim materijama ili u nove napredne materijale (Fagerström et al., 2018).

Biogas kao obnovljiv izvor energije dobija se postupkom anaerobne digestije, koja predstavlja biohemijski proces dekompozicije organskih molekula u anaerobnim uslovima. Proizvodnja bioenergije iz anaerobne digestije (AD) je obećavajuća tehnologija koja doprinosi smanjenju klimatskih promena i smatra se održivim postupkom za upravljanje otpadom. AD sistemi nude brojne značajne prednosti u smislu jednostavnih koraka održavanja i prilagodljivosti klimatskim uslovima većine zemalja. Tehnologija anaerobne digestije ima pozitivnu neto stopu proizvodnje energije, a gas metan proizveden iz ovog procesa ima tendenciju da zameni fosilna goriva.

Biogas kao finalni proizvod anaerobne digestije primarno se sastoji od metana i ugljen-dioksida uz manje količine vodene pare, vodonik sulfida, drugih manjih komponenata i elemenata u tragovima. Digestat je procesni ostatak organske sirovine koji nije mogao da se transformiše ovim procesom u biogas. Sastoji se od sporo razgradivih, stabilnih organskih komponenti kao što su lignin, azot i fosfor u različitim oblicima, zatim neorganskih soli koje sadrže amonijum i fosfatne jone, kalijum i druge minerale. Prednost dobijenog digestata je mogućnost njegove dalje upotrebe kao bio-đubriva za oplemenjivanje zemljišta.

Generisanje biogasa rezultat je uzastopnih reakcija, u kojima se početne sirovine kontinuirano razlažu na manje organske jedinice. Specifične vrste mikroorganizama uključene su u svakoj fazi pojedinačno. Anaerobna digestija sastoji se od četiri glavna procesna koraka: hidrolize, acidogeneze, acetogeneze i metanogeneze (Van et al., 2020). Svi ovi procesi odvijaju se u anaerobnom reaktoru (digestoru). Brzinu procesa anaerobne digestije određuje najsporija reakcija u lancu. Tokom razlaganja organskih sirovina, koje sadrže celulozu, hemicelulozu i lignin, hidroliza je najsporiji korak koji određuje brzinu procesa anaerobne digestije. U toku hidrolize sirovina proizvodi se relativno mala količina biogasa.

Ravnoteža različitih faza u procesu anaerobne digestije obično se objašnjava na osnovu nivoa vodonika u reaktoru, pri čemu se smatra da su niski nivoi ovog gasa neophodni da bi konverzija u metan bila termodinamički povoljna (González et al., 2018).

Biogas proizveden u sistemu anaerobne digestije se najčešće sagoreva u kogeneracionoj jedinici da bi se proizvela toplota za proces digestije i električna energija. Autori brojnih studija danas se fokusiraju na poboljšanje efikasnosti kogeneracije povratom toplote iz kogeneracione jedinice. Kogeneracija se smatra isplativom ako se krajnji korisnik nalazi na relativno maloj udaljenosti prenosa. Otpadna toplota iz kogeneracione jedinice može se koristiti za napajanje sistema za sušenje kako bi se smanjio sadržaj vlage u digestatu, čime se smanjuje zapremina, a samim tim i troškovi transporta i odlaganja digestata (Gebrezgabher et al., 2010). Rankinov ciklus sa organskim uljem je još jedna prilika za poboljšanje efikasnosti sistema kogeneracije povećanjem izlazne električne energije. Navedene tehnologije kao rešenja za smanjenje gubitaka energije su uveliko usvojene u postrojenjima širom sveta. Međutim, mnoge zemlje danas promovišu proizvodnju biometana koji će se ubrizgavati u mrežu prirodnog gasa i na kraju koristiti kao gorivo za transportni sektor. Biometan proizveden prečišćavanjem biogasa je poželjno biogorivo jer se sastoji uglavnom od metana. Korišćenje biogasa ne zahteva zamenu tradicionalnih motora na prirodni gas, a biogas se može lako skladištiti kao komprimovani gas ili u tečnom stanju (Caposciutti et al., 2020).

## 1. SIROVINE ZA PROIZVODNJU BIOGASA / FEEDSTOCKS FOR BIOGAS PRODUCTION

Kao sirovine za anaerobnu digestiju za proizvodnju biogasa mogu se koristiti različiti tipovi biomase. Najčešće se koriste sledeće sirovine:

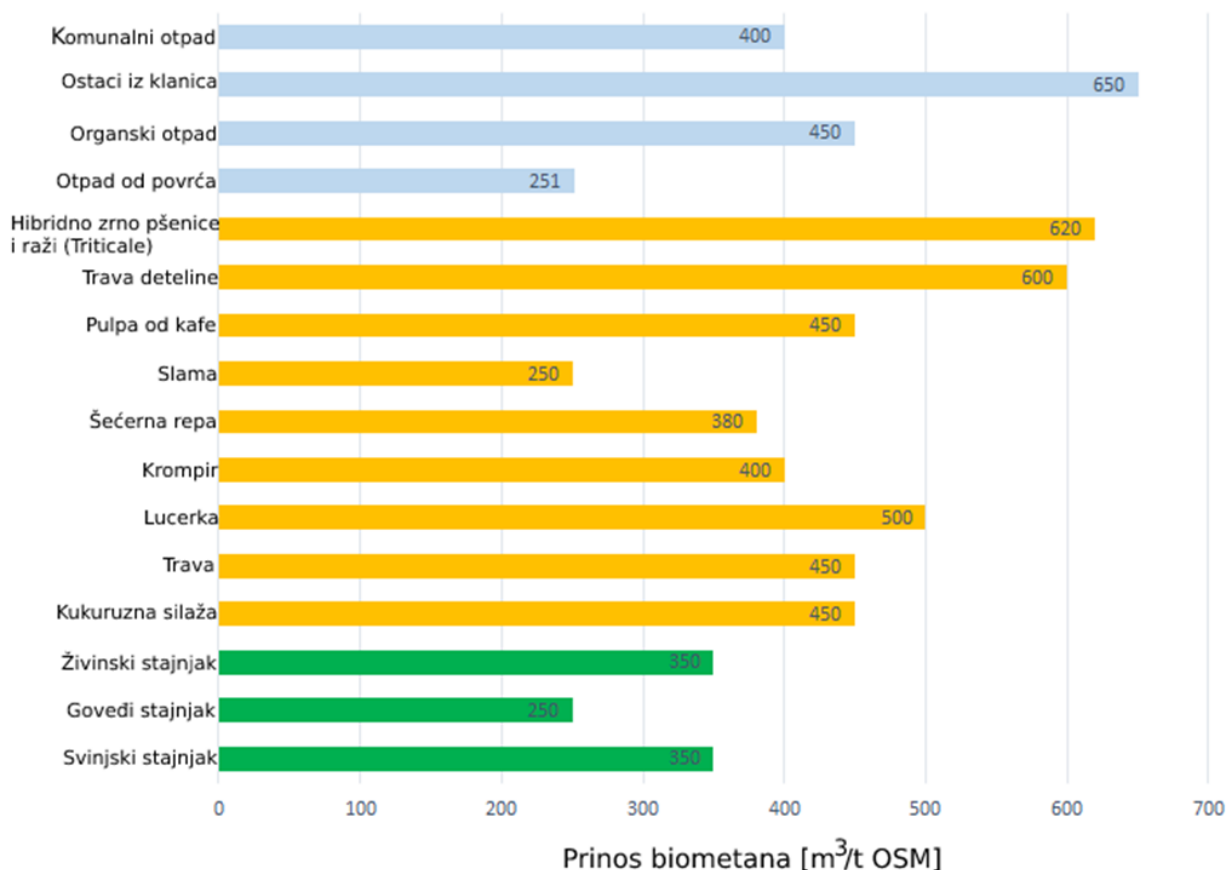
- stajnjak sa farmi,
- ostaci iz poljoprivredne proizvodnje,
- biorazgradivi organski otpad iz prehrambene i sličnih industrija,
- biorazgradiva frakcija komunalnog otpada i otpada iz ugostiteljstva (ostaci hrane),
- otpadne vode prehrambene industrije i otpadni muljevi iz postrojenja za tretman voda,
- energetske usevi (kukuruzna silaža, sirak, različite vrste trava).

Korišćenje stajnjaka za anaerobnu digestiju ima prednosti s obzirom na karakteristiku da prirodno sadrže anaerobne bakterije. Sirovine sa sadržajem suve materije (SM) manjim od 20%, koriste se za tzv. „mokru digestiju“. U tu kategoriju sirovina svrstavaju se stajnjak sa farmi kao i organski otpad iz prehrambene industrije sa visokim sadržajem vode.

Kada je u sirovini sadržaj SM oko 35% ili veći, proces digestije se naziva „suva digestija“, i tipičan je za anaerobnu digestiju energetskih useva i silažu. Izbor tipa i količine sirovine pogodne za digestiju zavisi od sadržaja SM, sadržaja šećera, masnoća i belančevina. Sirovine koji sadrže duže polimerne lance kao što su lignin, celuloza i hemiceluloza treba prethodno mehanički i hemijski pripremiti za proces anaerobne fermentacije.

Količina proizvedenog metana smatra se jednim od najvažnijih kriterijuma za procenu korišćenja

različitih vrsta sirovina. Stajnjak ima relativno malu proizvodnju metana po jedinici organske suve materije (slika 1), tako da se koristi u kodigestiji sa drugim sirovinama koje imaju visoku produkciju metana, u cilju povećanja proizvodnje biogasa. Uglavnom, to su ostatak hrane, industrije alkohola i otpadni tokovi iz pivara i industrije šećera, ili energetski usevi. Na slici 1 predstavljen je prinos biogasa po toni organske suve materije različitih sirovina za proizvodnju biogasa.



Slika 1 - Prinos biogasa po toni organske suve materije različitih sirovina  
Figure 1 - Biogas yield per ton of organic dry matter for different raw materials  
Izvor / Source: Awiszus et al. (2019); Scarlat et al. (2018)

## 2. BIOGAS KAO ENERGENENT / BIOGAS AS AN ENERGY SOURCE

Biogas nastao u anaerobnom reaktoru sadrži u najvećoj meri metan (50-80%) i ugljen-dioksid (20-50%). Tipičan hemijski sastav biogasa dat je u tabeli 1.

Tabela 1 - Tipičan sastav biogasa  
Table 1 - Typical biogas composition

Komponenta	Zapreminski udeo, %
Metan	50-80
Ugljen-dioksid	20-50
Vodena para	1-5
Kiseonik	0-1
Azot	0-1
Vodonik-sulfid	0-5000 ppm

Izvor / Source: Chen et al. (2015)

### 2.1. *Proizvodnja toplotne energije iz biogasa / Thermal energy production from biogas*

Proizvodnja toplotne energije u kotlovima predstavlja najjednostavniju opciju upotrebe biogasa kao energenta. 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 u kotlovima. Proizvedena 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. Kada je koncentracija veća, formirana sumporna kiselina može izazvati koroziju procesne opreme. Vodena para iz biogasa može prouzrokovati probleme u mlaznici gasa i treba je pre toga ukloniti. U ovim procesima stepen energetske efikasnosti iznosi 80 do 90% (Kaplan et al., 2021).

### 2.2 *Istovremena proizvodnja toplotne i električne energije iz biogasa / Simultaneous production of heat and electricity from biogas*

Istovremena proizvodnja električne i toplotne energije naziva se kogeneracija (eng. Combined Heat and Power - CHP). Pri proizvodnji električne energije uvek nastaje otpadna toplotna energija. Ova toplotna energija se nalazi u rashladnom fluidu koji se koristi za hlađenje uređaja za proizvodnju električne energije ili u produktima sagorevanja go-

riva. Da bi se iskoristila ova otpadna toplota koriste se različiti izmenjivači toplote. Primena biogasa u kogenerativnom procesu ima sledeće prednosti:

- visok stepen energetske efikasnosti do 90%. Kogenerativna postrojenja troše manje energije nego zasebne jedinice za proizvodnju toplotne ili električne energije,
- pouzdanost u radu, tako da u dužem vremenskom intervalu mogu da obezbede zadovoljavajući nivo kvaliteta isporučene toplotne i električne energije,
- smanjenje emisije u životnu sredinu,
- donose ekonomsku dobit usled korišćenja ili prodaje električne i toplotne energije.

Da bi se biogas koristio u kogenerativnim uređajima potrebno je odstraniti iz njega vodenu paru i vodonik sulfid u cilju zaštite opreme od korozije, ali i smanjenja emisije u životnu sredinu.

U kogenerativnim postrojenjima najviše se koriste gasni i dizel motori, gasne turbine, mikroturbine, Stirlingov motor, uređaji koji koriste Rankinov ciklus sa organskim uljem (eng. Organic Rankine Cycle process - ORC) i gorivne ćelije. Najviši stepeni efikasnosti postižu se pri korišćenju gorivnih ćelija, a najniži za kogenerativna postrojenja sa Stirlingovim motorom. Gorivne ćelije imaju najviši stepen efikasnosti, ali i najveću cenu. Primena konkretnih rešenja u biogasnim postrojenjima zavisi od veličine postrojenja, investicionih troškova, troškova održavanja i drugih faktora. U tabeli 2 date su karakteristike različitih kogenerativnih uređaja.

*Tabela 2 - Karakteristike jedinica za kombinovanu proizvodnju na bazi različitih tehnologija  
Table 2 - Characteristics of cogeneration units based on different technologies*

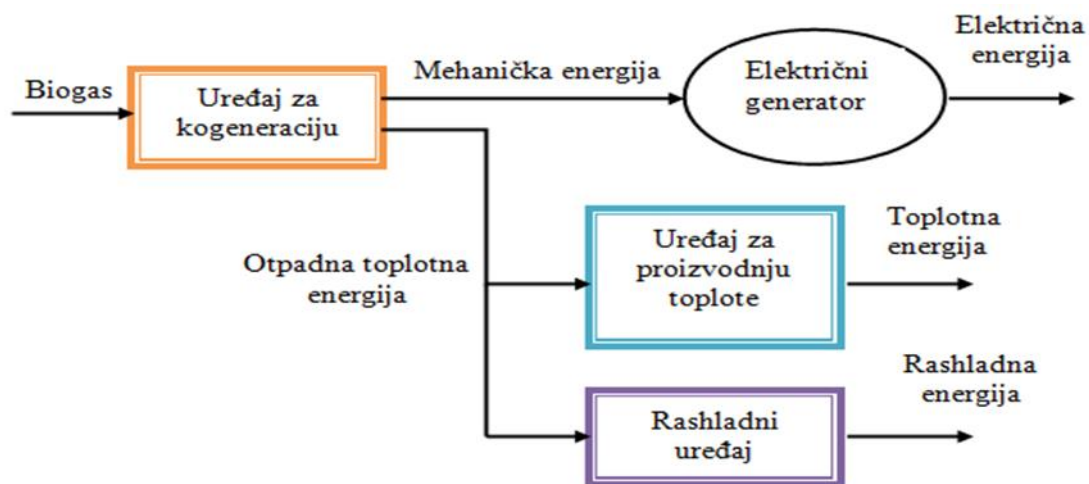
Sistem	Prednost	Nedostaci	Odnos proiz. toplote i elekt. energije	$\eta_e$ % $\eta_u$ %
Gasni motori	Visoki stepeni efikasnosti; Povoljni za uređaje niže snage.	Viša cena goriva.	1:1 do 1,3:1	39-42 85
Gasne turbine	Visoka pouzdanost; Mala emisija; Ne zahteva hlađenje.	Nizak stepen efikasnosti u proizvodnji el. energije pri niskim opterećenjima; Potencijalni zastoji; Visoki troškovi održavanja; Visoke investicije.	1,5:1 do 5:1	22-36 70-75
Mikro-turbine	Mogućnost upotrebe bilo koje vrste goriva; Brz start; Pouzdanost u radu.	Visoka cena; Nizak stepen efikasnosti u proizvodnji el. energije u poređenju s gasnim turbinama.	1 do 1,2:1	15-30 65-75
Gorivne ćelije	Niska emisija; Visoki stepeni efikasnosti pri svim opterećenjima.	Visoka vrednost investicije; Korišćenje skupog goriva.	0,5:1 do 1:1	40-70 80-90

$\eta_e$  - stepen efikasnosti u proizvodnji el. energije;  $\eta_u$  - ukupan stepen efikasnosti  
Izvor / Source: Martinov et al. (2012)

### 2.3. Korišćenje biogasa u trigeneraciji / Using of biogas in a trigeneration

Kada se biogas koristi u kogenerativnim sistemima, električna energija se proizvodi i koristi za sopstvene potrebe ili isporučuje nacionalnoj električnoj mreži. Toplotna energija nastaje iz procesa proizvodnje električne energije, ali se njeno stalno korišćenje u postrojenjima koja koriste biogas teško ostvaruje. U većini ovih postrojenja, proizvedena toplotna energija se koristi za zagrevanje reaktora ili prostorija biogasnog postrojenja. Zbog toga se razmatra mogućnost iskorišćenja preostale toplotne energije za hlađenje procesnih delova u takozva-

nom sistemu trigeneracije (spregnuta proizvodnja električne, toplotne i rashladne energije) (Leonzio et al., 2018). Šematski prikaz trigeneracijskog postrojenja sa biogasom kao energentom dat je na slici 2. Na ovaj način se produžava godišnje vreme korišćenja kogenerativnog postrojenja i povećava ukupni stepen energetske efikasnosti. Uređaji koji se koriste za ovu namenu su apsorpcioni čileri ili toplotne pumpe. Korišćenje ovih sistema je najčešće u procesima koji imaju veliku potrebu za rashladnom energijom kao što su industrija prerade mleka i industrija smrznute hrane, imajući u vidu da u ovim industrijama nastaju otpadni tokovi koji su dobar izvor sirovina za anaerobnu konverziju.



Slika 2 - Blok dijagram trigeneracijskog postrojenja sa biogasom kao energentom

Figure 2 - Block diagram of a trigeneration with biogas as an energy source

### 2.4. Korišćenje digestata nastalog u proizvodnji biogasa /

#### Use of digestate generated in biogas production

Digestat nastaje kao nusproizvod u procesu anaerobne digestije. Biogasno postrojenje nominalne snage 500 kWe generiše više od 10,000 tona

digestata godišnje sa sadržajem suve materije oko 10% (Wiśniewski et al., 2017). Digestat se koristi na poljoprivrednom zemljištu kao zamena za NPK đubrivo. Troškovi korišćenja digestata kao đubriva prihvatljivi su kada se digestat transportuje na razdaljinu do 10 km. Tipičan sastav digestata prikazan je u tabeli 3.

Tabela 3 - Sadržaj suve materije i sastav digestata (azot, fosfor i kalijum)

Table 3 - Dry matter content and composition of digestate (nitrogen, phosphorus and potassium)

Sadržaj	SM, %	Ukupan N (% SM)	P (% SM)	K (% SM)
min.	3,83 (+ 0,11)	4,72 (- 0,10)	0,604 (- 0,03)	2,48 (+ 0,10)
max.	14,05 (- 0,35)	16,42 (- 0,60)	1,83 (- 0,86)	6 (+ 0,78)
prosečna vrednost	8,91 (- 2,5)	8,79 (- 0,85)	1,19 (- 0,4)	4,1 (+ 0,04)

Izvor / Source: Häfner et al. (2022)

Sastav digestata prvenstveno zavisi od tipa sirovine i procesnih uslova. U cilju smanjenja troškova za transport i skladištenje, digestat se može sušiti blizu linije za proizvodnju biogasa. Alternativno, mo-

že se razmotriti i korišćenje suvog digestata kao čvrstog goriva. Otpadna toplota iz postrojenja za kogeneraciju može se koristiti za sušenje digestata do sadržaja suve materije oko 80-90%. Osušen

digestat se može peletizovati i koristiti kao energent ili u ko-sagorevanju. Nakon sagorevanja peleta digestata, u nastalom pepelu zaostaju kalijum i kalcijum koji se mogu dodati poljoprivrednom zemljištu.

#### 2.5. Korišćenje biogasa u proizvodnji biometana / Use of biogas in biomethane production

Biometan predstavlja termin koji se koristi za gas generisan iz prečišćenog biogasa, a koji se koristi za proizvodnju energije, ubacuje u mrežu prirodnog gasa ili upotrebljava kao gorivo u saobraćaju. Biogas za ovu svrhu mora se prečistiti od neželjenih komponenti koje sadrži (vodonik sulfid, ugljen-dioksid, vodena para). Biogas se može prečistiti i komprimovati (eng. bio Compressed Natural Gas, bio-CNG) do udela metana preko 97% (tabela 4), kao i do nivoa i kvaliteta komprimovanog prirodnog gasa (CNG). Kompresija se vrši do pritiska od 200-250 bar. Ovaj energent može se koristiti u saobraćaju kao alternativa fosilnim energentima (benzinu i dizelu). Bio-CNG ima visok oktanski broj (preko 110), što povećava odnos pritisaka i može rezultovati povećanjem efikasnosti termičke konverzije goriva. Dodatna prednost ovog resursa je i manja

emisija izduvnih gasova, pre svega CO<sub>2</sub>, CO i drugih ugljovodonika. Bio-CNG predstavlja gorivo bez prisustva olova što još više doprinosi njegovom ekološkom karakteru. Danas je u svetu prisutno preko 30 miliona vozila koja koriste CNG u Argentini, Pakistanu, Brazilu, Indiji, Rusiji, Iranu i Italiji. U zemljama kao što su Italija i Argentina, CNG vozila predstavljaju između 10% i 20% ukupnog broja vozila, pri čemu ne postoji veća ekonomska razlika između primene CNG i bio-CNG (Subramanian et al., 2013). Takođe, treba navesti da ako se metan proizvodi iz obnovljivih izvora kao što je biogas, emisija gasova sa efektom staklene bašte u životnom ciklusu smanjena je za više od 80% u odnosu na životni ciklus benzina kao goriva (Bordelanne et al., 2011). Korišćenje biogasa u Švedskoj danas iznosi oko 4 TVh. Više od dve trećine biogasa je unapređeno u biometan, a najveći deo se koristi kao gorivo za vozila. Većina biogasa u transportu se koristi u privatnim automobilima ili autobusima. U Švedskoj, biogoriva čine oko 22% svih goriva koja se koriste za drumski transport (Svedish Energi Agenci, 2021). Iako veći deo biogoriva dolazi iz biodizela, ipak biogas čini oko 2%.

Tabela 4 - Potreban kvalitet bio-CNG kao goriva u saobraćaju u Švedskoj  
Table 4 - Required bio-CNG quality as a fuel in traffic in Sweden

Karakteristika	Jedinica	Vrednost
Sadržaj metana	vol %	97 ± 1
Sadržaj vode	mg/m <sup>3</sup>	32
Ugljen - dioksid+kiseonik+azot (max.)	vol %	4
Ukupni sumpor, max.	mg/m <sup>3</sup>	23
Maksimalna veličina prisutnih čestica	µm	1

Izvor / Source: SGC (2012)

Tehnologije dostupne na industrijskom nivou za prečišćavanje biogasa uključuju adsorpciju, apsorpciju (fizičku i hemijsku), membransko i kriogeno odvajanje. Ove tehnike se prvenstveno koriste za odvajanje CO<sub>2</sub> od biogasa (Curto et al., 2019). Tokom

proizvodnje biometana potrebno je smanjenje visokih koncentracija nečistoća kao što su H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>S i siloksani. Najčešće korišćene metode tehnologija za prečišćavanje biogasa sažeto su prikazane u tabeli 5.

Tabela 5 - Karakteristike tehnologija prečišćavanja biogasa  
Table 5 - Characteristics of biogas upgrading technologies

Tehnologija prečišćavanja biogasa	Tip operacije	Absorbent/ adsorbent	Čistoća CH <sub>4</sub> (%)
Skruberi	Fizička adsorpcija	Voda	95 - 98
Fizička adsorpcija	Fizička adsorpcija	Organski rastvarači, polietilen glikol	93 - 98
Hemijska adsorpcija	Hemijska adsorpcija	Amini	> 98
Adsorpcija sa promenljivim pritiskom (eng. Pressure swing adsorption - PSA)	Adsorpcija	Molekulska sita	96 - 98

Izvor / Source: Sahota et al. (2018)

## ZAKLJUČAK / CONCLUSION

Biogas je u mnogim aspektima ozbiljna alternativa drugim fosilnim resursima i komplementaran sa drugim obnovljivim izvorima energije. Kao energetska resurs, biogas je takođe pogodan za proizvodnju toplote, električne energije i goriva, a može biti i sirovina u hemijskoj i procesnoj industriji. Tehnologija proizvodnje biometana iz biogasa i dalje pokazuje značajan potencijal za poboljšanje energetske i resursne efikasnosti. Sadašnji trendovi razvoja ukazuju da će biogas biti važna komponenta energetskog miksa u mnogim državama Evrope i Azije, a dalja intenzivna istraživanja biogasa u pogledu sirovine za proizvodnju, kao i istraživanja o poboljšanim konceptima proizvodnje i korišćenja biogasa otvaraju mogućnost dublje penetracije ovog resursa u energetska sistem u budućnosti.

## Zahvalnica / Acknowledgements

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije za finansijsku podršku (Grant br. 451-03-68/2022-14/200026).

The authors would like to thank the Ministry of Education, Science and Technological Development of Republic of Serbia (Grant No. 451-03-68/2022-14/200026).

## LITERATURA / REFERENCES

- [1] Awiszus, S., Reyer, S., Müller, J. (2019). Environmental Assessment of a Bio-Refinery Concept Comprising Biogas Production, Lactic Acid Extraction and Plant Nutrient Recovery, *Sustainability*, 11, 2601-2621.
- [2] Bordelanne, O., Montero, M., Bravin, F., Prieur-Vernat, A., Oliveti-Selmi, O., Pierre, H. (2011). Biomethane CNG hybrid: a reduction by more than 80% of the greenhouse gases emissions compared to gasoline, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 3, 617-624.
- [3] Caposciutti, G., Baccioli, A., Ferrari, L., Desideri, U. (2020). Biogas from Anaerobic Digestion: Power Generation or Biomethane Production?, *Energies*, 13(3), 743-758.
- [4] Chen, X.Y., Vinh-Thang, H., Avalos Ramirez, A., Rodrigue, D., Kaliaguine, S. (2015). Membrane gas separation technologies for biogas upgrading, *RSC Advances*, 5(31), 24399-24448.
- [5] Curto, D., Martín, M. (2019). Renewable based biogas upgrading, *Journal of Cleaner Production*, 224, 50-59.
- [6] Fagerström, A., Al Seadi, T., Rasi, S., Briseid, T. (2018). The role of Anaerobic Digestion and Biogas in the Circular Economy, *IEA Bioenergy Task 37*. [https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/08/anaerobic-digestion\\_web\\_END.pdf](https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/08/anaerobic-digestion_web_END.pdf).
- [7] Gebrezgabher, S.A., Meuwissen, M.P.M., Prins, B.A.M., Lansink, A.G.O. (2010). Economic analysis of anaerobic digestion - A case of Green power biogas plant in The Netherlands, *NJAS Wageningen, Life Science Journal*, 57, 109-115.
- [8] González, J., E. Sánchez, M., Gómez, X. (2018). Enhancing Anaerobic Digestion: The Effect of Carbon Conductive Materials, *Journal of Carbon Research*, 4(4), 59-78.
- [9] Häfner, F., Hartung, J., Möller, K. (2022). Digestate Composition Affecting N Fertiliser Value and C Mineralisation, *Waste and Biomass Valorization*, 13, 3445-3462.
- [10] Kapłan, M., Klimek, K., Syrotyuk, S., Konieczny, R., Jura, B., Smolinski, A., Szymenderski, J., Budnik, K., Anders, D., Dybek, B., Karwacka, A., Wałowski, G. (2021). Raw Biogas Desulphurization Using the Adsorption-Absorption Technique for a Pilot Production of Agricultural Biogas from Pig Slurry in Poland, *Energies*, 14, 5929-5951.
- [11] Leonzio, G. (2018). An innovative trigeneration system using biogas as renewable energy, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 26(5), 1179-119.
- [12] Martinov, M., Kovacs, K., Đatkov, Đ. (2012). *Biogas technology*, Faculty of Technical Science, Novi Sad.
- [13] Rafiee, A., Khalilpour K. R., Prest, J., Skryabi, I. (2021). Biogas as an energy vector, *Biomass and Bioenergy*, 144, 105935.
- [14] Sahota, S., Shah, G., Ghosh, P., Kapoor, R., Sengupta, S., Singh, P., Vijaya, V., Sahay, A., Vijay, V.K., Thakur, I.S (2018). Review of trends in biogas upgradation technologies and future perspectives, *Bioresource Technology Reports*, 1, 79-88.
- [15] Scarlat, N., Dallemand, J.F., Fahl, F. (2018). Biogas: Developments and perspectives in Europe, *Renewable Energy*, 129, 457-472.
- [16] SGC (2012). Basic Data On Biogas, Swedish Gas Technology Centre, Malme, pp.14. <http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/BasicDataOnBiogas2012.pdf>.
- [17] Subramanian, K.A., Mathad, V.C., Vijay, V.K., Subbarao, P.M.V. (2013). Comparative evaluation of emission and fuel economy of an automotive spark ignition vehicle fuelled with methane enriched biogas and CNG using chassis dynamometer, *Applied Energy*, 105, 17-29.

- [18] Svedish Energi Agenci (2021). Energy in Sweden 2021-An overview, *Eskilstuna*, pp. 17. <https://www.energimyndigheten.se/en/news/2021/an-overview-of-energy-in-sweden-2021>.
- [19] Van, D.P., Fujiwara, T., Tho, B.L., Toan, P.P.S., Minh, G.H. (2020). A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends, *Environmental Engineering Research*, 25(1), 1-17.
- [20] Wiśniewski, D., Siudak, M., Piechocki, J. (2017). *Small-Scale Energy Use of Agricultural Biogas Plant Wastes by Gasification*, Gasification for Low-grade Feedstock, IntechOpen, London, pp. 191.
- [21] Žikić, S., Nestorović, M., Stevanović, M. (2021). Economic, environmental and social aspects of sustainable renewable energy management, *Ecologica*, 28(101), 57-64.