

UNIVERZITET U BEOGRADU
TEHNOLOŠKO-METALURŠKI FAKULTET

Slobodan M. Cvetković

**Modelovanje i optimizacija procesa
korišćenja biogasa u proizvodnji zelene
energije**

Doktorska disertacija



Beograd, 2016

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF TECHNOLOGY AND METALLURGY

Slobodan M. Cvetković

**Modeling and optimization of processes of
biogas utilization in the production of green
energy**

Doctoral Dissertation



Belgrade, 2016

Mentor:

dr Mirjana Kijevčanin

redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

Članovi komisije:

dr Tatjana Kaluđerović Radoičić

docent, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

dr Aleksandar Jovović

redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

Datum odbrane:

Modelovanje i optimizacija procesa korišćenja biogasa u proizvodnji zelene energije

Apstrakt

U okviru ove doktorske disertacije proučavan je potencijal za proizvodnju biogasa u Republici Srbiji iz različitih izvora, kao i dalje korišćenje proračunatih potencijala. Proučavani su takođe, energetske tokovi u životnom ciklusu upotrebe biogasa i izvršena je analiza emisija u životnu sredinu pri proizvodnji električne energije iz biogasa u odnosu na referentne fosilne izvore energije (kolubarski lignit i prirodni gas).

U ovoj tezi je razvijena metodologija za određivanje potencijala za proizvodnju biogasa u Republici Srbiji iz različitih izvora, kao što su poljoprivredne kulture za proizvodnju energije, otpadni tokovi iz stočarstva, komunalnog otpada, industrije prerade mesa i otpadnih voda iz industrije prerade mleka. Rezultati primenjene metodologije, pokazali su da je ukupan godišnji potencijal za proizvodnju biogasa iz ovih izvora u Republici Srbiji 1,937.6 miliona m³. Analiza dalje upotrebe proračunatih potencijala za proizvodnju biogasa u energetske sektoru u Srbiji, takođe je predstavljena u ovom radu.

Takođe, uspostavljen je model za analizu energetske tokova u životnom ciklusu proizvodnje i korišćenja biogasa, kao i njihovih međusobnih odnosa, počev od obezbeđivanja sirovina za digestiju, preko proizvodnje energije, do primene digestata na poljoprivrednom zemljištu. Modelovanje je izvršeno kroz energetske analizu četiri scenarija: korišćenje biogasa za proizvodnju toplotne energije, korišćenje biogasa u kogenerativnom postrojenju, korišćenje biogasa u transportu i korišćenje biogasa u proizvodnji biovodonika. Prema pristupu analize energetske tokova u životnom ciklusu (LCEA), rezultati dobijeni u ovom radu pokazali su da su tri scenarija (korišćenje biogasa za proizvodnju toplotne energije, za kogeneraciju i za transport) imala pozitivan energetske bilans, te su bili energetske održivi. Četvrti scenario (korišćenje biogasa za proizvodnju biovodonika) ima negativan energetske bilans i ovaj scenario dominantno koristi fosilne izvore energije.

Razvijena je i metodologija za određivanje potencijala za smanjenje emisije u životnu sredinu pri proizvodnji električne energije iz biogasa u poređenju sa efektima na životnu sredinu pri proizvodnji iste količine električne energije iz fosilnih izvora (uglja iz kolubarskog basena i prirodnog gasa). Osnova za poređenje uticaja na životnu sredinu u ovoj metodologiji bila je godišnja proizvodnja električne energije u biogasnim postrojenjima ukupnog kapaciteta 80 MW. Pokazalo se da bi godišnja proizvodnja električne energije iz biogasne elektrane snage 80 MW rezultirala u supstituciji 840 kt uglja iz kolubarskog basena i 123.2 miliona m³ prirodnog gasa, smanjenju emisije gasova staklene bašte u rasponu od 491.1 - 605 kt CO₂-eq u odnosu na korišćenje uglja iz kolubarskog basena za proizvodnju električne energije i smanjenju emisije gasova staklene bašte do 92.83 kt CO₂-eq u odnosu na korišćenje prirodnog gasa za proizvodnju električne energije.

Ključne reči: biogas, toplota, kogeneracija, električna energija, biometan, Srbija, energetska efikasnost, ocena životnog ciklusa, emisija

Načna oblast: Hemija i hemijska tehnologija

UDK broj:

Modeling and optimization of processes of biogas utilization in the production of green energy

Abstract

In this doctoral dissertation the potential for biogas production in the Republic of Serbia from different sources, as well as further use of calculated potentials were investigated. Also, the energy flows in the life cycle of biogas production and utilization systems were evaluated, as well as the emissions into the environment during the process of production of electricity from biogas in relation to the reference fossil energy sources (Kolubara lignite and natural gas).

A methodology for determination of potentials for biogas production in the Republic of Serbia from different sources, such as agricultural crops directly provided for energy, livestock residues, municipal solid waste, meat processing industry and wastewater from milk processing industry, was developed in this thesis. The results of the applied methodology showed that the total annual potential for biogas production from these sources in the Republic of Serbia was 1,937.6 million m³. The analysis of the further possible application of the calculated potentials for biogas production in energy sector in the Republic of Serbia was also presented.

A model for the analysis of energy flows in the life cycle of biogas production and utilization, as well as their mutual relations, from providing feedstock materials, via energy production to the application of digestate on agricultural land was established. The modelling was carried out through the analysis of four scenarios: biogas for heat production, biogas in cogeneration, biogas in transportation and biogas in biohydrogen production. According to Life Cycle Energy Assessment (LCEA) approach, the results obtained in this work showed that three scenarios (biogas for heat production, biogas in cogeneration, and biogas in transportation) had positive energy balance, and were sustainable from the energy point of view. The fourth scenario (biogas for biohydrogen production) had negative energy balance and this scenario dominantly used fossil resources.

In this work, a methodology was developed for quantification of the potential for the reduction of emissions to the environment during the production of electricity from biogas in comparison with environmental effects of the production of the same amount of electricity from fossil resources (coal from Kolubara basin and natural gas). The basis for the comparison of environmental impacts in this methodology was the annual production of electricity in biogas plants of the total capacity of 80 MW. It was shown that the annual production of electricity from biogas power plants of the capacity of 80 MW resulted in: substitution of 840 kt of coal from Kolubara basin and 123.2 million m³ of natural gas; reduction of emissions of greenhouse gases in the range of 491.1 kt - 605 kt CO₂-eq compared to the use of coal from Kolubara basin for electricity generation and reduction in emissions of greenhouse gases up to 92.83 kt CO₂-eq compared to the use of natural gas for electricity generation.

Key words: biogas, heat, cogeneration, electricity, biomethane, the Republic of Serbia, energy efficiency, life cycle assessment, emission

Scientific field: Chemistry and Chemical Technology

UDK number:

ZAHVALNICA

Zadovoljstvo mi je što mi se pruža prilika da se zahvalim svima koji su doprineli izradi ove doktorske disertacije.

Pre svih, veliku zahvalnost želim da iskažem svom Mentoru Dr Mirjani Kijevečanin na dragocenim savetima, velikoj pomoći, podršci i zalaganju, bez koje ova teza ne bi ugledala svetlost dana.

Zahvalnost dugujem i Dr Tatjani Kaluđerović Radoičić i Dr Aleksandru Jovoviću, koji su svojim inventivnim savetima dali veliki doprinos u izradi ove teze.

Takođe, želim da zahvalim i kompaniji Mirotin Energo iz Vrbasa za tehničku pomoć u izradi ove disertacije.

Na kraju, želim da izrazim veliku zahvalnost svojoj porodici na beskrajnom razumevanju i podršci tokom izrade ove disertacije.

SADRŽAJ

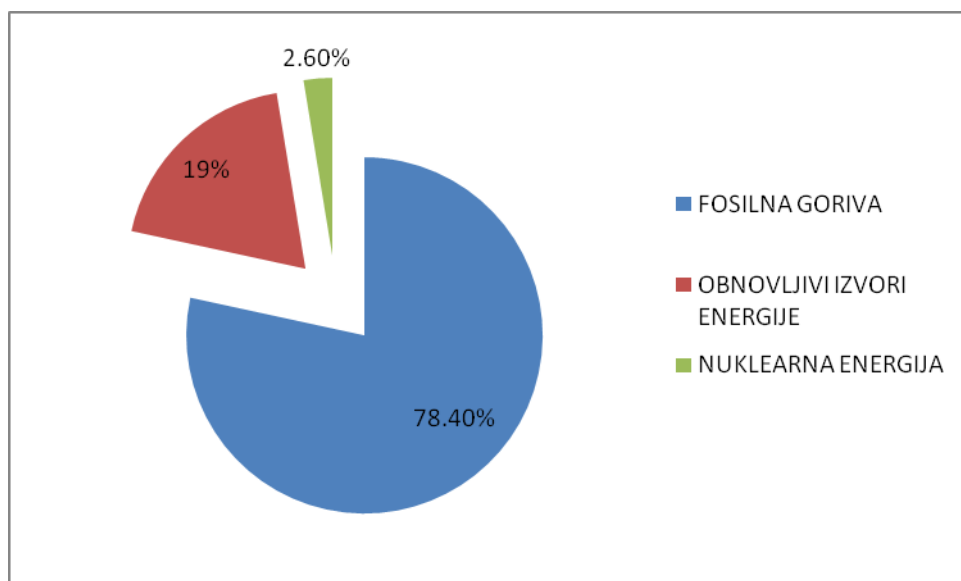
1. UVOD	1
2. ANALIZA PROCESA ANAEROBNE DIGESTIJE, KORIŠĆENJA BIOGASA I KONCEPTA ŽIVOTNOG CIKLUSA	10
2.1. Uticaj procesnih parametara na proces anaerobne digestije	11
2.1.1 Temperatura procesa anaerobne digestije	12
2.1.2 pH vrednosti	12
2.1.3 Amonijak	13
2.1.4 Hranljive materije	13
2.1.5 Mikroelementi	14
2.1.6 Hidraulično vreme zadržavanja	14
2.2 Sirovine koje se koriste u procesu anaerobne digestije	15
2.3 Biogas kao energent	17
2.3.1 Proizvodnja toplotne energije iz biogasa	18
2.3.2 Istovremena proizvodnja toplotne i električne energije iz biogasa	19
2.3.3 Korišćenje biogasa u postrojenju za trigeneraciju	22
2.3.4 Korišćenje digestata nastalog u proizvodnji biogasa	23
2.3.5. Korišćenje biogasa u proizvodnji biometana - prečišćavanje biogasa	24
2.3.6 Primena biometana u saobraćaju	29
2.3.7 Biogas u proizvodnji biovodonika	31
2.4 Koncept životnog ciklusa	33
3. ANALIZA STANJA KORIŠĆENJA BIOGASA U REPUBLICI SRBIJI	39
3.1 Podsticaji za energiju dobijenu iz biogasa	46
3.2 Status energije dobijene iz biogasa u Srbiji	47

3.3. Prepreke za šire korišćenje energije dobijene iz biogasa u Srbiji.....	51
4. ODREĐIVANJE POTENCIJALA ZA PROIZVODNJU BIOGASA I NJEGOVO KORIŠĆENJE U ENERGETSKE SVRHE U REPUBLICI SRBIJI	53
4.1 Određivanje potencijala za proizvodnju biogasa u Republici Srbiji	53
4.2 Uspostavljanje metodologije za dalju upotrebu proračunatih potencijala za proizvodnju biogasa	58
5. ANALIZA ŽIVOTNOG I ENERGETSKOG CIKLUSA BIOGASNIH POSTROJENJA I NJIHOVOG UTICAJA NA ŽIVOTNU SREDINU	61
5.1 Opis industrijskog sistema izabranog za LCEA	62
5.1.1 Uspostavljanje granice sistema za LCEA.....	65
5.2 Materijalno i energetske bilansiranje procesa	67
5.2.1 Maseni bilans.....	68
5.2.2 Definisanje ulaznih energetskih tokova.....	70
5.2.3 Energetski bilans	75
5.3 Metodologija proračuna emisija u životnu sredinu pri proizvodnji električne energije iz biogasnih postrojenja.....	78
5.3.1 Sirovine za proizvodnju električne energije	79
5.3.2 Određivanje emisija.....	81
5.4 Proračun emisija	84
6. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA	89
6.1 Rezultati LCEA analize	95
6.1.1 Rezultat materijalnog bilansa	95
6.1.2 Rezultat energetskog bilansiranja.....	96
6.2 Rezultati modelovanja emisije u životnu sredinu pri proizvodnji električne energije iz biogasa.....	105
7. ZAKLJUČAK	112
8. LITERATURA	115

1. UVOD

Brz porast svetske populacije i rast svetske ekonomije rezultirali su sve većom potrošnjom energije. Procena je da će ukupna svetska energetska potrošnja porasti do 2040. godine za 58% u odnosu na 2010. godinu (EIA, 2013).

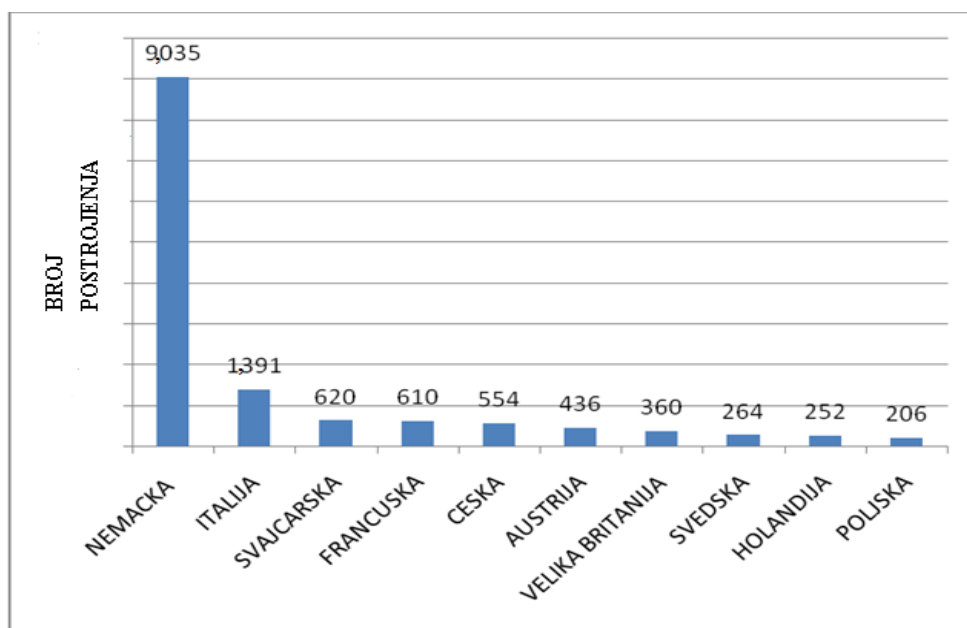
Upotreba konvencionalnih tehnologija za proizvodnju energije iz fosilnih goriva dovela je do granice iscrpljivosti fosilne izvore, porasta zagađenja životne sredine (vode, vazduha i zemljišta), kao i do povećanja emisije gasova staklene bašte (eng. greenhouse gases-GHG), koji dovode do klimatskih promena. Emisija gasova staklene bašte porasla je u periodu od 1970. do 2004. godine za 70% (IPCC Assessment Report 3, 2007). Ove teme postale su sastavni deo programa konferencija i samita međunarodne zajednice, kao i globalnih napora da se dođe do održivog rešenja (Kjoto protokol, Konferencija Ujedinjenih nacija o održivom razvoju 2012. godine (Rio +20)). Očigledno je da je potrebno izvršiti uvođenje novih energetske izvora koji bi doveli do sigurnog snabdevanja energijom, smanjenja zagađenja životne sredine i ublažavanja klimatskih promena. Proizvodnja električne i toplotne energije iz obnovljivih izvora energije je jedna od opcija za ovaj proces. Svet se posle naftne krize sedamdestih godina prošlog veka okrenuo proizvodnji energije iz obnovljivih izvora, koja je u 2012. godini dostigla udeo od 19% u ukupnoj svetskoj finalnoj potrošnji energije (slika 1.1).



Slika 1.1 Procenjeni udeo energije iz obnovljivih izvora u globalnoj finalnoj potrošnji energije u 2012. godini (REN 21, 2014)

Jedan od načina proizvodnje obnovljive energije i moguće zamene fosilnih izvora je primena anaerobne digestije i proizvodnja biogasa. Primena biogasa beleži trend značajnog porasta tokom druge polovine dvadesetog veka, a posebno u zemljama u razvoju. Pored proizvodnje energije, na ovaj način rešavaju se i sanitarni problemi kroz tretman otpadnih voda. Biogas se takođe koristi i kao energent za kuvanje i rasvetu.

Zemlje u razvoju sa velikim brojem stanovnika, razvile su posebne programe primene biogasa u ruralnim zajednicama. Kina već ima preko trideset miliona malih digestora po kućnim farmama, dok u Indiji postoji preko dva miliona takvih instalacija (Chen i saradnici, 2014). Značajan porast primene biogasa kao energenta beleži se i u zemljama jugoistočne Azije i Afrike. Evropski kontinent je vodeći u primeni biogasa i razvoju novih tehnologija (Kossmann i saradnici, 1999; Dennis i Burke, 2001; Al Seadi i saradnici, 2008). Ukupna instalisana snaga postrojenja koja koriste biogas za proizvodnju električne energije u Evropskoj Uniji (EU) dostigla je 7,857 MW_e, dok je broj ovih postrojenja iznosio 14,563 u 2013. godini (slika 1.2).



Slika 1.2 Ukupan broj instalisanih biogasnih postrojenja u zemljama EU (EUROBSERV'ER, 2014)

Do naglog skoka u izgradnji postrojenja koja koriste biogas u proizvodnji električne energije, došlo je zbog podsticajnih ekonomskih mera u primeni obnovljivih izvora energije, kao i usled snažne podrške EU borbi protiv klimatskih promena. Savezna Republika Nemačka je vodeća zemlja Evropske Unije u primeni biogasa i razvoju novih tehnologija (slika 1.2), gde je u 2013. godini bilo instalisano 9,035 postrojenja sa godišnjom proizvodnjom energije od 6,416 kilotona ekvivalenata nafte (kten).

Cilj doktorske disertacije

Cilj disertacije je uspostavljanje metodologije za proračun potencijala za proizvodnju biogasa u Republici Srbiji. Takođe, cilj teze je analiza mogućeg korišćenja proračunatih potencijala za proizvodnju biogasa u energetsom sistemu Republike Srbije. Istraživanja u ovoj disertaciji obuhvataju i sledeće ciljeve:

- Postavljanje modela industrijskog kompleksa za dobijanje biogasa;
- Primenu koncepta ocene životnog ciklusa u energetskej analizi biogasnog postrojenja.

Predmet naučnog istraživanja disertacije je i razvoj novih metoda za energetske analize proizvodnje i korišćenja biogasa, u različitim privrednim sektorima, kao i razvoj metodologije za ocenu emisije u životnu sredinu pri proizvodnji električne energije iz biogasa.

Za analizu postojećih biogasnih postrojenja i primenjenih tehnologija koristiće se pristupi uvedeni u savremenoj literaturi: primena koncepta životnog ciklusa (Cherubini i Strømman, 2011; Bacenetti i saradnici, 2013; Fuchsz i Kohlheb, 2015), energetska analiza biogasnih procesa na osnovu studije slučaja (Pöschl i saradnici, 2010; Havukainen i saradnici, 2014), modelovanje i optimizacija primene biogasa u proizvodnji toplotne energije, električne energije, saobraćaju i proizvodnji biovodonika.

Metode istraživanja u ovoj disertaciji obuhvataju analizu postojećih podataka i modela za energetske analize procesa korišćenja energije iz biogasa, statistička istraživanja najznačajnijih resursa za proizvodnju biogasa i modelovanje ovih rezultata u cilju određivanja potencijala za proizvodnju biogasa iz ovih resursa. Metode istraživanja obuhvatiće i industrijske eksperimente (utvrđivanje stanja materijalnog i energetskog bilansa u pojedinim industrijskim kompleksima), energetske analize posmatranih sistema primenom koncepta životnog ciklusa, modelovanje u cilju ispitivanja novih metoda i modifikacije postojećih bilansa u cilju unapređenja energetske efikasnosti posmatranih energetskih sistema.

Ova razmatranja izvršena su na osnovu analize materijalnih i energetskih bilansa posmatranih sistema, a u cilju smanjenja potrošnje energije, modelovanja i optimizacije energetskih sistema, primene novih rešenja za unapređenje energetske efikasnosti, zaštite životne sredine i ublažavanja posledica klimatskih promena.

Pregled prethodnih istraživanja

Poljoprivreda, prehrambena industrija i komunalni sistemi generišu otpadne tokove pogodne za proces anaerobne digestije (Starr i saradnici, 2014; Budzianowski, 2012; Pitk i saradnici, 2012; Salter i Banks, 2009). Biogas proizveden iz ovih izvora može se iskoristiti kao energent u različitim industrijskim i energetskim sektorima za proizvodnju toplotne i električne energije (Weiland, 2010; Bachmaier i saradnici, 2010;

Lantz, 2012), saobraćaju (Ahman, 2010; Brynolf i saradnici, 2014; Goulding i Power, 2013) ili za proizvodnju biovodonika (Galvagno i saradnici, 2013; Coskun i saradnici, 2011; Braga i saradnici, 2013). Sve prisutnije obaveze kada su u pitanju standardi u proizvodnji i potrošnji energije, kao i sve strožije granične vrednosti emisija u životnu sredinu, koje zahtevaju uvođenje novih proizvodnih tehnologija daju prednost primeni biogasa kao energetskog izvora u sveobuhvatnom pristupu u rešavanju pitanja zaštite životne sredine.

- Istraživanja potencijala za proizvodnju biogasa

Prvi korak u određivanju potencijala za proizvodnju biogasa je kvalitativno i kvantitativno određivanje dostupnih sirovina za anaerobnu digestiju. Na osnovu podataka o sirovinama za anaerobnu digestiju vrši se dalje izračunavanje količina biogasa koje se mogu dobiti na osnovu literaturnih ili eksperimentalnih podataka o prinosu biogasa iz razmatrane sirovine. U svojim istraživanjima (Höhn i saradnici, 2014), koristili su Geografski Informacioni Sistem (GIS), u određivanju dostupne količine sirovina za anaerobnu digestiju, prilikom proračuna potencijala za proizvodnju biogasa u provincijama u južnoj Finskoj.

U geografskom smislu, potencijal za proizvodnju biogasa proučavan je na: državnom ili na nivou više država; regionalnom i lokalnom nivou. Prema studiji Američke nacionalne laboratorije za obnovljivu energiju (NREL, 2013), ukupan potencijal za proizvodnju metana iz otpadnih voda, deponijskog gasa, stajnjaka i organskog otpada u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD) iznosi 7,857,449 tona godišnje. Moreda (2016), je izučavao potencijal za proizvodnju biogasa u Urugvaju i utvrdio je da se energijom iz biogasa može dobiti 1.3-2.1% primarne energije u toj zemlji. Potencijal za proizvodnju biogasa u Iranu, proučavali su (Maghanaki i saradnici, 2013) i izračunali su da iznosi 16.1 milijardi m³ godišnje (toplotna moć biogasa sa 60% metana iznosi 0.52 ten/1,000 m³ biogasa (AEBIOM, 2009)). Teorijski potencijal za proizvodnju primarne energije iz biogasa u zemljama Evropske Unije iznosi 166 Mten (AEBIOM, 2009), gde poljoprivredni usevi proizvedeni na zemljištu namenjenom u energetske svrhe i otpadni tokovi iz stočarstva predstavljaju najveći potencijal za proizvodnju biogasa.

Predmet istraživanja u radovima (Popławska i saradnici, 2014; Huopana i saradnici, 2013), bio je potencijal za proizvodnju biogasa na regionalnom nivou, dok su (Davidsson i saradnici, 2007), istraživali potencijal za proizvodnju biogasa na lokalnom nivou (grad Malme).

Potencijal za proizvodnju biogasa na nacionalnom nivou iz pojedinačnih sirovina za anerobnu digestiju bio je predmet mnogih radova. Prema analizi (Saur i Milbrandt, 2014), potencijal za proizvodnju metana iz biogasa iz otpadnih voda u SAD iznosi 2.34 miliona tona godišnje. Takođe su utvrdili da potencijal za proizvodnju vodonika iz ovako nastalog biogasa u SAD iznosi 618 hiljada tona godišnje. U svom radu (Abdeshahian i saradnici, 2016) su izračunali da potencijal za proizvodnju biogasa iz otpada životinjskog porekla u Maleziji iznosi 4.6 milijardi m³ godišnje. Coskun i saradnici (2012), su u svom istraživanju utvrdili da potencijal za proizvodnju biogasa iz otpadnih voda industrije mleka u Turskoj, iznosi 54.2 miliona m³ godišnje, kao i da se ovaj biogas može dalje koristiti za proizvodnju 12,670 tona vodonika godišnje.

U analizi (Lovrencec, 2010) za utvrđivanje socijalne i ekonomske dobiti, koje bi se ostvarile korišćenjem potencijala za proizvodnju biogasa, korišćen je pristup da se u poljoprivrednom sektoru može otvoriti 19 radnih mesta po MW_e instalisane snage biogasnih postrojenja.

- Istraživanja energetske tokova u životnom ciklusu biogasa

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

LCA analiza biogasnih postrojenja bila je predmet mnogih istraživanja. LCA analiza biogasnih postrojenja, koja koriste različite sirovine za anaerobnu digestiju, bila je tema istraživanja u radovima (Pöschl i saradnici, 2012; Cao i Pawlowski, 2012; González-García i saradnici, 2013). Različiti načini korišćenja biogasa u proizvodnji energije kroz životni ciklus, analizirani su u istraživanjima (Banks i saradnici, 2011; Hahn i saradnici,

2015). U radovima (Jin i saradnici, 2015; Manninen i saradnici, 2013), razmatrano je korišćenje različitih otpadnih tokova za proizvodnju biogasa kroz životni ciklus.

Analiza energetske tokova u životnom ciklusu (LCEA), određuje energetske performanse posmatranog energetskog sistema. Jedan od načina za procenu energetske performansi biogas postrojenja u LCEA je određivanje odnosa dobijene izlazne energije sa ulaznom (uloženom) primarnom energijom za različite faze u životnom ciklusu biogasnog postrojenja. Seppälä i saradnici (2008), izučavali su energetske performanse biogasnog postrojenja kroz životni ciklus, gde se biogas proizvodio iz kodigestije stajnjaka krava sa travom, ostacima šećerne repe i slame. Seppälä i saradnici (2008), su dobili za odnos dobijene izlazne energije i ulazne (uložene) primarne energije za različite faze u životnom ciklusu biogasnog postrojenja, vrednosti od 3.5-8.2. U njihovoj 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.

Prade i saradnici (2012), razmatrali su energetske karakteristike biogasnog postrojenja kroz životni ciklus, gde se kao sirovina za proizvodnju biogasa koristila industrijska konoplja. U njihovom radu, odnos dobijene izlazne energije i ulazne (uložene) primarne energije za različite faze u životnom ciklusu korišćenja biogasa bio je od 2.6-2.7. 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 (2010), 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 u njihovoj studiji bio je energetski sadržaj u biogasu i odnos uložene primarne energije i izlazne energije u tom istraživanju bio je od 0.105-0.64, u zavisnosti od sirovine za anaerobnu digestiju i načina korišćenja biogasa.

U studiji (Cropgen, 2007a), kao indikator energetske performansi biogasnih postrojenja u životnom ciklusu, korišćena je razlika između izlazne energije i ulazne (uložene) primarne energije u biogasno postrojenje.

U istraživanjima (Havukainen i saradnici, 2014), energetske karakteristike biogasnog postrojenja kroz životni ciklus, određene su odnosom neto izlazne energije i ukupne suve materije sirovina za anerobnu digestiju i u njihovom radu iznosio je 4-7 MJ/kg suve materije ulazne sirovine za anaerobnu digestiju.

LCEA analiza procesa korišćenja biogasa u saobraćaju bila je predmet istraživanja u studijama (Goulding i Power, 2013; Papong i saradnici, 2014). Energetsku efikasnost procesa dobijanja biovodonika iz biogasa u životnom ciklusu, analizirali su u svojim radovima (Wulf i Kaltschmitt, 2013; Hajjaji i saradnici, 2016).

- Istraživanja emisije u životnu sredinu iz biogasnih postrojenja

Emisije iz biogasnih postrojenja u životnu sredinu bile su predmet brojnih istraživanja. U radovima (Liebetrau i saradnici, 2010; Capponi i saradnici, 2012), istraživana je emisija metana i ugljen-dioksida iz biogasnih postrojenja kao industrijskog kompleksa u životnu sredinu. Thomas i Wyndorps (2012), istraživali su u periodu od 11 meseci emisiju ugljen monoksida iz kogenerativne jedinice biogasnog postrojenja snage 192 kW_e i ova emisija je bila ispod propisane granične vrednosti emisije od 1000 mg/m³. Komparativne analize emisija iz biogasnih postrojenja u životnu sredinu sa emisijama iz postrojenja koja koriste fosilne izvore, bile su predmet istraživanja u radovima (Akhgari i Kamalan, 2013; Cuélar i Webber, 2008).

Emisija gasova sa efektom staklene bašte iz biogasnog postrojenja razmatrana je u istraživanjima (Sholc i saradnici, 2013; Kaparaju i Rintala, 2011; Aurich i saradnici, 2012). Pucker i saradnici (2013), su na osnovu analize emisija iz 6 biogasnih postrojenja u Austriji, identifikovali da je gubitak metana usled curenja i nezaptivenosti procesne opreme jedan od ključnih faktora koji utiče na emisije gasova sa efektom staklene bašte iz biogasnih postrojenja. Bachmaier i saradnici (2010), su analizirali emisije iz 10 biogasnih postrojenja i odredili su da se korišćenjem biogasa u proizvodnji

električne energije u odnosu na fosilne izvore štedi 573-910 gram ekvivalentnog CO₂ po proizvedenom kWh električne energije.

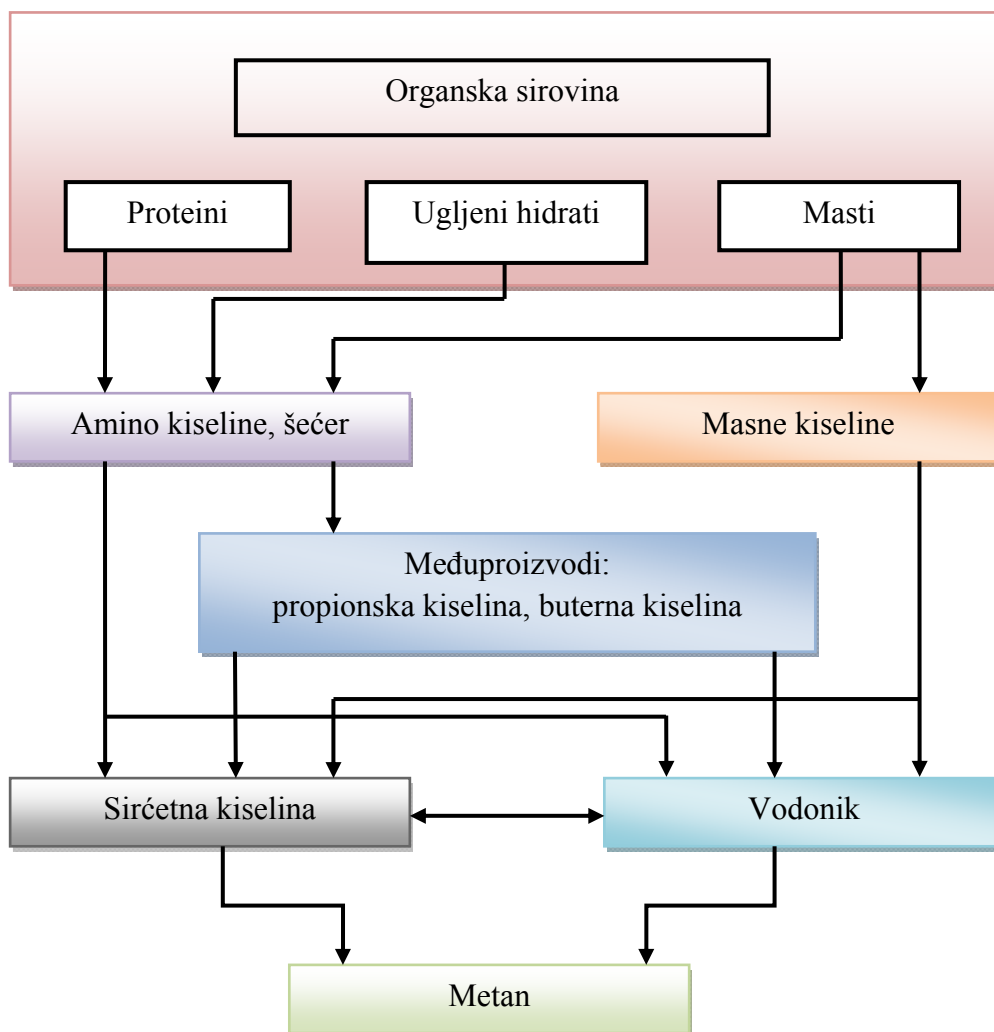
2. ANALIZA PROCESA ANAEROBNE DIGESTIJE, KORIŠĆENJA BIOGASA I KONCEPTA ŽIVOTNOG CIKLUSA

Biogas je obnovljiv izvor energije, koji se dobija postupkom anaerobne digestije (slika 2.1), koja predstavlja biohemijski proces dekompozicije organskih molekula u anaerobnim uslovima. Biogas je finalni proizvod koji se primarno sastoji od metana i ugljen-dioksida. Digestat je procesni ostatak organske sirovine koji nije mogao da se transformiše ovim procesom u biogas (Baldwin i saradnici, 2009; Crolla i Kinsley, 2011).

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 (Dennis i Burke, 2001; Monnet, 2003; Donoso-Bravo i saradnici, 2009). 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, hemi-celulozu i lignin, hidroliza je najsporiji proces koji određuje brzinu procesa anaerobne digestije. U toku hidrolize sirovina proizvodi se relativno mala količina biogasa.

Proizvodnja biogasa dostiže svoj maksimum tokom metanogeneze (Monnet, 2003; Baldwin i saradnici, 2009; WtERT, 2009).



Slika 2.1 Šematski prikazane faze procesa anaerobne digestije (WtERT, 2009)

2.1 Uticaj procesnih parametara na proces anaerobne digestije

Proces anaerobne digestije zavisi od mnogih procesnih parametara od kojih su najznačajniji: temperatura procesa anaerobne digestije; pH vrednost u reaktoru; prisustvo amonijaka, hranljivih materija i mikroelementa u reaktoru i hidraulično vreme zadržavanja sirovina.

2.1.1 Temperatura procesa anaerobne digestije

Prema temperaturi na kojoj se odvija, anaerobna digestija se može podeliti na tri temperaturna opsega: psihrofilni ($< 20^{\circ}\text{C}$), mezofilni (30 do 42°C) i termofilni (43 do 55°C). Temperatura procesa anaerobne digestije zavisi od vrste sirovine koja se koristi za proizvodnju biogasa. Potrebna temperatura procesa obično se ostvaruje grejanjem poda ili zida anaerobnog digestora. Temperatura pri kojoj se odvija anaerobna digestija utiče i na druge parametre kao što su viskoznost, rastvorljivost organskih jedinjenja, brzine hemijskih i biohemijskih reakcija. Povećanjem temperature do određene granice povećava se i brzina rasta mikroorganizama. Međutim, usled daljeg povećanja temperature iznad optimalne vrednosti, dolazi do smanjenja rasta i uginuća bakterija anaerobnog vrenja.

Održavanje konstantne temperature procesa jedan je od najvažnijih uslova za stabilan rad i visoki prinos biogasa. Temperaturne promene u digestoru moraju se držati na minimumu, bez obzira da li se radi o promenama temperature zbog vremenskih uslova ili se radi o lokalnim promenama u različitim područjima fermentora. Velike promene u temperaturi mogu dovesti do neravnoteže procesa anaerobne digestije, a u krajnjem slučaju i do njegovog zastoja. Sprečavanje prekomernog povećanja temperature vrši se promenom sastava ulaznih sirovina, smanjenjem brzine punjenja reaktora ili primenom rashladnih sistema.

2.1.2 pH vrednosti

pH vrednost procesa anaerobne digestije utiče na stopu rasta metanogenih mikroorganizama, kao i na razlaganje nekih važnih jedinjenja za anaerobnu digestiju (amonijaka, vodonik sulfida, organske kiseline). Stvaranje metana odvija se u relativno, uskom intervalu pH vrednosti od 5.5 do 8.5, uz optimalan interval od 7.0 do 8.0 za većinu metanogenih bakterija. Acidogeni mikroorganizmi obično imaju pH vrednosti nižu od optimalne (Kossmann i saradnici, 1999; Monnet, 2003; Lfu, 2007).

Vrednost pH u procesu anaerobne digestije, uglavnom kontroliše bikarbonatni puferski sistem. Stoga, pH vrednost unutar digestora zavisi od parcijalnog pritiska CO_2 i

koncentracije alkalnih i kiselih komponenti u tečnoj fazi. Ako dođe do promene pH vrednosti u reaktoru, puferski sistem kompenzuje ove promene pH do određenog nivoa. Kada je prekoračen kapacitet puferskog sistema, usled promene pH vrednosti dolazi do potpune inhibicije procesa anaerobne digestije. Iz tog razloga, pH vrednost nije preporučljivo koristiti kao samostalni indikator procesa anaerobne digestije (Dennis i Burke, 2001; Lfu, 2007). Proces inhibicije metanogeneze usko je povezan sa akumulacijom isparljivih masnih kiselina u sistemu (Wang i saradnici, 1999).

2.1.3 Amonijak

Amonijak (NH_3) ima značajnu ulogu u procesu anaerobne digestije. Proteini su glavni izvor amonijaka u ovom procesu. Previsoka koncentracija amonijaka unutar reaktora, inhibira proces anaerobne digestije zbog metanogenih bakterija koje su posebno osetljive na povećanu koncentraciju amonijaka. Ovo je posebno karakteristično za anaerobnu digestiju sa sirovinama animalnog porekla, zbog visoke koncentracije amonijaka poreklom iz urina životinja.

2.1.4 Hranljive materije

Postrojenja koja koriste biogas se grade u zavisnosti od tehnoloških i ekonomskih parametara. Za maksimalni prinos biogasa, potrebno je dovoljno dugo vreme zadržavanja sirovina i odgovarajuća veličina digestora.

Izbor sistema za digestiju zasniva se na optimizaciji odnosa maksimalnog prinosa biogasa i ekonomskog ulaganja u postrojenje. U tom smislu unos organske materije je važan radni parametar, koji pokazuje koliko organske materije može biti uneto u digestor, po jedinici zapremine u jedinici vremena. Dovoljna koncentracija hranljivih materija je potrebna za postizanje optimalnog rasta bakterija. Metabolizmu anaerobnih mikroorganizama neophodni su i ugljenik i azot. Najbolji odnos količina C/N je u rasponu od 8-20, što zavisi od prirode sirovine za proces anaerobne digestije (Lehtomäki, 2006; Al Seadi i saradnici, 2008). Uglavnom sve sirovine sadrže dovoljan

odnos ugljenika, azota, fosfora i sumpora u iznosu od 600:15:5:1 i nije ih potrebno dodavati tokom reakcije.

2.1.5 Mikroelementi

Za opstanak i rast specifičnih bakterija potrebno je prisustvo makro i mikro elemenata. Makroelementi su: ugljenik, fosfor i sumpor i uglavnom sve organske sirovine imaju ih u dovoljnoj meri. Međutim, dodatak mikroelemenata poput gvožđa, nikla, kobalta, selena, molibdena i volframa je neophodan za rast i metabolizam bakterija tokom procesa digestije (Abdoun i Weiland, 2009; Jarvis i saradnici, 1997). Funkcija ovih mikroelemenata nije u potpunosti razjašnjena.

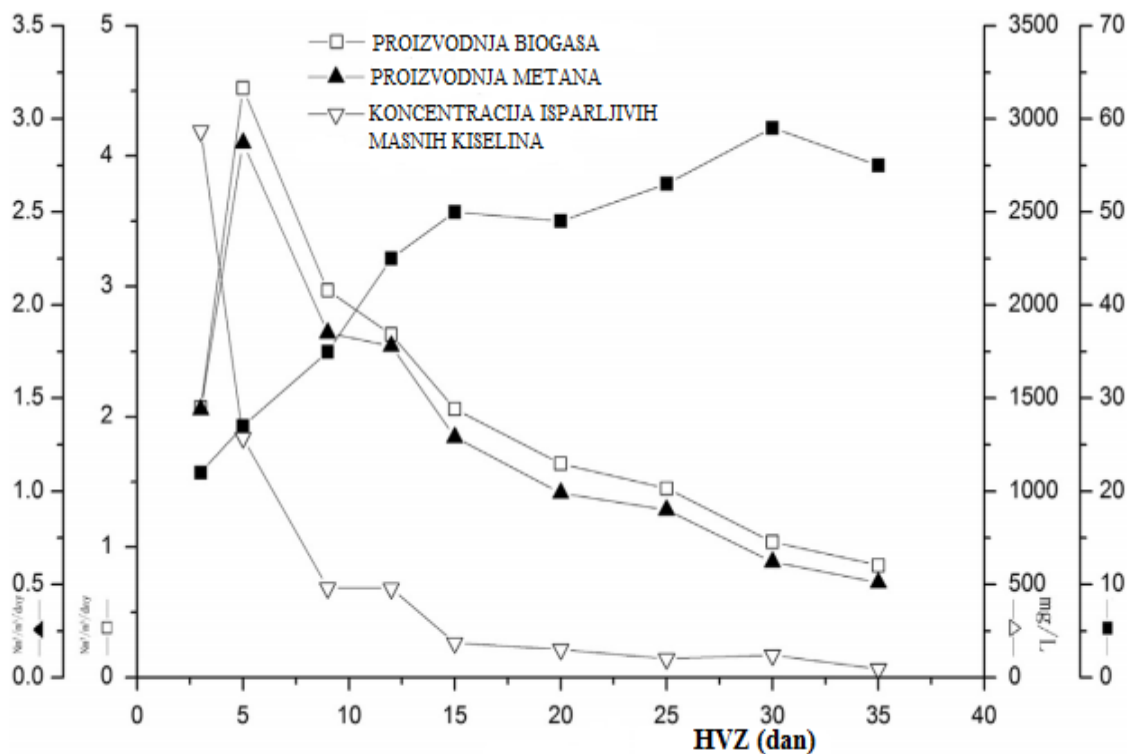
Neophodna koncentracija mikroelemenata kreće se u opsegu 0.05-0.06 mg/l, osim za gvožđe čija je potrebna koncentracija 1-10 mg/l (Bischoff, 2009). U slučaju da se kao sirovine koriste samo poljoprivredne kulture dodatak mikroelemenata je apsolutno potreban da bi se obezbedili stabilni uslovi procesa (Friedmann i Kube, 2008).

2.1.6 Hidraulično vreme zadržavanja

Važan parametar za dimenzionisanje anaerobnog reaktora je hidraulično vreme zadržavanja (HVZ). Ovaj radni parametar predstavlja prosečni vremenski interval zadržavanja sirovina u digestoru. Na slici 2.2 prikazan je prinos biogasa u funkciji hidrauličnog vremena zadržavanja.

Prosečno vreme zadržavanja iznosi 15-30 dana koliko je potrebno za tretiranje organske komponente ulazne sirovine pod mezofilnim uslovima. HVZ zavisi od sastava i količine organske materije koja se unese u anaerobni digestor. Tipično, par nedelja je neophodno za kompletan proces anaerobne digestije.

Smanjenje vremena zadržavanja (slika 2.2), dovodi do akumulacije isparljivih masnih kiselina (VFA), što može dovesti do nepotpune konverzije, dok produženje vremena zadržavanja dovodi do smanjena efikasnosti reaktorske jedinice.



Slika 2.2 Proizvodnja biogasa u zavisnosti od hidrauličnog vremena zadržavanja (Nges i Liu, 2010)

2.2 Sirovine koje se koriste u procesu anaerobne digestije

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),

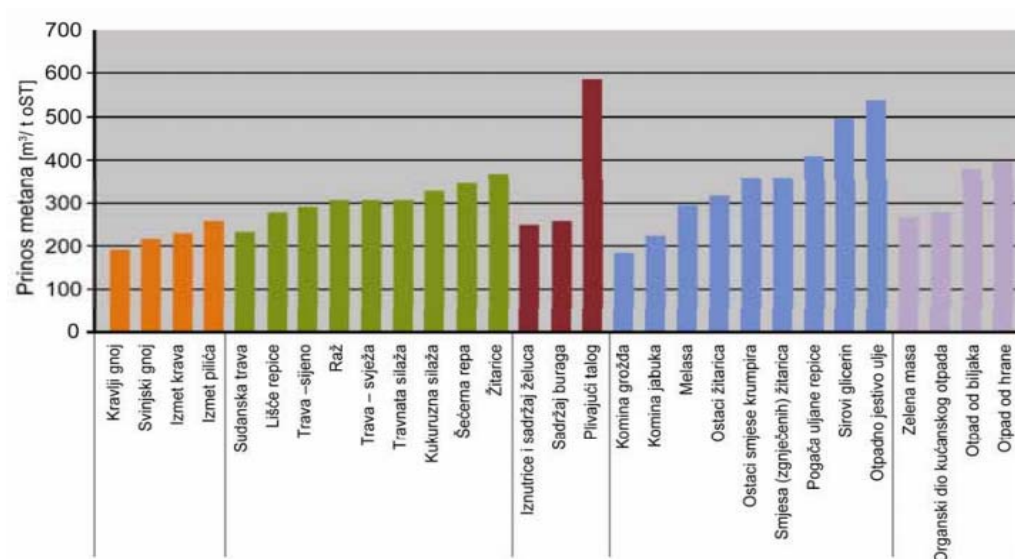
-
- otpadne vode prehrambene industrije i otpadni muljevi iz postrojenja za tretman voda,
 - energetske usevi (kukuruzna silaža, sirak, različite vrste trava).

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 (Bio fuel cells, 2000).

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 2.3), tako da se koristi u kodigestiji sa drugim sirovinama koje imaju visoku produkciju metana, u cilju povećanja proizvodnje biogasa. Uglavnom, to su ostaci hrane, industrije alkohola i otpadni tokovi iz pivara i industrije šećera, ili „energetski usevi“ (Patel, 2006; Al Seadi i saradnici, 2008).

Na slici 2.3 predstavljen je prinos biogasa po toni organske suve materije različitih sirovina za proizvodnju biogasa.



Slika 2.3 Prinos biogasa po toni organske suve materije različitih sirovina (Al Seadi i saradnici, 2008)

2.3 Biogas kao energent

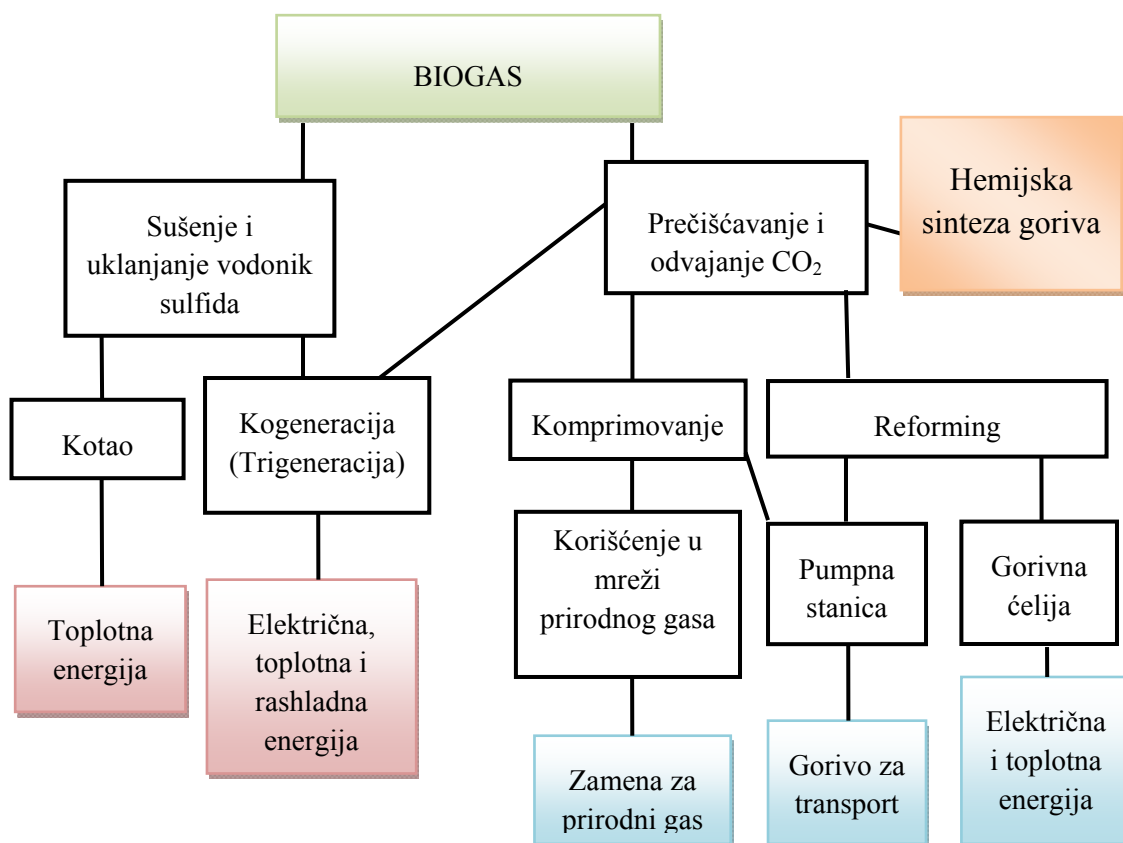
Biogas nastao u anaerobnom digestoru sadrži u najvećoj meri metan (50-75%) i ugljen-dioksid (25-45%). Tipičan hemijski sastav biogasa dat je u tabeli 2.1.

Tabela 2.1 Tipičan sastav biogasa
(Kaltschmitt i Hartmann, 2001; Al Seadi i saradnici, 2008)

Komponenta	Hemijski simbol	Zapreminski udeo, %
Metan	CH ₄	50-75
Ugljen-dioksid	CO ₂	25-45
Vodena para	H ₂ O	2-7
Kiseonik	O ₂	< 2
Azot	N ₂	< 2
Vodonik-sulfid	H ₂ S	20-20,000 ¹

¹ppm (milionitih delova)

Prečišćeni biogas može se koristiti u proizvodnji energije, u proizvodnji energenata ili u proizvodnji hemikalija. Mogućnosti korišćenja biogasa u energetske svrhe prikazane su na slici 2.4.



Slika 2.4 Korišćenje biogasa u energetske svrhe (Pöschl i saradnici, 2010)

2.3.1 Proizvodnja toplotne energije iz biogasa

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 miks sa prirodnim gasom za proizvodnju toplotne energije u kotlovima. Proizvedena topla vode 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 (Wellinger i Lindberg, 2001). 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% (Bitir i saradnici, 2002).

2.3.2 Istovremena proizvodnja toplotne i električne energije iz biogasa

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 goriva. Da bi se iskoristila ova otpadna toplota koriste se različiti izmenjivači toplote.

Primene biogasa u kogenerativnom procesu imaju 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 (Somehsaraei i saradnici, 2014), Stirling motor (Bravo i saradnici, 2012),

uređaji koji koriste Rankinov ciklus sa organskim uljem (eng. Organic Rankine Cycle process-ORC) i gorivne ćelije (EPA, 2007). 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 tabelama 2.2 i 2.3 date su investicione i eksploatacione karakteristike različitih kogenerativnih uređaja.

Tabela 2.2 Investicione i eksploatacione karakteristike različitih kogenerativnih uređaja
(Trendewicz i Braun, 2013)

Tehnologija	Gasni motor	Gasne turbine	Mikroturbine	Gorivne ćelije
Investicioni troškovi (\$/kW)	465-1,600	1,100-2,000	800-1,600	3,800-5,280
Operativni troškovi i troškovi održavanja (\$/kWh)	0.01-0.025	0.008-0.01	0.012-0.025	0.004-0.019
Radni vek (h)	28,000-90,000	30,000-50,000	30,000-50,000	10,000-80,000
Proizvođač	Jenbacher, CAT, Waukesha	Solar, Kawasaki	Capstone, Ingersoll-Rand	UTC, Bloom Fuel Cell Energy

Tabela 2.3 Karakteristike jedinica za kombinovanu proizvodnju na bazi različitih tehnologija (Martinov i saradnici, 2012)

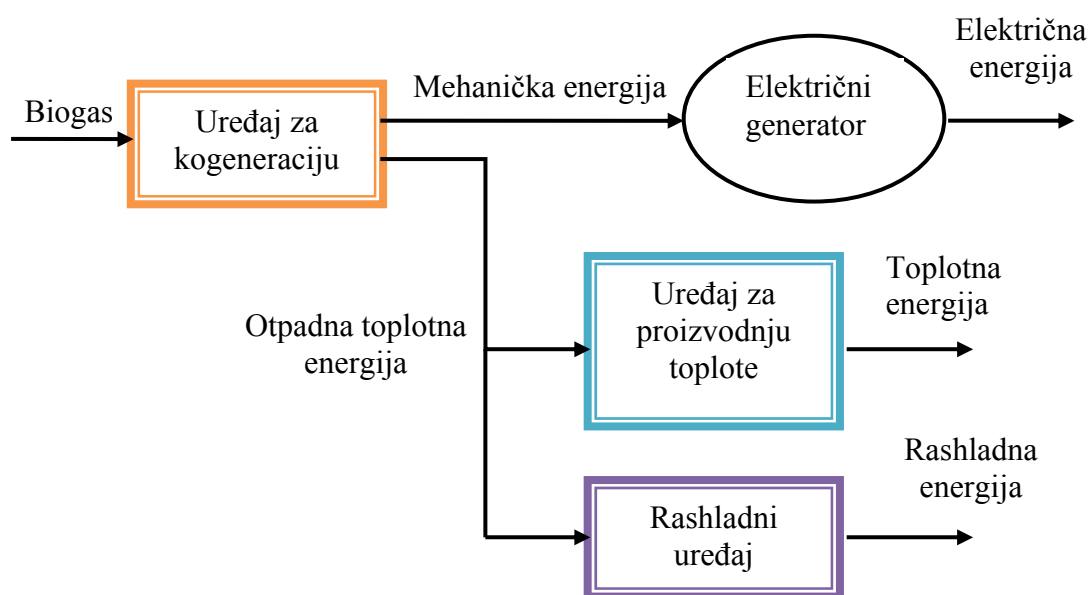
Sistem	Prednost	Nedostaci	Odnos proiz. toplote i električne energije	η_e % η_u %	Snaga, MWe
Gasni motori	Visoki stepeni efikasnosti; Povoljni za uređaje niže snage.	Viša cena goriva.	1:1 do 1.3:1	39-42 85	0.25-2.5
Gasne turbine	Visoka pouzdanost; Mala emisija; Ne zahteva hlađenje.	Nizak stepen efikasnosti u proizvodnji el.energije pri niskim opterećenjima; Potencijalni zastoji; Visoki troškovi održavanja; Visoke investicije.	1.5:1 do 5:1	22-36 70-75	0.5-250
Mikroturbine	Mogućnost upotrebe bilo koje vrste goriva; Brz start; Pouzdanost u radu.	Visoka cena; Nizak stepen efikasnosti u proizvodnji el.energije u poređenju sa gasnim turbinama.	1 do 1.2:1	15-30 65-75	0.015-0.35
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	0.01-100

η_e -stepen efikasnosti u proizvodnji el.energije; η_u -ukupan stepen efikasnosti

2.3.3 Korišćenje biogasa u postrojenju za trigeneraciju

Kada se biogas koristi u kogenerativnim sistemima, električna energija se proizvodi i koristi za svoje 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 takozvanom sistemu trigeneracije (spregnuta proizvodnja električne, toplotne i rashladne energije) (Vasilev, 2007). Šematski prikaz trigeneracijskog postrojenja sa biogasom dat je na slici 2.5.

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 (Huangfu i saradnici, 2007). 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 2.5 Blok dijagram trigeneracijskog postrojenja sa biogasom kao energentom

2.3.4 Korišćenje digestata nastalog u proizvodnji biogasa

Digestat nastaje kao nusproizvod u procesu anaerobne digestije. Biogasno postrojenje nominalne snage 500 kW_e generiše više od 10,000 tona digestata godišnje sa sadržajem suve materije oko 10% (Lootsma i Raussen, 2008). 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 (Kratzeisen i saradnici, 2010). Tipičan sastav digestata prikazan je u tabeli 2.4.

Tabela 2.4 Sadržaj suve materije i sastav digestata (azot, fosfor i kalijum) posle anaerobne digestije (Wendland, 2009)

	SM, %	N ukupno, kg/m ³	P ₂ O ₅ , kg/m ³	K ₂ O, kg/m ³
min	2.9	2.4	0.9	2
max	13.2	9.1	6.0	10.6
prosečna vrednost	6.7	5.4	2.5	5.4

Sastav 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, može se razmotriti i korišćenje suvog digestata kao čvrstog goriva (Kratzeisen i saradnici, 2010). Otpadna toplota iz postrojenja za kogeneraciju može se koristiti za sušenje digestata do sadržaja suve materije oko 80-90%. Osušeni 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.

2.3.5. Korišćenje biogasa u proizvodnji biometana - prečišćavanje biogasa

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 da se prečistiti od neželjenih komponenti koje sadrži (vodonik sulfid, ugljen-dioksid, vodena para).

Uklanjanje vodonik sulfida

Uklanjanjem vodonik sulfida (H_2S) sprečava se njegovo toksično i korozivno dejstvo. Sagorevanjem H_2S nastaju gasovi SO_2 i SO_3 , koji reaguju sa vodom, što za posledicu ima korozivno dejstvo na metalne delove postrojenja.

Opšta podela postupaka za uklanjanje vodonik sulfida, može se izvršiti na biološke, hemijske i fizičke. Najčešće se primenjuju biološki i hemijski postupci za uklanjanje vodonik sulfida, koji se odvijaju u fermentoru ili izvan njega. Pri biološkim postupcima, u gornji deo fermentora se uduvava vazduh, iz koga posebne bakterije koriste kiseonik da razgrade H_2S do elementarnog sumpora.

Za hemijski postupak uklanjanja vodonik sulfida, fermentorima se dodaju hloridi gvožđa, koji hemijski vezuju H_2S . U odnosu na biološki, ovaj postupak ima veće troškove (troškove hemikalija), ali se smanjuje mogućnost korozije u digestoru jer se ne koristi vazduh iz spoljašnje sredine. Pri sprovođenju eksternog hemijskog uklanjanja vodonik sulfida, primenjuje se „pranje“ biogasa, najčešće sa vodenim rastvorom natrijum-hidroksida, koji poboljšava apsorpcione karakteristike vode. Ovim postupkom mogu se postići visoke vrednosti efikasnosti u prečišćavanju biogasa, sa uklanjanjem i preko 95% H_2S .

Sušenje gasa - uklanjanje vodene pare

Sušenjem biogasa se sprečava kondenzacija vodene pare koja se nalazi u njemu. Time se sprečava oštećenje tehnoloških delova postrojenja, jer je onemogućeno zadržavanje vode u instalacijama i moguće pucanje procesne opreme, kao i eventualna korozija.

Najjednostavniji način uklanjanja vodene pare iz biogasa je uklanjanje hlađenjem ili podešavanjem pritiska. Sušenje se najčešće ostvaruje ako se biogas transportuje iz reaktora rutom gasovoda koji je ukopan u zemlju. Biogas se pri tome hladi, a voda kondenzuje na najnižem nivou i akumulira u odvajaču kondenzata. Kod nekih postrojenja sušenje se sprovodi i primenom električnih hladnjaka.

Uklanjanje CO₂

U industrijskoj praksi postoji nekoliko metoda izdvajanja CO₂ iz biogasa. Ove metode prema fenomenima prenosa na kojima se zasnivaju mogu se podeliti na:

- apsorpcione,
- adsorpcione,
- permeabilne,
- kriogene,
- biološke.

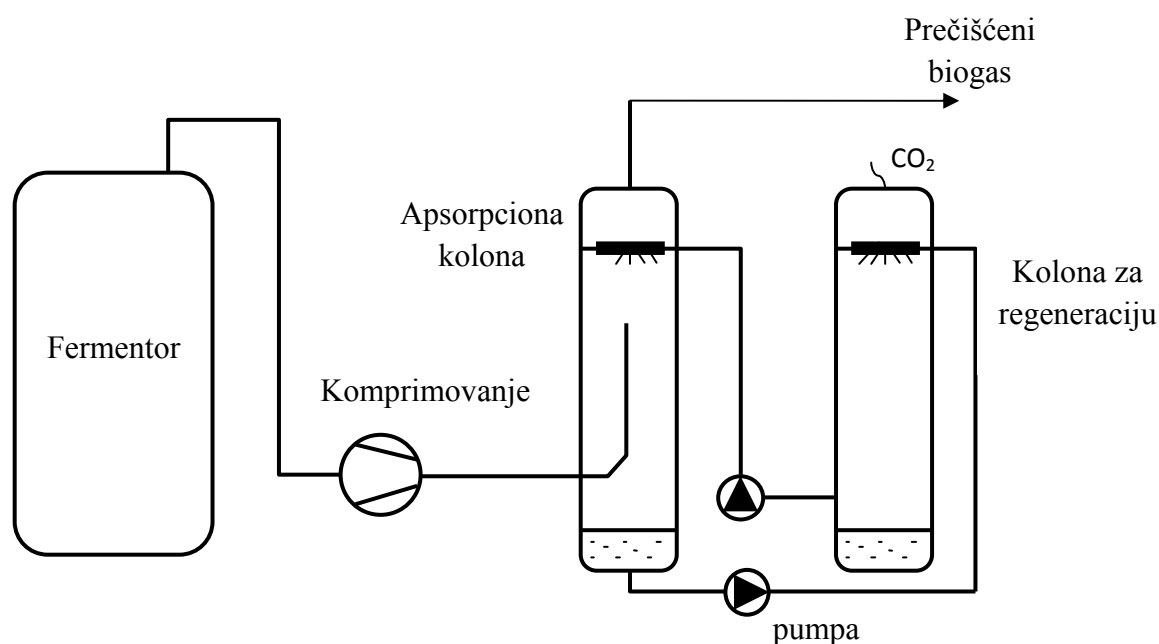
Separacione tehnologije koje se najčešće primenju su: skruberi (*eng.* water scrubbing - WATS), fizička apsorpcija, hemijska apsorpcija, ***adsorpcija sa promenljivim pritiskom*** i membranski postupci.

Prema literaturi (IEA, 2013) u Evropi ima više od 200 postrojenja za proizvodnju biometana. Većina postrojenja koristi WATS postupak, dok se najmanje primenjuju fizička apsorpcija i membranske tehnike.

Skruberi (water scrubbing -WATS)

Proces uklanjanja CO₂ iz biogasa skruberom (slika 2.6) predstavlja u svojoj osnovi fizički proces. Zasniva se na većoj rastvorljivosti CO₂ od CH₄ u vodi. Apсорpcije se poboljšava ako se biogas komprimuje pre prečišćavanja. Biogas u apсорpcionu kolonu

ulazi odozdo, a voda odozgo. Voda se raspršuje i pod uticajem sile gravitacije pada. CO₂ prisutan u biogasu se rastvara u vodi, tako da gas na izlazu ima preko 90% metana. Voda nakon izlaska iz kolone sadrži CO₂, pa se transportuje u kolonu za regeneraciju, gde se izdvaja CO₂, a voda se vraća u proces. Radni pritisak u ovom procesu iznosi od 6-12 bar (Beil i Hoffstede, 2010). Praksa (IEA, 2013) je pokazala da se WATS postupak koristi za širok spektar protoka biogasa, a najviše pri većim protocima biogasa od 500-2,000 m³_N/h.



Slika 2.6 Uklanjanje CO₂ iz biogasa WATS metodom (Wellinger i Lindberg, 2001)

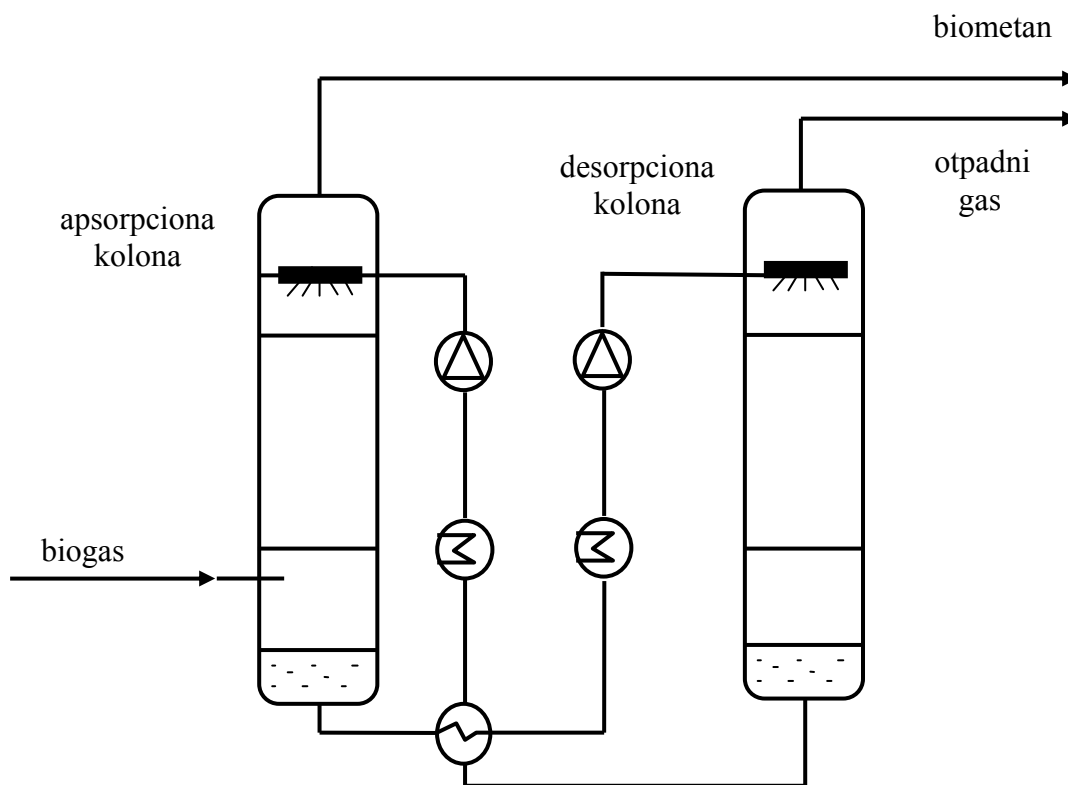
Fizička apsorpcija

Fizička apsorpcija CO₂ je proces koji koristi organsko jedinjenje kao apsorpciono sredstvo. Biogas se pre ulaza u kolonu komprimuje na oko 8 bar. Zatim se sprovodi njegovo pothlađivanje i sušenje. U apsorpcionoj koloni, biogas struji kroz apsorpciono sredstvo u kome se zadržava CO₂. Regeneracija apsorpcionog sredstva se sprovodi u posebnoj koloni. Potpuna desorpcija postiže se na temperaturama 50-80°C. Otpadni gas može da sadrži CH₄, pa se dodatno prečišćava (Beil i Hoffstede, 2010). Radni pritisak

je od 7-8 bar (Dirkse, 2009). Fizička apsorpcija se najčešće koristi za protoke biogasa u opsegu 500-2,000 m³_N/h (IEA, 2013).

Hemijska apsorpcija

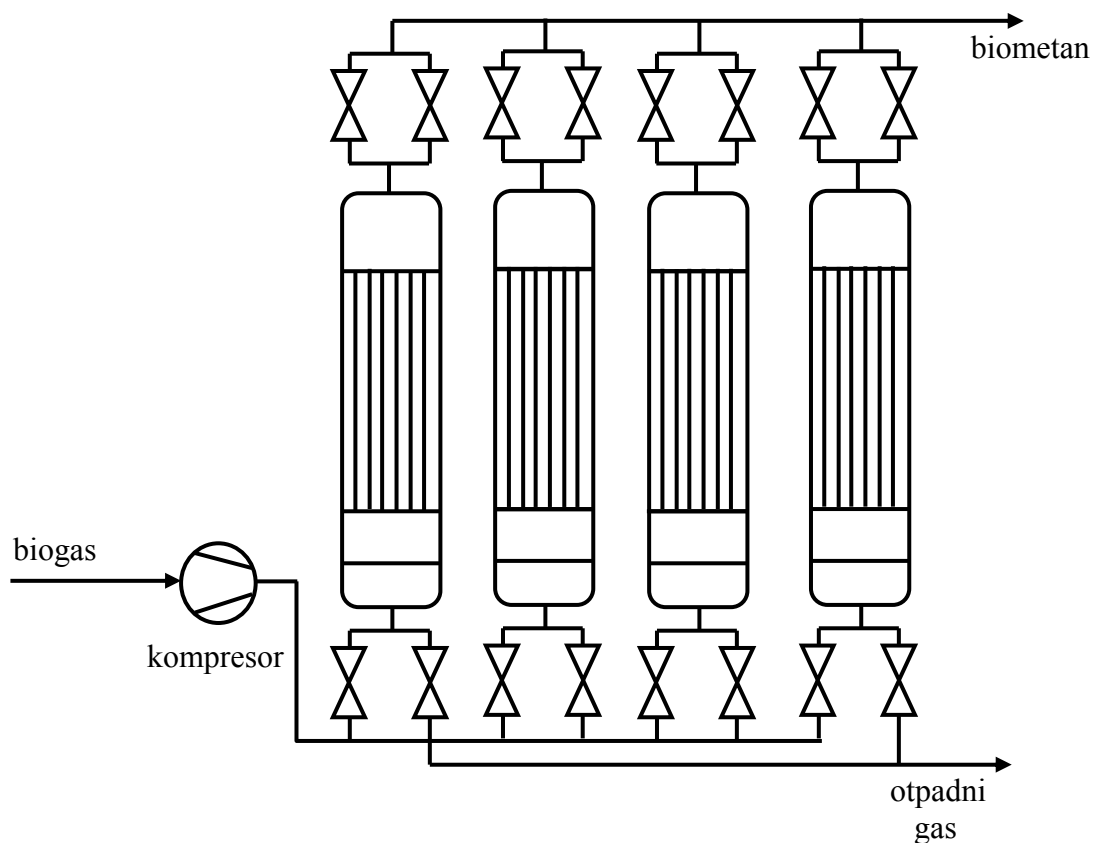
U postupku hemijske apsorpcije (slika 2.7) koriste se različite smeše vode i alkohol amina. Apsorpcija u koloni postiže se na malim nad pritiscima, od oko 100 mbar, do oko 4 bar. Regeneracija apsorpcionog sredstva odvija se u desorpcionoj koloni na povišenim temperaturama 110-160°C. U poređenju sa drugim postupcima, postiže se proizvodnja biometana visoke čistoće sa malim gubicima metana u otpadnom gasu. Zbog toga nije potreban dodatni tretman otpadnog gasa, osim sušenja (Beil i Hoffstede, 2010). Radni pritisak je oko 1 bar (Dirkse, 2009). Hemijska apsorpcija koristi se za protoke biogasa u opsegu od 500-1,000 m³_N /h (IEA, 2013).



Slika 2.7 Uklanjanje CO₂ iz biogasa procesom hemijske apsorpcije (Intelligent Energy, 2012)

Adsorpcija sa promenljivim pritiskom

Adsorpcija sa promenljivim pritiskom, (*eng.* Pressure swing adsorption-PSA) je postupak (slika 2.8), gde se ugljen-dioksid odvaja na površini čvrstog adsorbenta. Kao adsorbent mogu se koristiti aktivni ugalj ili molekulska ugljenična sita. Biogas se pre ulaska u adsorpcionu kolonu komprimuje na 4 do 7 bar. U koloni se nalazi molekulsko sito, na kome se zadržava CO₂, a CH₄ prolazi kroz otvore sita. Regenerisanje adsorbenta postiže se smanjenjem pritiska. Otpadni gas može sadržati CH₄, koji se odvaja u dodatnoj koloni. Opseg radnog pritiska je od 4-10 bar (Rickebosch i saradnici, 2011). Iskustva dobijena iz studije (IEA, 2013) ukazuju da se adsorpcija sa promenljivim pritiskom koristi za širok opseg protoka biogasa, osim za visoke protoke iznad 2,000 m³_N/h.

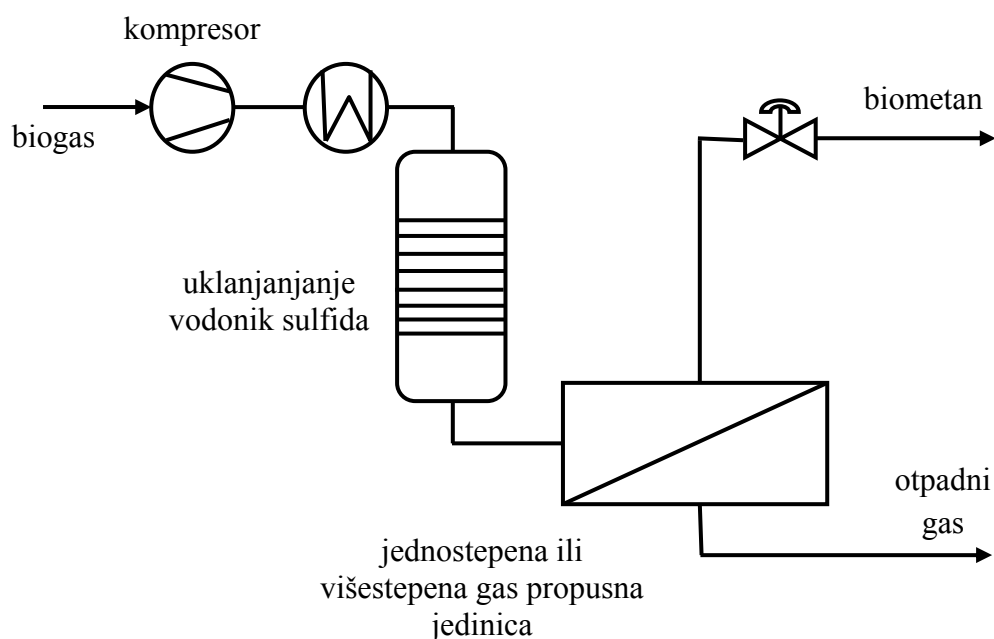


Slika 2.8 Uklanjanje CO₂ iz biogasa metodom PSA (Intelligent Energy, 2012)

Membranski procesi

Uklanjanje ugljen-dioksida membranama zasniva se na selektivnosti nekih membrana da imaju visoku propustljivost molekula CO_2 , H_2O , NH_3 i H_2S , a malu za CH_4 . Membrane se uglavnom prave od aromatičnih poliamida, acetata ili celuloznih polimera. Opseg radnog pritiska je za sisteme visokog pritiska 20-36 bar, dok je za sisteme niskog pritiska oko 1 bar (Rickebosch i saradnici, 2011). Vrednost CH_4 čistoće u izlaznom gasu je 90-97%.

Membranski procesi koriste se za kategoriju niskih i srednjih protoka biogasa, a posebno za protoke manje od $300 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$ (IEA, 2013). Proces uklanjanja CO_2 membranskim postupkom prikazan je na slici 2.9.



Slika 2.9 Uklanjanje CO_2 iz biogasa membranskim metodom
(Intelligent Energy, 2012)

2.3.6 Primena biometana u saobraćaju

Biogas se može prečistiti i komprimovati (bio-CNG), do udela metana preko 97% (tabela 2.5), do nivoa i kvaliteta komprimovanog prirodnog gasa (CNG). Kompresija se

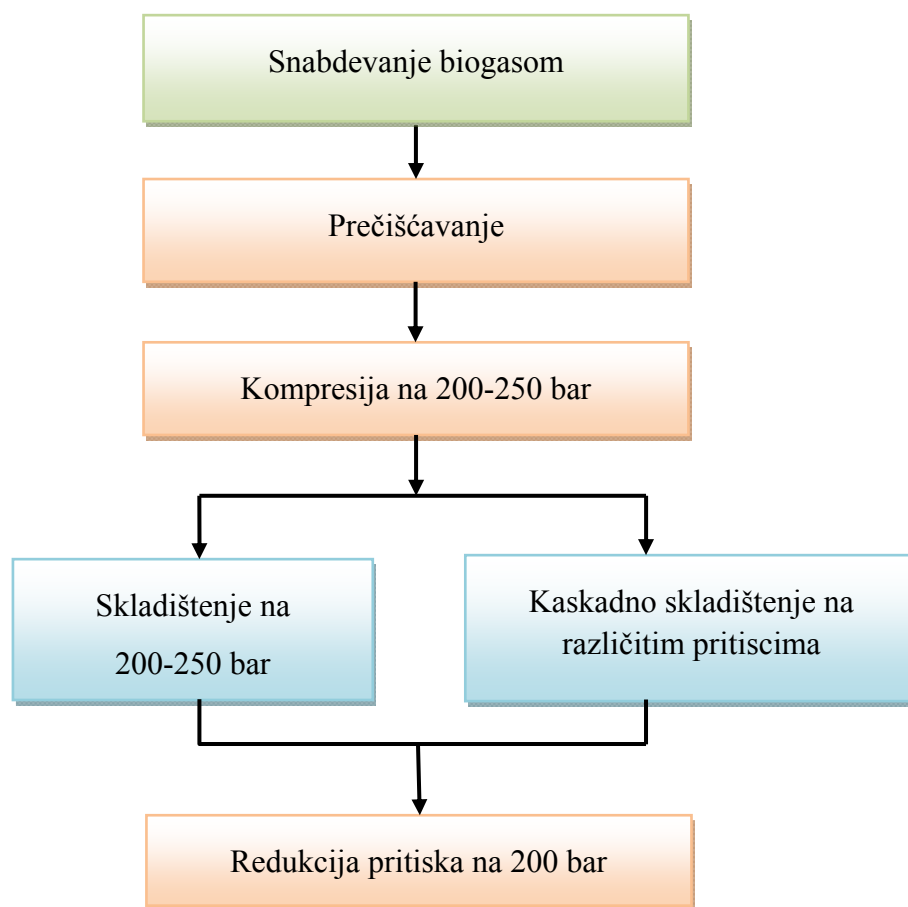
vrši do pritiska od 200-250 bar (slika 2.10). Ovaj energent može se koristiti u saobraćaju kao alternativa fosilnim energentima (benzinu i dizelu). Bio-CNG ima visok oktanski broj preko 110, što povećava odnos pritisaka i može rezultovati povećanjem efikasnosti termičke konverzije goriva. Dodatna prednost ovog resursa je i manja emisija izduvnih gasova, pre svega CO₂, CO i drugih ugljovodonika. Bio-CNG predstavlja gorivo bez prisustva olova što još više doprinosi njegovom ekološkom karakteru. Danas je u svetu prisutno preko 8.7 miliona vozila koja koriste CNG u Argentini, Pakistanu, Brazilu, Indiji, Rusiji, Iranu i Italiji (Ahman, 2010). U zemljama kao što su Italija i Argentina, CNG vozila predstavljaju između 10% i 20% ukupnog broja vozila (NGVA, 2008), pri čemu ne postoji veća ekonomska razlika između primene CNG i bio-CNG (Subramanian i saradnici, 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 i saradnici, 2011).

Tabela 2.5 Potreban kvalitet bio-CNG kao goriva u saobraćaju u Švedskoj (SGC, 2012)

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

Blok dijagram proizvodnje, skladištenja i distribucije bio-CNG dat je na slici 2.10.

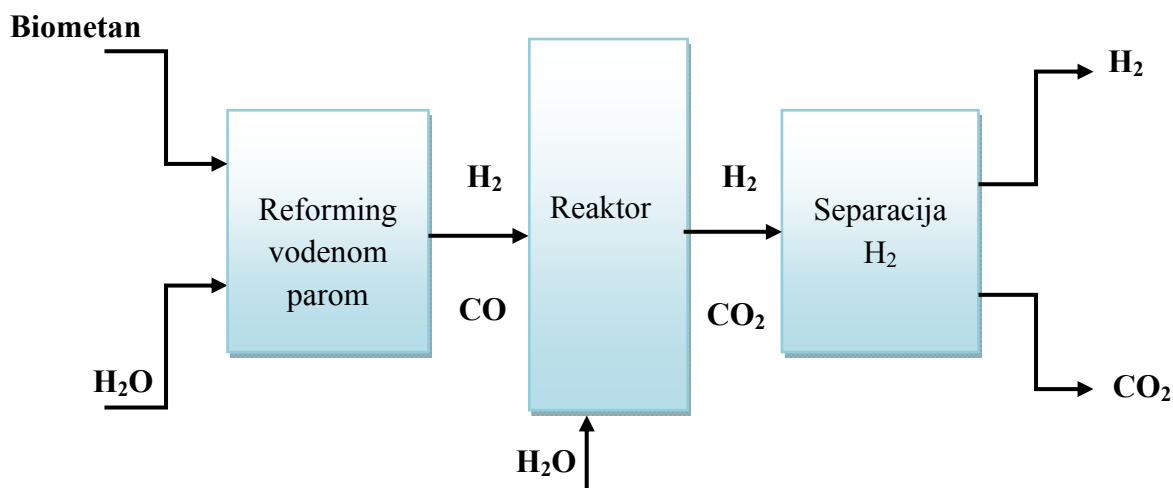


Slika 2.10 Produkcija, skladištenje i distribucija bio-CNG-a kao goriva u saobraćaju (Yang i saradnici, 2014)

2.3.7 Biogas u proizvodnji biovodonika

Biogas kao izvor metana može se koristiti kao reaktant u reformingu vodenom parom, u kome kao krajnji produkt nastaje vodonik. Reforming vodenom parom je proces koji se široko koristi u industrijskoj proizvodnji vodonika još od 1930. godine i trenutno se 80-85% svetske proizvodnje vodonika dobija na ovaj način.

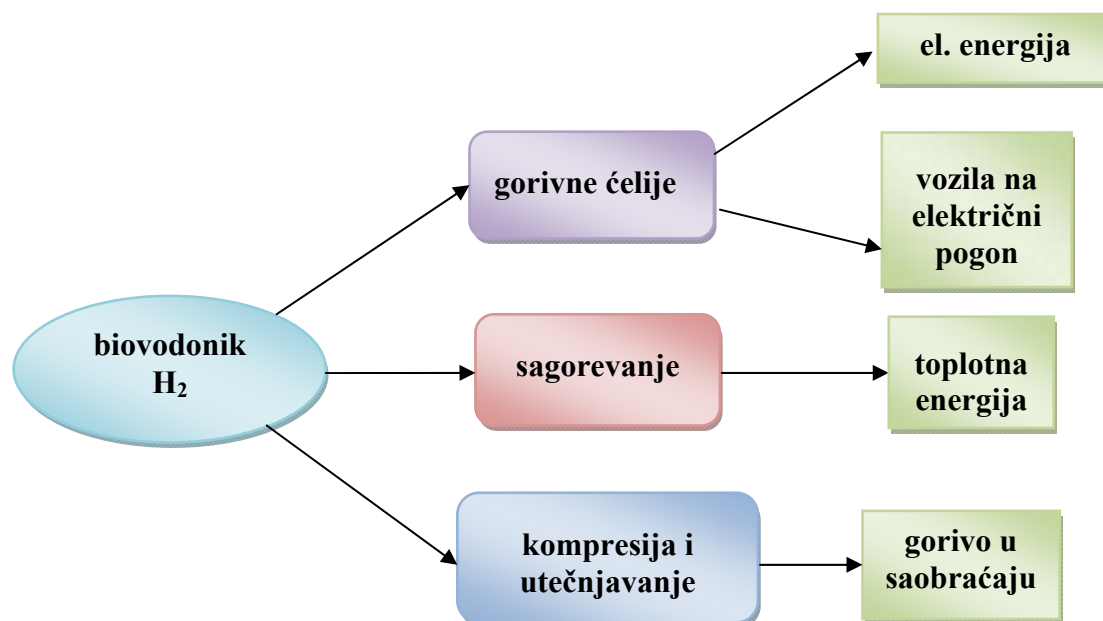
Reforming vodenom parom predstavlja endoterman proces, koji se odvija u temperaturnom opsegu od 600-1,000°C u prisustvu katalizatora, za koji treba obezbediti potrebnu energiju. Blok dijagram postrojenja za dobijanje vodonika iz biogasa reformingom vodenom parom dat je na slici 2.11.



Slika 2.11 Blok dijagram tipičnog postrojenja za dobijanje biovodonika iz biometana reformingom vodenom parom

U sastav biogasa ulazi vodonik sulfid (do 20,000 ppm), koji može da inhibira katalizatore koji se koriste u ovom procesu. Vodonik sulfid može na temperaturama od 873-1,200 K (Appari i saradnici, 2014) da formira naslage sumpora, koje mogu da deaktiviraju katalizatore i zaustave hemijski proces. Stoga je uklanjanje vodonik sulfida od izuzetne važnosti za korišćenje biogasa u proizvodnji biovodonika. Troškovi proizvodnje biovodonika iz biogasa iznose 0.27 USD/kWh sa periodom povratka investicije od osam godina (Braga i saradnici, 2013).

Osnovni katalizatori koji se koriste u procesu reforminga vodenom parom su Ni i legure Rh/Ni. Tokom korišćenja biogasa kao reaktanta za proizvodnju biovodonika moguće je formiranje naslaga ugljenika, koje mogu da dovedu do trovanja katalizatora (Izquierdo i saradnici, 2012). Da bi se to izbeglo dodaju se CO₂, vazduh ili vodena para. Na primer, dodatkom vodene pare može se u potpunosti sprečiti nastajanje naslaga ugljenika, što povećava konverziju metana preko 98% (Effendi i saradnici, 2005). Zahvaljući visokom toplotnom sadržaju i malom uticaju na životnu sredinu, vodonik je našao moguću primenu kao energent (slika 2.12). Biogas kao izvor metana može se koristiti u samom procesu kao sirovina za proizvodnju vodonika, ali i kao energetske resurs koji obezbeđuje toplotnu energiju za ovaj proces.



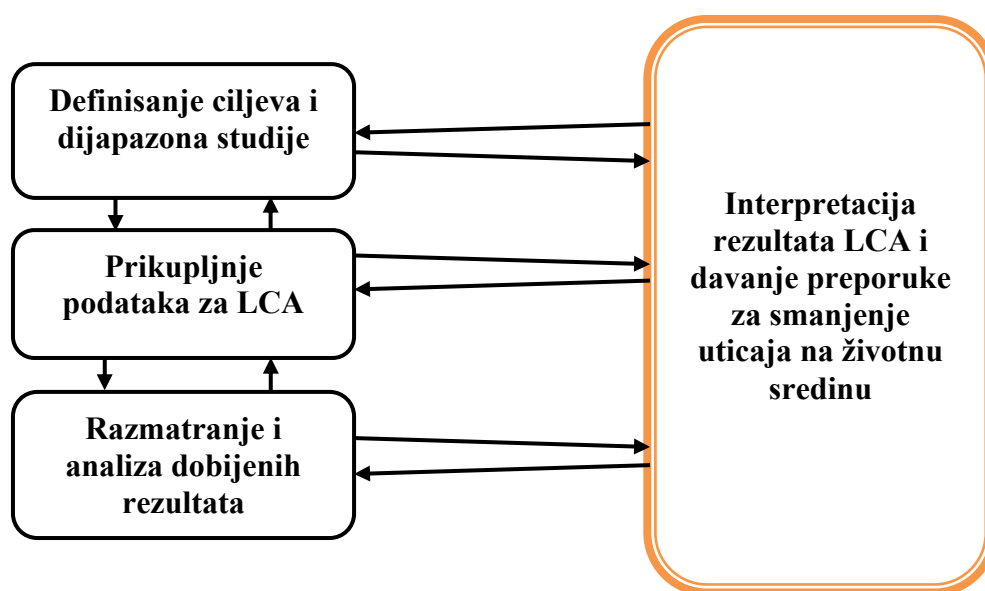
Slika 2.12 Opcije korišćenje biovodonika u proizvodnji energije

2.4 Koncept životnog ciklusa

Da bi se izvršila kompletna analiza uticaja na životnu sredinu proizvodnih procesa i sistema, oni se moraju posmatrati u svom celokupnom životnom ciklusu (od projektovanja do finalne upotrebe ili prestanka korišćenja). Imajući ovo u vidu, uveden je koncept analize životnog ciklusa (eng. Life cycle assesment-LCA) proizvodnih procesa ili proizvoda u posmatranju njihovih uticaja na prirodno okruženje. Ovaj koncept razmatra uticaje na životnu sredinu od ekstrakcije sirovina za proizvodni proces ili proizvod pa do finalne upotrebe proizvoda, odlaganja proizvoda na deponiju ili ponovne upotrebe proizvoda. Ekstrakcija prirodnih resursa i njihovo korišćenje se određuje i uključuje u razmatranje uticaja ovih procesa na ključne ekološke resurse kao što su vazduh, voda i zemljište.

Analiza obuhvata: snabdevanje resursima, proces proizvodnje, transport, distribuciju, ponovnu upotrebu, reciklažu i odlaganje proizvoda ili kraj proizvodnog procesa. Svi tokovi materijala i energije su obuhvaćeni LCA analizom.

Prve LCA studije pojavile su se sredinom šezdesetih godina 20. veka. Osnivanje organizacije SETAC (Society for Environmental Toxicology and Chemistry), doprinelo je da LCA analiza postane jasnija i standardizovanija (Sonnemann i saradnici, 2003). Standardizacija ove metodologije je uspostavljena 1993. godine, kada su objavljeni prvi ISO standardi za razvoj međunarodne norme i pravila za LCA metodologiju (Sonnemann i saradnici, 2003). Ova standardizacija je postavila osnovu za sve buduće LCA studije. U 2006. godini izvršeno je revidiranje ovih standarda, kada su uspostavljena dva nova standarda (ISO 14040: 2006 Menadžment životnom sredinom - Ocenjivanje životnog ciklusa - Principi i okvir i ISO 14044: 2006 Menadžment životnom sredinom - Life Cycle Assessment - Zahtevi i smernice). Faze LCA analize prikazane su na slici 2.13.



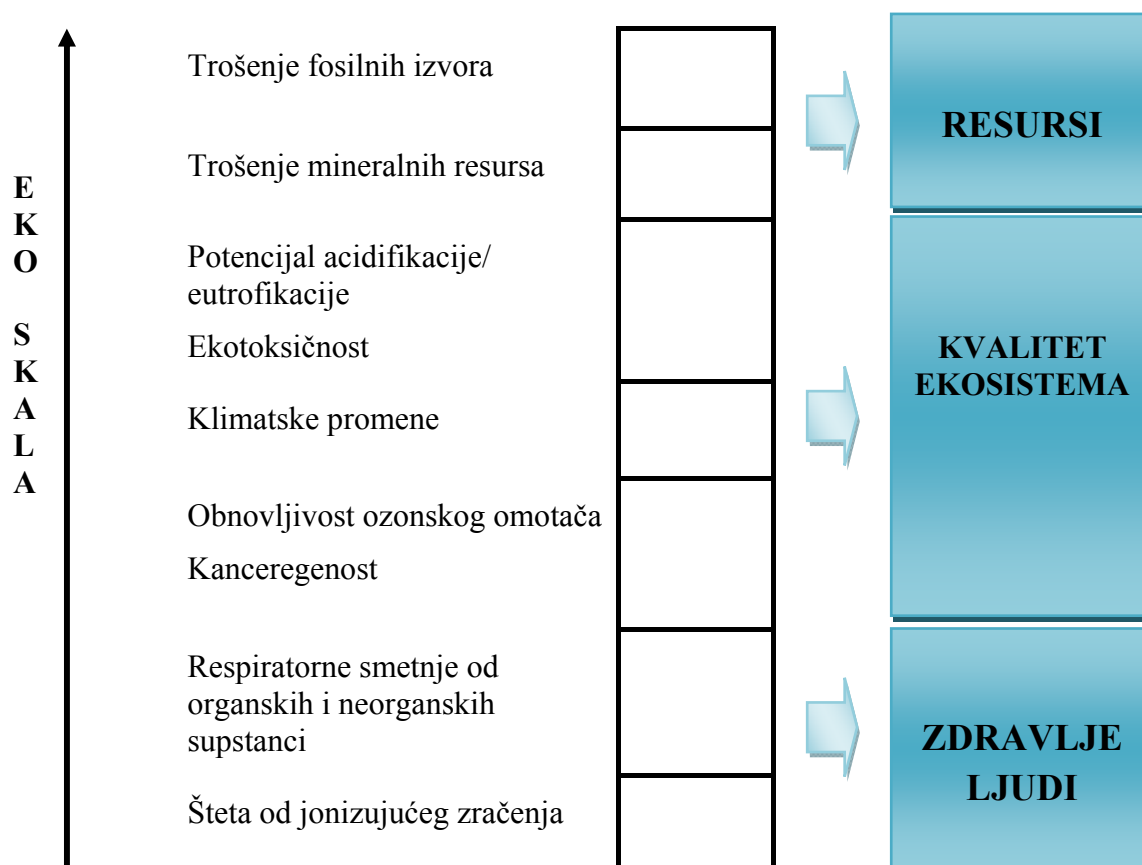
Slika 2.13 Faze LCA analize (ISO 14040, 2006)

Iste obuhvataju:

- definisanje ciljeva i opsega studije sa definisanjem granica sistema za analizu,
- prikupljanje podataka, pri čemu se sakupljaju svi ulazi unutar granice sistema za analizu i u kome se izlazi određuju i prezentuju,

- procena uticaja životnog ciklusa na životnu sredinu, pri čemu su uticaji određeni i kvantifikovani,
- analiza rezultata zasnovanih na prethodnim fazama gde su opisani uticaji na životnu sredinu i date preporuke za smanjenje uticaja na životnu sredinu procesa ili proizvoda.

Šematski prikaz mogućih uticaja procesa i proizvoda na životnu sredinu, koji se razmatraju kroz LCA analizu prikazan je na slici 2.14.



Slika 2.14 Šematski prikaz mogućih uticaja procesa i proizvoda na životnu sredinu koji se razmatraju kroz LCA analizu (Pre' Tutorial, 2006)

Kao što se može videti sa slike 2.14, LCA analiza razmatra uticaj procesa ili proizvoda na nivo korišćenja fosilnih i mineralnih resursa, na kvalitet ekosistema kao i uticaj na

zdravlje ljudi. Tokom LCA analize moguće je razmatrati sve ove navedene uticaje ili samo neke pojedinačno, u zavisnosti od granice sistema za analizu i vrste procesa.

LCA analiza bioenergetskih sistema

Pod bioenergetskim sistemima podrazumevamo proizvodne sisteme koji za proizvodnju energije koriste biomasu ili energente nastale iz biomase. Studije životnog ciklusa bioenergetskih sistema mogu se svrstati u tri grupe (Liska i Cassman, 2008; Cherubini i Strømman, 2011):

- analiza tokova energije u životnom ciklusu (LCEA), koja je fokusirana na razmatranje trošenja fosilnih resursa, energetske efikasnost ili karakterizaciju biogoriva sa aspekta obnovljivosti,
- procena emisije GHG gasova tokom životnog ciklusa,
- procena životnog ciklusa, u kojoj se razmatra uticaj različitih kategorija koje su prikazane na slici 2.14 i njihov uticaj na životnu sredinu.

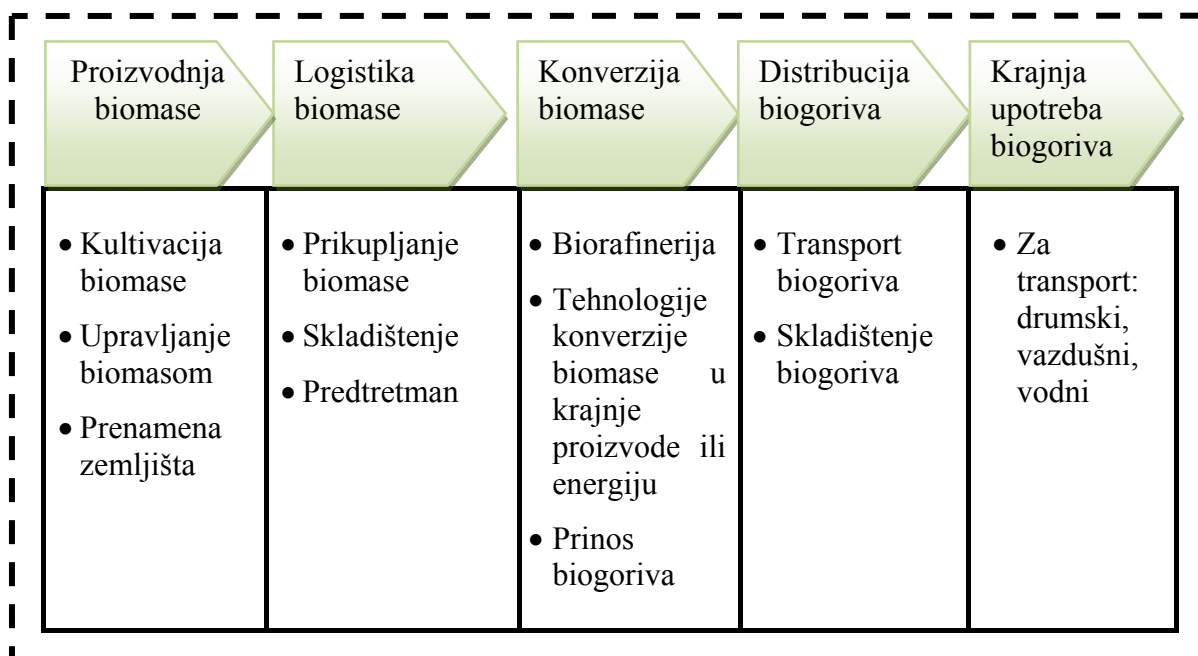
Osim toga, LCA studije bioenergetskih sistema se mogu podeliti (van der Voet i saradnici, 2010) na:

- komparativne studije LCA, u kojima se bioenergetski sistemi upoređuju sa energetske sistemima koji koriste fosilne resurse (ove analize se koriste u cilju kreiranja energetske politika kada treba izvršiti supstituciju nekog fosilnog izvora),
- LCA studije bioenergetskih sistema koje se koriste za dobijanje uvida u najveće uticaje na životnu sredinu u lancu proizvodnje energije iz određenog izvora biomase, i
- LCA studije bioenergetskih sistema koje se koriste da identifikuju glavne faze u životnom ciklusu proizvodnje energije iz biomase, sa ciljem da kompanije koje proizvode energiju iz biomase poboljšaju efikasnost u tim fazama.

Važni metodološki izazovi u oblasti LCA bioenergetskih sistema odnose se na izbor jedinične veličine na osnovu koje se porede ulazne i izlazne vrednosti za posmatranu granicu sistema (ISO 14040, 2006). Najčešće se ova jedinična veličina iskazuju (Malça i Freire, 2011):

- u pređenom 1 km u određenom vozilu koje koristi biogorivo koje je predmet analize;
- po 1 MJ proizvedenog biogoriva;
- po 1 kg proizvedenog biogoriva;
- po 1 litar proizvedenog biogoriva; i
- po 1 ha zemljišta za proizvodnju biomase iz koje je proizvedeno biogorivo koje je predmet analize.

Na slici 2.15 prikazan je bioenergetski sistem sa fazama životnog ciklusa.



Slika 2.15 Prikaz bioenergetskog sistema sa fazama životnog ciklusa
(Zhang i saradnici, 2015)

Bilans energije i razmatranje uštede gasova sa efektom staklene bašte, zahtevaju uspostavljanje odgovarajuće referentne osnove. Najčešće se kao referentne osnove koriste fosilna goriva (benzin ili dizel). Izbor granice sistema za koji se vrši LCA analiza je od ključne važnosti za krajnje rezultate i njihovu interpretaciju. Granica sistema može obuhvatiti sve ili pojedinačne faze životnog ciklusa procesa ili proizvoda sa svim materijalnim i energetskeim tokovima.

3. ANALIZA STANJA KORIŠĆENJA BIOGASA U REPUBLICI SRBIJI

Sektor energetike je najveći ekonomski sektor i ima značajnu ekonomsku ulogu u Republici Srbiji, sa udelom od preko 10% u bruto društvenom proizvodu (BDP). Ukupni utrošak primarne energije u Srbiji bio je 16.19 Mega tona ekvivalenata nafte (Mten) u 2011. godini, od čega je domaća proizvodnja 62%, a iz uvoza je 38% (SEPA, 2012). Domaća proizvodnja primarne energije uključuje eksploataciju i korišćenje domaćih resursa uglja, sirove nafte, prirodnog gasa i obnovljivih izvora energije (hidro potencijali, drvena biomasa, geotermalna energija i dr.).

Klimatske promene, uglavnom uslovljene povećanjem emisije iz energetskeg sektora, kao i smanjenje rezervi fosilnih goriva inicirali su brojne mere na globalnom nivou za njihovo ublažavanje. Jedna od tih mera je i povećanje korišćenja obnovljivih izvora energije, što je definisano u direktivi Evropske Unije 2009/28/EC (Res direktiva, 2009).

Republika Srbija, kao kandidat za pridruživanje EU, obavezala se da sprovodi načela EU i da implementira konkretne mere kako bi podržala proizvodnju i korišćenje „zelene” energije.

U Republici Srbiji postoje dva prioriteta koja se odnose na obnovljive izvore energije:

1. Uspostavljanje stabilnog i stimulativnog regulatornog okvira za obnovljive izvore energije.

2. Razvoj i izgradnja novih energetske infrastrukturnih postrojenja (elektrana i energetske mreže) za proizvodnju energije iz obnovljivih izvora energije, njen prenos i distribuciju.

U procesu pridruživanja EU, Republika Srbija je prihvatila obavezu da primenjuje sve direktive EU koje se odnose na obnovljive izvore energije. Srbija je, takođe, prihvatila obavezu da poveća udeo obnovljivih izvora energije u ukupnoj finalnoj potrošnji sa 21.1% u 2009. na 27% u 2020. (NREAP, 2013). Kako bi dostigla navedeni cilj, Republika Srbija je pripremila Akcioni plan za obnovljive izvore do 2020. godine. Prema tom planu Republika Srbija bi trebalo da ima 30 MW instalisanih postrojenja za proizvodnju električne energije iz biogasa do 2020. godine (NREAP, 2013).

U Republici Srbiji ne postoji registar proizvodnih potencijala biogasa iz različitih sirovina. Kroz komparativni pristup u analizi potencijala za proizvodnju biogasa iz najvažnijih resursa, kao i na osnovu analize postojećih ekonomskih i administrativnih prepreka za korišćenje biogasa, cilj ovog rada je da doprinese postavljanju osnova koje će se koristiti za identifikaciju stvarnih i ekonomski održivih potencijala za proizvodnju i primenu biogasa u Republici Srbiji.

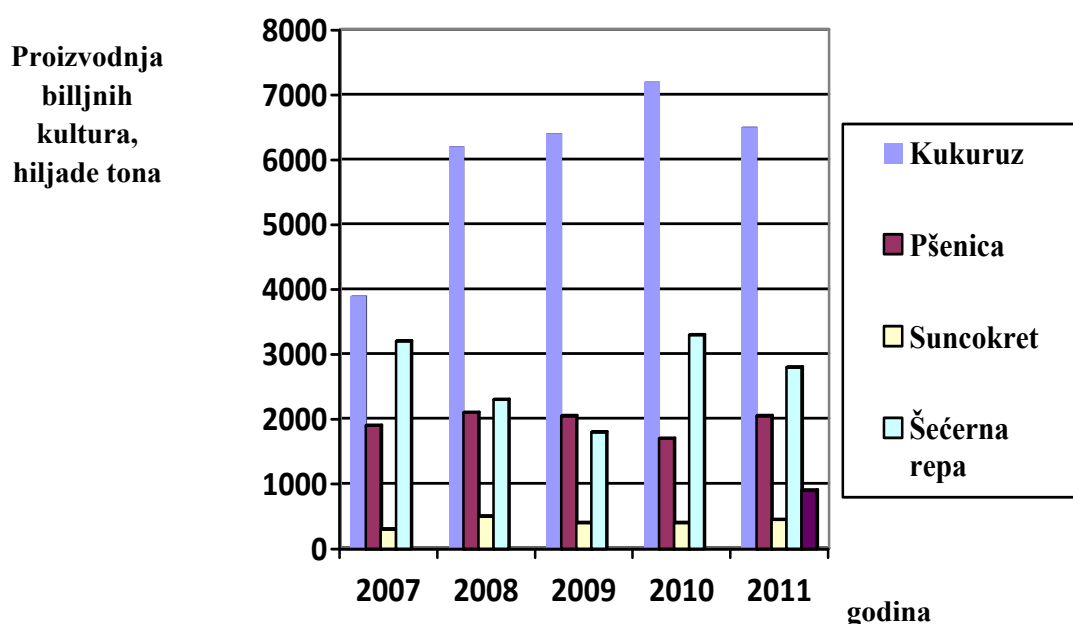
Na osnovu analize prethodnih istraživanja potencijala za proizvodnju biogasa, koja su data u uvodnom poglavlju, u ovoj tezi korišćeni su poljoprivredni usevi, otpadni tokovi iz stočarstva, komunalni otpad, otpadni tokovi industrije prerade mesa i mleka kao izvori za koje je određen potencijal za proizvodnju biogasa. U nastavku je dat njihov statistički prikaz.

Poljoprivredni usevi

Poljoprivreda je značajan sektor srpske ekonomije koji obuhvata 20% ukupne zaposlenosti i 8.3% u BDP. Od ukupne površine Srbije od 7.8 miliona hektara, poljoprivredno zemljišta obuhvata 5.1 milion ha od koji je 1.55 miliona ha pod

pašnjacima, dok se 3.35 miliona ha obrađuje. Svake godine preko 0.2 miliona ha ostane neobrađeno, (NREAP, 2013).

Na slici 3.1 prikazana je proizvodnja glavnih kultura u Srbiji u periodu 2007-2011. godine (Statistika, 2013). Najvažnije biljne kulture u Srbiji su kukuruz i pšenica. Prema Akcionom planu za biomasu za period od 2010.-2012. godine, potencijali u agrarnom sektoru za proizvodnju energije su preko 1 Mten; ostaci useva 1.023 Mten i tečni stajnjak za proizvodnju biogasa 42.24 kten (razmatran je samo stajnjak sa srednjih i velikih farmi u Srbiji).



Slika 3.1 Proizvodnja glavnih biljnih kultura u Srbiji u periodu od 2007. do 2011. godine (Statistika, 2013)

Otpadni tokovi iz stočarstva

Stočarstvo predstavlja vodeću poljoprivrednu granu u Republici Srbiji, i u najvećoj meri obuhvata uzgoj goveda, svinja, ovaca, koza i živine. Stočni fond u Republici Srbiji je prikazan u tabeli 3.1 (Statistika, 2013).

Tabela 3.1 Stočni fond u R. Srbiji u periodu od 2007.- 2011. godine (Statistika, 2013)

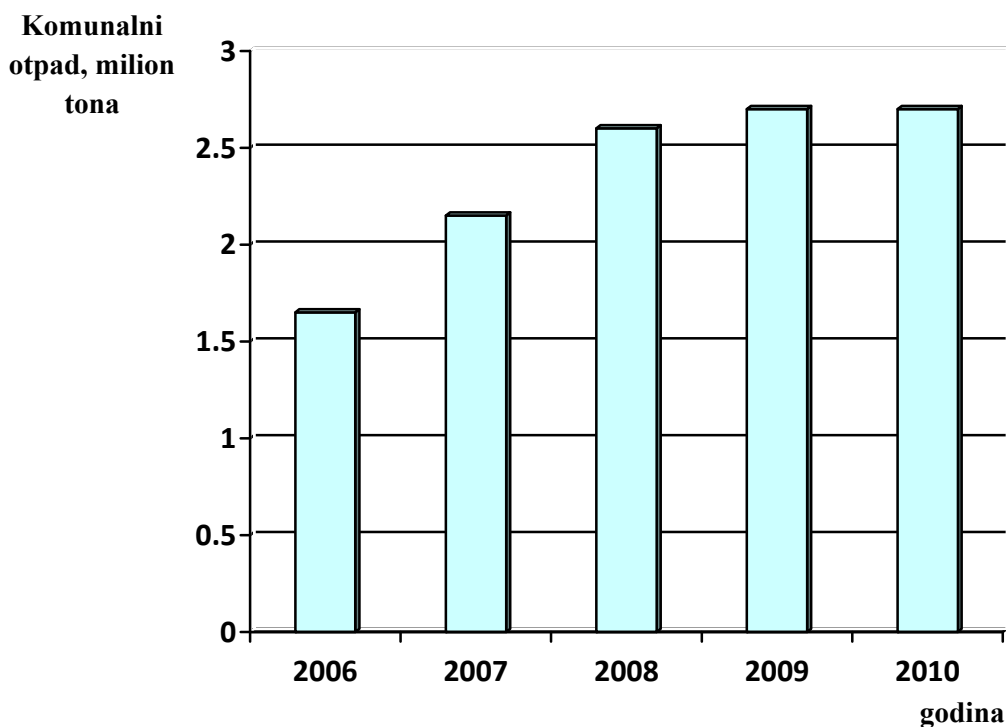
	2007	2008	2009	2010	2011
Goveda (broj u hiljadama)	1,087	1,057	1,002	938	937
Svinje (broj u hiljadama)	3,832	3,594	3,631	3,489	3,287
Ovce (broj u hiljadama)	1,606	1,605	1,504	1,475	1,460
Živina (broj u hiljadama)	16,422	17,188	22,821	20,156	19,103

Otpadni tokovi iz stočarstva su pogodan materijal za proizvodnju biogasa, jer pored toga što sadrže organsku materiju sadrže i anaerobne bakterije koje se mogu koristiti za početak procesa anaerobne digestije. Prema poljoprivrednoj praksi u Srbiji, poljoprivrednici sakupljaju stajnjak životinja u lagunama ili u skladišnim rezervoarima. Zbog prirode uzgoja, stajnjak ovaca i koza je teško sakupljati i koristi za proizvodnju biogasa.

Komunalni otpad

Komunalni otpad predstavlja otpad koji se generiše u domaćinstvima, ali i drugi otpad koji je po svom sastavu i prirodi sličan otpadu iz domaćinstava. Količina i sastav ove vrste otpada zavisi od stepena ekonomskog razvoja zemlje, životnog standarda i potrošačkih navika. Indikator korišćen za kvantifikaciju proizvodnje komunalnog otpada je količina otpada generisana po osobi po godini.

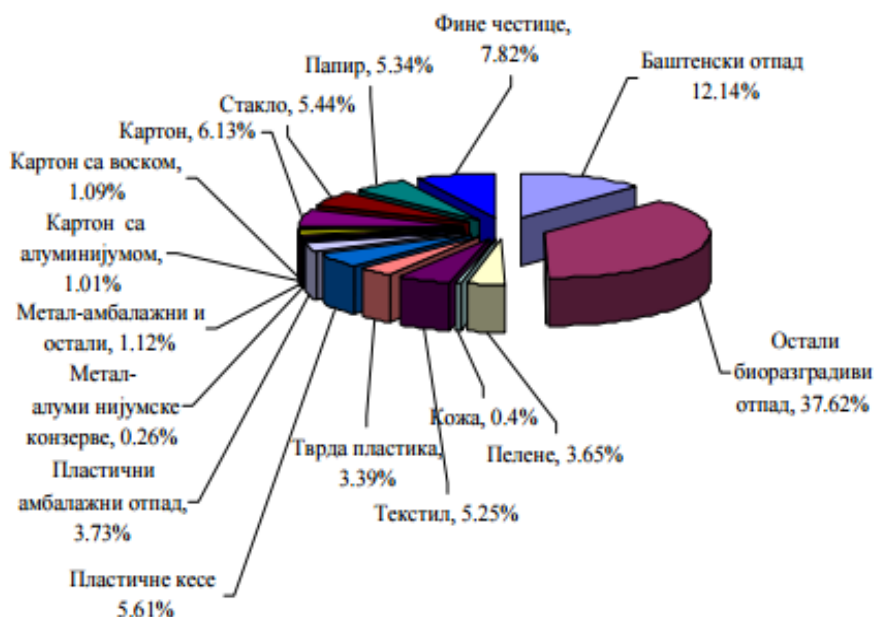
U Srbiji ovaj indikator iznosi 0.36 t/osobi/godini (Statistika otpada, 2012). Proizvodnja komunalnog otpada u Srbiji za period 2006. godine do 2010. godine, data je na slici 3.2 (Statistika otpada, 2012).



Slika 3.2 Generisani komunalni otpad u Republici Srbiji po godinama od 2006. godine do 2010. (Statistika otpada, 2012)

Određivanje sastava komunalnog otpada prikazano je na slici 3.3. Isti pokazuje da je dominantna organska biorazgradiva frakcija sa oko 50% u ukupnoj količini što predstavlja dobar potencijal za proizvodnju biogasa u procesu anaerobne digestije (Studija Tehnički fakultet Novi Sad, 2008).

Prema regulativi EU, energija proizvedena iz biorazgradive frakcije komunalnog otpada smatra se obnovljivom energijom. Evropska agencija za životnu sredinu procenjuje da se 30-40% komunalnog otpada generisanog u Evropi može koristiti za anaerobnu digestiju (Studija Tehnički fakultet Novi Sad, 2008; AEBIOM, 2009).



Slika 3.3 Kompozicija komunalnog otpada u Republici Srbiji
(Studija Tehnički fakultet Novi Sad, 2008)

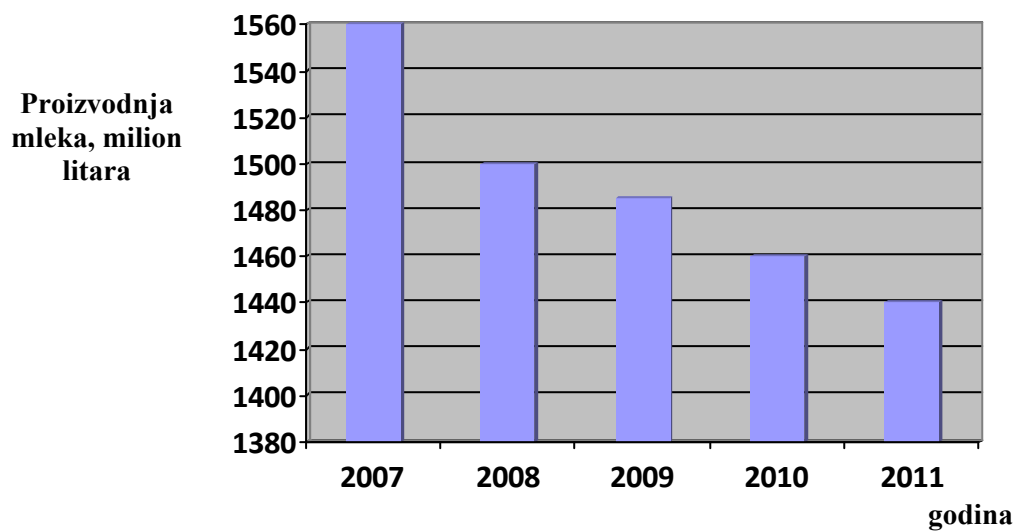
Otpadni tokovi iz industrije prerade mesa

Otpad iz industrije prerade mesa se generiše u industrijskom procesu kao što su klanice, fabrike mesnih proizvoda i slično. Otpad iz prerade mesa je idealna sirovina za proizvodnju biogasa, jer sadrži visoku koncentraciju organske materije (proteine i masti). Tipičan prinos biometana iz otpadnih tokova industrije prerade mesa je između 225 i 978 m³ metana po toni organske suve materije otpada iz prerade mesa (Pitk i saradnici, 2012; Hejnfelt i Angelidaki, 2009). Republika Srbija ima oko 900 registrovanih klanica i fabrika za preradu mesa. Prema podacima (Strategija upravljanja otpadom, 2010), animalni otpad u Srbiji uključuje 28,000 t/godišnje ostataka uginulih životinja i 245,000 t/godišnje otpada iz klanica. Zakonska regulativa za proizvodnju biogasa iz ove vrste otpada usvojena je 2011. godine i potpuno je usklađena sa regulativom EU (Pravilnik o animalnom otpadu, 2011). Biogas tehnologija može biti dobar način da fabrike koje proizvode ovu vrstu otpadnog toka, regulišu problem odlaganja ovog tipa otpada, a da pri tome i zarade.

Industrija prerade mleka

Otpadne vode iz prehrambene industrije su biodegradabilne sa visokom koncentracijom organskih sastojaka, pa predstavljaju idealan materijal za proizvodnju biogasa. Teško je predvideti sastav otpadnih voda iz prehrambene industrije zbog različitih vrednosti biološke potrošnje kiseonika (BOD), pH vrednosti otpadnih voda iz proizvodnih procesa prehrambene industrije kao i sezonske prirode prerade hrane. U prehrambenoj industriji, industrija prerade mleka je najveći izvor otpadnih voda u mnogim zemljama. Ove otpadne vode su visoko biodegradabilne i mogu biti tretirane sistemima za biološki tretman otpadnih voda u cilju proizvodnje biogasa (Cristian, 2010).

Proizvodnja mleka u Republici Srbiji je jedna od najvažnijih poljoprivrednih grana, koja uključuje više od 280,000 proizvođača i značajno doprinosi srpskoj ekonomiji. To je sektor sa godišnjim obrtom od preko 500 miliona evra. Proizvodnja mleka opala je u periodu 2007-2011. (slika 3.4), jer je zbog ekonomske krize smanjen stočni fond (Statistika, 2013).



Slika 3.4 Proizvodnja mleka u Republici Srbiji u periodu 2007.-2011. (Statistika, 2013)

Mleko se pretežno proizvodi na malim porodičnim farmama, a oko 50% ukupne proizvodnje i prerade mleka ostvare velike kompanije (Nacionalni program poljoprivrede Srbije, 2010).

U nastavku ovog poglavlja, analizirana je proizvodnja energije iz biogasa u Republici Srbiji kroz razmatranje državnih podsticajnih mera za proizvodnju energije iz biogasa, analizu postojećih biogasnih postrojenja u Srbiji, njihovih tehničkih karakteristika i sirovina koje koriste za proizvodnju biogasa. Razmotrene su i prepreke koje sprečavaju širu upotrebu biogasa za proizvodnju energije u Republici Srbiji.

3.1 Podsticaji za energiju dobijenu iz biogasa

Srbija je usvojila novi sistem podrške za proizvodnju električne energije iz biogasa kroz podzakonska dokumenta (Uredba o povlašćenim proizvođačima, 2013; Feed in tarife, 2013), tokom 2013. godine. Ovi propisi definišu uslove za dobijanje podsticajnih mera feed in tarife (tabela 3.2), i proceduralne odredbe za dobijanje feed in tarifa za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora:

- vrstu obnovljivih izvora i veličinu postrojenja podobnih za dobijanje feed in tarife,
- povlašćenu feed in tarifu kao funkciju vrste obnovljivog izvora i veličine postrojenja,
- korake u procesu dobijanja statusa povlašćenog proizvođača,
- proceduru plaćanja feed-in tarife na osnovu posebnog ugovora između proizvođača električne energije iz obnovljivih resursa i javnog snabdevača.

Feed in tarifa se dodeljuje povlašćenim proizvođačima na period od 12 godina i 2.5 do 3 puta je veća od tržišne cene električne energije u Srbiji, koja iznosi oko 6 evro centi po kWh. U 2016. godini potrošači su plaćali 0.093 dinara po kWh na svojim računima za utrošenu električnu energiju za podsticaj proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora.

Lokalnim samoupravama u Srbiji data je odgovornost za stimulisanje proizvodnje toplotne energije iz biogasa, ali one ne raspolažu odgovarajućim fondovima. Drugi

podsticaji za izgradnju biogas postrojenja su oslobođanje od plaćanja carine i podsticaji za investicije u nerazvijena područja Republike Srbije.

Tabela 3.2 Feed in tarifa za biogasna postrojenja u Republici Srbiji (Feed in tarife, 2013)

Instalisana snaga postrojenja, (MW)	Feed in tarifa (cEuro/kWh)
do 0.2	15.66
od 0.2 – 1	$16.498 - 4.188 \cdot P^2$
preko 1	12.31
Sporedni proizvodi životinjskog porekla	12.31

² P -instalisan snaga postrojenja u MW_e

3.2 Status energije dobijene iz biogasa u Srbiji

Prema Strategiji razvoja energetskog sektora Republike Srbije do 2015. godine (Strategija razvoja energetike, 2005), vezano za energiju dobijenu iz biogasa, bila je planirana rehabilitacija i ponovno pokretanje proizvodnje u 6 biogas postrojenja na 6 postojećih farmi (farme krava i svinja), koja nisu bila u funkciji zbog tehničkih problema i lošeg održavanja. To nije urađeno zbog ekonomskih problema i procesa ekonomske tranzicije ovih farmi.

U tabeli 3.3 navedena su postojeća biogas postrojenja u Srbiji. Ova postrojenja se mogu podeliti u dve grupe:

- biogas postrojenja koja su izgrađena kao deo sistema za tretman otpadnih voda
- biogas postrojenja koja su izgrađena na velikim farmama.

Tabela 3.3 Postojeća biogas postrojenja u Srbiji (Cvetkovic i saradnici, 2014)

Biogas postrojenje	Snaga postrojenja [kW_e]	Sirovina
JP „Vodovod i kanalizacija” u Subotici	500	Mulj iz postrojenja za tretman otpadne vode
„Alltech Fermin” u Senti	1,500	Otpadne vode
Pivara „Carlsberg Srbija” u Čelarevu	Proizvodnja toplote	Otpadne vode
Mlekara Lazar u Blacu	1,000	Kravlji stajnjak, silaža i organski otpad
Mirotin-Energo u Vrbasu	1,000	Kravlji stajnjak, silaža i organski otpad
„Global Seed” u Čurugu	600	Kravlji stajnjak, silaža

Biogas postrojenja koja su deo sistema za tretman otpadnih voda su izgrađene u sledećim kompanijama:

- biogas postrojenje u javnom preduzeću „Vodovod i kanalizacija” u Subotici,
- biogas postrojenje u kompaniji „Alltech Fermin ” u Senti,
- biogas postrojenje u kompaniji „Carlsberg Srbija” pivari u Čelarevu.

U Javnom preduzeću „Vodovod i kanalizacija” u Subotici, izgrađeno je postrojenje za proizvodnju biogasa pomoću anaerobnog tretmana mulja, nastalog nakon prerade otpadnih voda. Postrojenje je pušteno u rad 2008. godine, sa kapacitetom od 500 kW_e. Ukupni kapacitet je podeljen na dve kogenerativne jedinice od po 250 kW_e. Za dobijanje 250 kW_e električne energije na izlazu iz svake jedinice potrebno je obezbediti

protok biogasa od $131\text{m}^3_{\text{N}}/\text{h}$. Procenat metana u biogasu je između 55% i 70%. Digestat koji zaostaje posle anaerobne digestije je neiskorišćen, jer ne postoji zakonski okvir koji definiše korišćenje mulja kao poljoprivrednog đubriva.

Kompanija za proizvodnju kvasca „Alltech Fermin“ iz Sente, kao deo sistema za tretman otpadnih voda, ima postrojenje za proizvodnju biogasa instalisanog kapaciteta od 1.5 MW_e . Postrojenje za preradu otpadnih voda može da preradi $2,500\text{ m}^3$ otpadnih voda dnevno. Biogas dobijen u ovom postrojenju koristi se za proizvodnju energije u dve kogenerativne jedinice, kapaciteta od po 750 kW_e svaka. Toplotna energija iz kogenerativnih jedinica koristi se za anaerobnu fermentaciju, a mali deo za grejanje radnih prostorija. Ulaganje u ovo postrojenje iznosilo je 9.5 miliona € (Martinov i saradnici, 2012).

U pivari „Carlsberg Srbija“ u Čelarevu, biogas se takođe proizvodi posle tretmana otpadnih voda. Maksimalni dnevni kapacitet prerade otpadnih voda je $2,500\text{ m}^3$. Proizvodnja biogasa varira u zavisnosti od proizvodnje piva. U ovom postrojenju postoji rezervoar za skladištenje biogasa kapaciteta od $1,000\text{ m}^3$. Biogas se koristi u kotlovima zajedno sa prirodnim gasom, pa je godišnja potrošnja prirodnog gasa koji se koristi u indistriji piva, smanjena za 10-15%. Ukupna investicija iznosila je 4.5 miliona € (Martinov i saradnici, 2012).

U biogas postrojenjima koja su deo sistema za tretman otpadnih voda, zaostaje znatna količina digestata, koja se može utrošiti za đubrenje ili neku drugu namenu, što može imati značajan uticaj na ekonomsku održivost postrojenja. Stoga je potrebno napraviti dugoročne procene mogućnosti korišćenja digestata kao đubrivo, sa ekonomske i ekološke tačke gledišta.

Biogas postrojenja izgrađena na velikim farmama su:

- biogas postrojenje „Mlekara Lazar“ u Blacu,
- biogas postrojenje u Mirotin-Energo kompaniji - Vrbas,
- biogas postrojenje u kompaniji „Global Seed“ u Čurugu.

U maju 2012. godine kompanija „Mlekara Lazar“ iz Blaca, pustila je u pogon biogasno postrojenje. Investicija u ovo postrojenje iznosila je 2.6 miliona € i rešila je probleme kompanije sa biodegradabilnim otpadom sa farme i iz industrijske prerade mleka, koristeći ga za proizvodnju biogasa i električne energije. Za proizvodnju biogasa ova kompanija koristi horizontalni fermentor. Instalirana snaga ovog postrojenja za proizvodnju električne energije je 1 MW_e. Za proizvodnju biogasa kompanija koristi kravljí stajnjak, surutku i silažu.

Kompanija Mirotin-energo iz Vrbasa je 2012. godine pustila u rad biogasno postrojenje (slika 3.5), sa ukupnim kapacitetom od 1 MW_e. Ovo postrojenje proizvodi energiju iz stajnjaka krava i silaže. Potrebna godišnja količina sirovina za funkcionisanje postrojenja je 27,000 t stajnjaka i 10,000 t silaže. Maksimalan procenat metana u biogasu je 55%. Kompanija koristi deo proizvedene toplotne energije iz kogenerativne jedinice za zagrevanje fermentora, dok se u zimskim mesecima 200 kW toplotne snage, koristi za zagrevanje poslovnih prostorija. Ostatak digestata iz anaerobne digestije se mehanički razdvaja na čvrstu i tečnu frakciju, koje se dalje koriste kao đubrivo u zemljoradnji. Ulaganje u ovo postrojenje je iznosilo preko 5 miliona €.



Slika 3.5 Biogas postrojenje Mirotin u Vrbasu

Kompanija „Global Seed“ izgradila je biogas postrojenje kapaciteta 0.6 MW_e u februaru 2013. godine na svojoj farmi u Čurugu. U biogas postrojenju, električna i toplotna energija se proizvode iz tečnog i čvrstog stajnjaka krava i kukuruzne silaže iz organske proizvodnje. Za proizvodnju biogasa godišnje se koristi 18,000 t tečnog stajnjaka, 9,000 t čvrstog stajnjaka i 5,000 t silaže. Sporedni proizvod je 5,000 t kvalitetnog organskog komposta godišnje, koji se koristi na poljoprivrednom zemljištu.

Treba napomenuti da se različite tehnologije mogu koristiti za proizvodnju električne energije iz biogasa: gasni motori, gasne turbine, Stirling motori, sistemi sa Rankinovim ciklusom (Schulz i saradnici, 2007) i gorivne ćelije (Trogisch i saradnici, 2005). Postojeća biogasna postrojenja u Srbiji koriste obične gasne motore za proizvodnju električne energije iz biogasa. Ovo ukazuje da je proizvodnja električne energije iz biogasa u samom začetku u Srbiji.

U februaru 2012. godine osnovano je Srpsko biogas udruženje kako bi koordinisalo aktivnosti svih zainteresovanih na ovom polju u Republici Srbiji. Putem povezivanja poslovnih i akademskih institucija, poljoprivrednih udruženja i udruženja građana, cilj je da se razviju i promovišu svi aspekti primene biogasa u Srbiji.

U procesu pridruživanja EU, Srbija će morati da proširi korišćenje obnovljivih izvora energije, uključujući tu i proizvodnju biogasa. Za očekivati je da se potencijali za proizvodnju biogasa prvenstveno koriste na velikim i srednjim farmama, industriji hrane i sistemima za preradu komunalnog otpada. Procena je da će većina postrojenja i dalje koristiti biogas u kogenerativnim jedinicama. U ovim sistemima, problem može biti korišćenje toplotne energije u letnjim mesecima. Stoga je neophodno definisiti nove podsticaje u cilju efikasnog korišćenja toplotne energije proizvedene iz kogenerativnih jedinica u tehnologiji sušenja, staklenika i slično.

3.3 Prepreke za šire korišćenje energije dobijene iz biogasa u Srbiji

Prepreke za šire korišćenje biogasa u Srbiji mogu se klasifikovati u nekoliko grupa:

- ekonomska tranzicija,

-
- nedostatak pogodnih kreditnih linija,
 - duge procedure za izgradnju biogas postrojenja,
 - ostalo (nedostatak javne svesti, nedostatak standarda).

Srpska ekonomija suočila se sa mnogo izazova u poslednjih 10 godina vezano za svojinsku transformaciju i svetsku ekonomsku krizu. Treba posebno naglasiti činjenicu da Republika Srbija ostvaruje veliki trgovinski deficit prilikom uvoza energenata i proizvodnje energije, gde projekti korišćenja biogasa u proizvodnji energije mogu pomoći u njegovom smanjenju. Korišćenje biogasa za proizvodnju energije uključuje investicije u različite aktivnosti. Investiciona klima u Srbiji je nepredvidiva i potreban je dug period za celu proceduru izgradnje biogas postrojenja. Takođe, ukupni investicioni rejting zemlje je nizak, a domaće banke nisu spremne da finansiraju biogas projekte u Srbiji zbog povećanog ekonomskog rizika. Biogas projekat je kompleksan mehanizam koji obuhvata različite aktere: snabdevače biomasom (poljoprivrednike, prehrambenu industriju, kompanije, komunalne sisteme), banke, investitore, isporučioce opreme, vladu i vladine službe i javnost koja može imati uticaj na razvoj projekata korišćenja biogasa.

4. ODREĐIVANJE POTENCIJALA ZA PROIZVODNJU BIOGASA I NJEGOVO KORIŠĆENJE U ENERGETSKE SVRHE U REPUBLICI SRBIJI

4.1 Određivanje potencijala za proizvodnju biogasa u Republici Srbiji

U ovom poglavlju predložena je metodologija za proračun potencijala za proizvodnju biogasa iz izvora prikazanih u poglavlju 3.

Proračun potencijala za proizvodnju biogasa u Republici Srbiji iz poljoprivrednih useva proizvedenih na zemljištu namenjenom u energetske svrhe

Evropska Agencija za životnu sredinu (EEA, 2007) procenjuje da se 5-10% obradivog zemljišta može koristiti za energetske svrhe. Prema metodologiji za određivanje potencijala za proizvodnju biogasa u zemljama članicama EU, 5% obradive zemlje (AEBIOM, 2009), može biti korišćeno u ove namene bez značajnog uticaja na cenu hrane i biodiverzitet.

Ove preporuke su korišćene i u ovoj tezi u cilju izračunavanja potencijala za proizvodnju biogasa iz poljoprivrednih useva proizvedenih na zemljištu namenjenom u energetske svrhe. Srbija ima 3.55 miliona ha obradive zemlje za agroprodukciju. Koristeći pretpostavku da se 5% površina poljoprivrednog zemljišta koristiti za

proizvodnju useva i dalju proizvodnju energije iz ovih useva, može se zaključiti da se u Republici Srbiji, 177,500 ha obradivih površina može koristiti za ove namene. Kako u Srbiji godišnje više od 200,000 ha ostane neobrađeno, ova pretpostavka ne bi značajno uticala na poljoprivrednu proizvodnju. Pretpostavka je takođe, da se kukuruzna silaža koja bi se uzgajala na ovih 5% obradivih površina koristi za proizvodnju biogasa. Prinos biogasa iz kukuruzne silaže dat je u tabeli 4.1.

Tabela 4.1 Procenjeni prinos biogasa iz različitih sirovina

Sirovina	Suva materija (SM) sadržaj (%)	Procenjeni prinos sirovine po ha (t_{SM}/ha)	Prinos biogasa po t suve mat. (m^3/t_{SM})	Prinos biogasa po t svežeg mat. (m^3/t sveže mat.)	Reference
Kukuruzna silaža		16	576		(Becker i saradnici, 2007; Pöschl i saradnici, 2010)
Komunalni otpad	40		308		(Pöschl i saradnici, 2010)
Otpad iz prerade mesa				260	(Dinkloh, 2009)

Na osnovu podataka prikazanih u tabeli 4.1 i preporuke Evropske asocijacije za biomasu (AEBIOM, 2009), određen je potencijal za proizvodnju biogasa iz poljoprivrednih useva proizvedenih na zemljištu namenjenom u energetske svrhe u Srbiji:

$$P=0.05 \cdot A \cdot B \cdot C \quad (1)$$

gde je P potencijal biogasa ($m^3/godišnje$); A ukupna obradiva površina zemljišta u Republici Srbiji; B prinos kukuruzne silaže (SM) po ha i C prinos biogasa(m^3/t_{SM}).

Proračun potencijala za proizvodnju biogasa iz otpadnih tokova u stočarstvu

Za određivanje potencijala za proizvodnju biogasa iz otpadnih tokova u stočarstvu korišćene su procene predložene od strane (Lleleji, ID-406-W) i (Guo Guo, 2010). Kao osnova za broj životinja (tabela 3.1) u proračunima je korišćena 2011. godina. Usvojeno je da je 35% ukupnog stajnjaka goveda i svinja dostupno za proizvodnju biogasa. Što se tiče živine, pretpostavljeno je da je 15% stajnjaka dostupno za anaerobnu digestiju (Svetska banka, 2007). U tabeli 4.2 su dati podaci korišćeni za proračun proizvodnje biogasa iz stajnjaka u Srbiji.

Tabela 4.2 Procenjeni prinos biogasa iz otpadnih tokova u stočarstvu (Lleleji, ID-406-W; Guo Guo, 2010)

	Procenjen svež stajnjak (kg/životinji/dnevno)	Suva materija u stajnjaku (SM) (%)	Proizvodnja biogasa po kg suve materije (m ³ /kg _{SM})
Goveda	28	16.7	0.22
Svinje	2.2	18.5	0.28
Živina	0.1	30	0.32

Potencijal za proizvodnju biogasa iz otpadnih tokova u stočarstvu određen je iz:

$$P_1 = N \cdot A_2 \cdot B_2 \cdot C_2 \quad (2)$$

gde je N broj životinja, P_1 proizvodnja biogasa (m³/dnevno); A_2 procenjena količina stajnjaka po jednoj životinji (kg/životinji/dnevno); B_2 procenjeni udeo suve materije u stajnjaku (%) i C_2 procenjeni prinos biogasa (m³/kg_{SM}).

Proračun potencijala za proizvodnju biogasa iz komunalnog otpada

Procena potencijala za proizvodnju biogasa iz komunalnog otpada zasnovana je na podacima datim u tabeli 4.1. Za proračun je korišćen podatak iz 2011. godine da je

Republika Srbija imala 7,186,862 stanovnika (Zavod za statistiku, 2011). Pretpostavljeno je da će 30% komunalnog otpada generisanog u Srbiji biti korišćeno za anaerobnu digestiju (Studija Tehnički fakultet Novi Sad, 2008; AEBIOM, 2009). Korišćenje komunalnog otpada za proizvodnju biogasa u ovom radu, ne isključuje upotrebu komunalnog otpada i u druge namene (reciklaža, upotreba u druge tehnološke i energetske procese, odlaganje na komunalne deponije), u skladu sa principima upravljanja otpadom (Strategija upravljanja otpadom, 2010). Potencijal za proizvodnju biogasa iz komunalnog otpada u Srbiji određen je iz :

$$P_3 = 0.3 \cdot A_3 \cdot B_3 \cdot C_3 \cdot D \quad (3)$$

gde je P_3 je biogas potencijal (m^3 /godišnje); A_3 broj stanovnika u Srbiji 2011. godine; B_3 generisani otpad po stanovniku po godini; C_3 procenjeni udeo suve materije (%) u komunalnom otpadu i D prinos biogasa (m^3/t_{SM}) (tabela 4.1).

Proračun potencijala za proizvodnju biogasa iz industrije prerade mesa

Za procenu potencijala za proizvodnju biogasa iz otpada iz industrije prerade mesa korišćeni su podaci u tabeli 4.1. Za proračun potencijala za proizvodnju biogasa, pretpostavljeno je da će 30% ukupno generisanog otpada iz industrije prerade mesa biti korišćeno za proizvodnju biogasa. Potencijal za proizvodnju biogasa iz otpada industrije prerade mesa u Srbiji dat je kao:

$$P_4 = 0.3 \cdot A_4 \cdot B_4 \quad (4)$$

gde je P_4 je biogas potencijal (m^3 /godišnje); A_4 ukupni otpad iz klanica u Republici Srbiji (t /godišnje) i B_4 prinos biogasa ($m^3/t_{sveže\ materije}$) (tabela 4.1).

Proračun potencijala za proizvodnju biogasa iz otpadnih voda industrije prerade mleka

Proizvodnja mleka u Srbiji 2011. godine iznosila je 1,445 miliona litara. U velikim kompanijama je prerađeno 722,500 m^3 mleka (Nacionalni program poljoprivrede Srbije, 2010), što je korišćeno kao osnova za proračun potencijala za proizvodnju biogasa iz otpadnih voda industrije prerade mleka. Količina otpadnih voda iz industrije prerade

mleka iznosi od 0.8-1.7 ($l_{\text{vode}}/l_{\text{dobijenog mleka}}$) (EU BAT, 2006). Procenjuje se da je u Srbiji ova vrednost i veća zbog neefikasnog korišćenja vode u samom procesu. Za proračun u ovom radu korišćena je vrednost otpadne vode od 3 ($l_{\text{vode}}/l_{\text{prerađenog mleka}}$). IPCC vodič (2006), preporučuje količinu otpadne vode od 3-10 $\text{m}^3/\text{t}_{\text{mlečnih proizvoda}}$ u industriji prerade mleka. Uobičajeni faktori zagađenja (čvrsta materija (TS), ukupni azot (TN), biohemijska potrošnja kiseonika (BOD), hemijska potrošnja kiseonika (COD), sa koncentracijama u otpadnim vodama iz industrije prerade mleka, dati su u tabeli 4.3 (Rajagopal i saradnici, 2013).

U određivanju potencijala za proizvodnju biogasa korišćene su sledeće vrednosti: COD od $5 \text{ kg}/\text{m}^3$ (Rajagopal i saradnici, 2013), proizvodnja metana u anaerobnom tretmanu iz otpadnih voda industrije prerade mleka u procenjenom iznosu od $0.35 \text{ Nm}^3_{\text{CH}_4}/\text{kgCOD}_{\text{uklonjenog}}$, (Frijs i saradnici, 2013), toplotna moć CH_4 od $35.9 \text{ MJ}/\text{m}^3_{\text{N}}$ i procenjena toplotna moć biogasa od $22 \text{ MJ}/\text{m}^3_{\text{N}}$.

Tabela 4.3 Karakteristike otpadnih voda industrije prerade mleka (Rajagopal i saradnici, 2013)

TN (mg /L)	TS (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg /L)
10–90	250–2,750	650–6,250	400–15,200

Potencijal za proizvodnju biogasa iz otpadnih voda industrije prerade mleka računat je iz:

$$P_5 = A_5 \cdot B_5 \cdot C_5 \cdot D_2 \cdot E / F \quad (5)$$

gde je: P_5 biogas potencijal ($\text{m}^3/\text{godišnje}$); A_5 prerađeno mleko u 2011. godini; B_5 procenjena vrednost generisanih otpadnih voda po m^3 prerađenog mleka ($\text{m}^3_{\text{dobijenih otpadnih voda}}/\text{m}^3_{\text{prerađenog mleka}}$); C_5 procenjena vrednost COD (kg/m^3), D_2 proizvedeni metan po kg uklonjenog COD ($\text{Nm}^3_{\text{CH}_4}/\text{kgCOD}_{\text{uklonjenog}}$); E toplotna moć CH_4 ($\text{MJ}/\text{m}^3_{\text{N}}$) i F toplotna moć biogasa ($\text{MJ}/\text{m}^3_{\text{N}}$).

4.2 Uspostavljanje metodologije za dalju upotrebu proračunatih potencijala za proizvodnju biogasa

Za analizu dalje upotrebe proračunatih potencijala za proizvodnju biogasa korišćenja su dva scenarija projekcije ukupne finalne potrošnje energije i finalne energije po sektorima, koji su sadržani u Strategiji razvoja energetike do 2025. godine sa projekcijom do 2030. godine (Strategija, 2015):

- **scenario bez primene mera energetske efikasnosti u sektorima potrošnje energije (SA),**

- **scenario sa primenom mera energetske efikasnosti u sektorima potrošnje energije (SB).**

U tabeli 4.4 date su vrednosti ukupne finalne potrošnje energije i finalne energije po sektorima potrošnje do 2030. godine za oba scenarija (Strategija, 2015).

Tabela 4.4 Predviđena ukupna finalna potrošnja energije i finalna energija po sektorima potrošnje do 2030. godine u kten (Strategija, 2015)

El. Energija (kten)	Saobraćaj (kten)	Toplotna energija(kten)	Finalna energija (kten)	Scenario
2,800	2,509	1,058	11,069	(SA)
2,491	2,022	936	9,710	(SB)

1 Mten (mega tona ekvivalenata nafte) = 11.63 TWh

Evropska Asocijacija za Biomasu (AEBIOM, 2009) definisala je ciljeve koje treba dostići u Evropskoj Uniji u proizvodnji energije iz biogasa do 2020. godine:

- da 2% finalne električne energije bude proizvedeno iz biogasa,
- da 1% finalne energije u saobraćaju bude dobijen korišćenjem biogasa kao goriva,
- da 1% finalne toplotne energije bude proizveden iz biogasa.

Imajući u vidu da je korišćenje biogasa u Srbiji u početnoj fazi, u ovom radu ispitana je mogućnost dostizanja ciljeva koje je definisala Evropska Asocijacija za Biomasa (AEBIOM, 2009) u energetske sektoru Republike Srbije do 2030. godine, iz proračunatih potencijala za proizvodnju biogasa.

U ovom radu korišćen je potencijal za proizvodnju biogasa, kako je navedeno u poglavlju 4.1. Pretpostavljeno je da se potencijal za proizvodnju biogasa neće značajnije promeniti do 2030. godine. Imajući u vidu da broj radnih sati biogas postrojenja prosečno iznosi od 5,000 - 8,000 godišnje (Pucker i saradnici, 2013; Hennig i Gawor, 2012), usvojeno je da je broj radnih sati biogas postrojenja (T) 7,700 časova godišnje. Stepenergetske efikasnosti u proizvodnji električne energije, (μ_e), u biogas kogenerativnim postrojenjima je u opsegu od 0.25 - 0.5 (Trendewicz i Braun, 2013; Lantz, 2012), tako da je usvojeno da je 0.4. Stepenergetske efikasnosti u proizvodnji toplotne energije u biogas kogenerativnim postrojenjima, (μ_t), iznosio je 0.45 (Lantz, 2012). Donja toplotna moć (LHV_{BG}) biogasa (60% metana u biogasu) je 6 kWh/m³ (AEBIOM, 2009).

Ukupna instalisana snaga postrojenja za proizvodnju električne energije iz biogasa, (P_i), je:

$$P_i = E_e / T \quad (6)$$

gde je: E_e - Proizvedena električna energija iz biogasa u kWh do 2030. godine; T - godišnji broj radnih sati biogas postrojenja.

Ukupna proizvedena toplotna energija u biogas kogeneraciji do 2030. godine je:

$$E_T = 1.125 \cdot E_e \quad (7)$$

Potrebna zapremina biogasa za proizvodnju električne energije, (V_{BG}), računata je na osnovu formule:

$$V_{BG} = E_e / (\mu_e \cdot LHV_{BG}) \quad (8)$$

U proračunu za proizvedenu energiju iz biogasa u sektoru saobraćaja, pretpostavljena je potpuna konverzija biogasa (stepenergetske efikasnosti iznosio je 100%).

Zapremina biogasa koji se koristi u sektoru saobraćaja, (V_{BGS}), je:

$$V_{BGS} = E_s / LHV_{BG} \quad (9)$$

gde je E_s finalna energija iz biogasa u saobraćaju do 2030. godine.

5. ANALIZA ŽIVOTNOG I ENERGETSKOG CIKLUSA BIOGASNIH POSTROJENJA I NJIHOVOG UTICAJA NA ŽIVOTNU SREDINU

Proizvodnja biogasa i energije iz biogasa uključuje različite energetske tokove, počev od proizvodnje materijala za anaerobnu digestiju do korišćenja proizvedene energije i digestata. U ovoj disertaciji je izvršena analiza energetskih tokova u životnom ciklusu biogasnog postrojenja i određeni njihovi odnosi, počev od obezbeđivanja sirovina za anaerobnu digestiju, proizvodnje energije iz biogasa, do korišćenja čvrstog i tečnog digestata na poljoprivrednom zemljištu. Analiza je rađena na osnovu podataka iz biogasnog postrojenja Mirotin u Vrbasu.

Analiza energetskih tokova u životnom ciklusu (LCEA) korišćenja biogasa za proizvodnju energije izvedena je kroz razmatranje četiri pretpostavljena scenarija:

- primenu biogasa za proizvodnju toplotne energije,
- primenu biogasa u kogeneraciji,
- primenu bio-CNG u saobraćaju i
- primenu biogasa u proizvodnji biovodonika.

Rezultati istraživanja svakog scenarija zasnovani su na podacima dobijenim merenjem ili procenom na samom postrojenju. Metodologija razmatranja energetske tokova u ovom istraživanju sprovedeno je prema ISO standardima 14040 (ISO 14040, 2006) i ISO 14044 (ISO 14044, 2006).

5.1 Opis industrijskog sistema izabranog za LCEA

Mirotin-Energo d.o.o. je biogasno postrojenje izgrađeno tokom 2011. i 2012. godine u Vrbasu. Kompanija poseduje 5,000 ha poljoprivrednog zemljišta, koje je pokriveno sistemom za navodnjavanje kao i farmu sa oko 2,000 krava i mlekaru kapaciteta 50,000 l mleka dnevno. Kompanija koristi kukuruznu silažu i stajnjak (iz sopstvenih farmi krava), kao sirovinu za proizvodnju biogasa. Proizvedeni biogas se koristi u kogenerativnom uređaju za proizvodnju toplotne i električne energije. Proizvedena električna energija se isporučuje nacionalnoj mreži i kompanija je u sistemu feed in tarife za električnu energiju proizvedenu iz obnovljivih izvora energije.

U svrhu analize energetske karakteristika u životnom ciklusu biogas postrojenja, ovo poglavlje pokriva sve faze procesa koje zahtevaju različite energetske ulaze i izlaze, koji su sastavni deo životnog ciklusa u razmatranim scenarijima.

Proizvodnja kukuruzne silaže

Kukuruzna silaža je najvažniji energetski usev i dragocena sirovina za anerobnu digestiju. Proizvodnja kukuruzne silaže obuhvata sledeće faze:

- pripremu zemljišta,
- setvu,
- održavanje useva,
- žetvu,
- silažu.

U procesu pripreme zemljišta koriste se plugovi, drljače i druga mehanizacija. Setva, kao jedna od operacija u procesu proizvodnje kukuruzne silaže zahteva upotrebu traktora, semena i mehanizacije. Održavanje useva takođe zahteva upotrebu traktora, prskalice, raspršivača đubriva, kao i sredstva za zaštitu bilja i đubrenje. Žetva uključuje kombajne, prikolice i sušare. Za siliranje se koriste traktori i aditivi za silažu. Sve navedene aktivnosti i oprema zahtevaju uloženu energiju u vidu fosilnih goriva, indirektno energije (zaštita bilja, đubrivo i seme) i ljudski rad.

Stajnjak goveda

Na farmi krava kompanije Mirotin se generiše značajna količina stajnjaka koji je odlična sirovina za anaerobnu digestiju i proizvodnju biogasa. Kravlji stajnjak je biološka osnova za biogas postrojenje jer sadrži bakterije i mikroorganizme neophodne za anaerobnu digestiju i proizvodnju biogasa. U kompaniji Mirotin stajnjak se skladišti u sabirne tankove i transportuje do biogas postrojenja korišćenjem pumpe od 15 kW_e.

Anaerobna digestija

Anaerobna digestija je biohemijski proces u kome se složene organske materije razlažu pod dejstvom različitih vrsta bakterija u anaerobnim uslovima. Rezultat ovih procesa je dobijanje metana, ugljen-dioksida, vodonik sulfida i drugih gasova kao i digestata. Tokom procesa anaerobne digestije u biogas postrojenju Mirotin, neophodno je održati temperaturu mezofilnog procesa konstantnom, između 37 i 40 °C. Takođe, neophodno je obezbediti energiju za mešanje sirovog materijala u anaerobnom digestoru. Dobijena gasna smeša (biogas) prosečno sadrži od 50 do 55% metana sa energetske sadržajem od 19-20 MJ/m³_N.

Kogenerativna jedinica

Kogenerativna jedinica pretvara energiju biogasa u električnu energiju i toplotu koristeći gasne motore. Toplotna energija se koristi za grejanje digestora u procesu anaerobne digestije kao i za grejanje prostora. Kogeneracija toplotne i električne energije se smatra veoma efikasnim načinom korišćenja biogasa sa visokim stepenom

energetske efikasnosti. Kogenerativna jedinica je imala instalacioni kapacitet od 1 MW_e.

Digestat

U postrojenju za proizvodnju biogasa Mirotin, nakon procesa separacije, dobija se digestat u čvrstoj i tečnoj fazi. Digestat se koristi na poljoprivrednom zemljištu do 10 km udaljenosti od biogas postrojenja. Za upotrebu digestata u poljoprivredi od najvećeg je značaja znati njegov hemijski sastav i osobine, naročito udeo azota, fosfora i kalijuma, suve materije, prisustvo masnih kiselina i pH vrednost. Kako bi se digestat koristio kao organsko đubrivo on mora da bude bez patogena i fizičkih nečistoća. Digestat se transportuje do poljoprivrednog zemljišta i distribuira po tlu. Jedan od problema korišćenja digestata je i definisanje količina hranljivih supstanci prisutnih u zemljištu. Neadekvatno rukovanje, skladištenje i primena digestata kao đubriva može izazvati emisiju nitrata u životnu sredinu ili prezasićenost zemljišta fosforom.

Napred navedeni procesi su integralni deo tehnološkog procesa u biogas postrojenju Mirotin u Vrbasu. Proces definišani u nastavku nisu trenutno deo proizvodnog procesa u biogas postrojenju Mirotin Vrbas, ali se mogu posmatrati kao deo životnog ciklusa u scenarijima gde se proizvedeni biogas dalje koristi kao gorivo u saobraćaju ili u proizvodnji vodonika.

Korišćenje biometana iz biogasa u saobraćaju

Pre nego što se koristi u saobraćaju kao gorivo, biogas se mora dalje obraditi. To podrazumeva uklanjanje CO₂ i H₂S iz biogasa dobijenog postupkom anaerobne digestije. Za prečišćavanje biogasa i proizvodnju biometana koriste se različite tehnologije (Intelligent Energy, 2012; Niesner i saradnici, 2013; Ryckebosch i saradnici, 2011; Scholz i saradnici, 2013; Smyth i saradnici, 2009), definisane i opisane u poglavlju 2.3.5. Treba napomenuti da pri ovim procesima dolazi do gubitka izvesne količine biometana (Intelligent Energy, 2012; Niesner i saradnici, 2013).

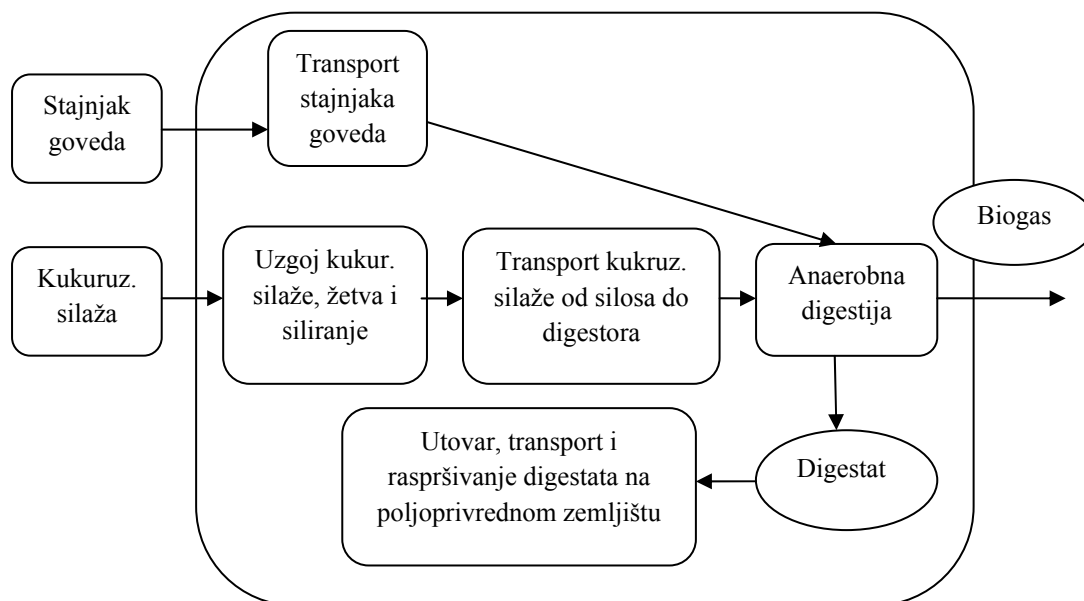
Proizvodnja vodonika iz biogasa

Vodonik se može dobiti iz biogasa procesom reforminga vodenom parom (Chaubey i saradnici, 2013; Izquierdo i saradnici, 2012; Lau i saradnici, 2011; Kolbitsch i saradnici, 2008; Shiga i saradnici, 1998; Effendi i saradnici, 2005; Coskun i saradnici, 2012; Stoll i von Linde, 2000), koji se odvija u prisustvu katalizatora na temperaturama između 600°C i 1,100°C u endotermnoj povratnoj hemijskoj reakciji. Procesna temperatura određuje i stepen konverzije biogasa. Dobijeni vodonik predstavlja obnovljivi izvor energije, koji dalje može biti korišćen u proizvodnji energije.

5.1.1 Uspostavljanje granice sistema za LCEA

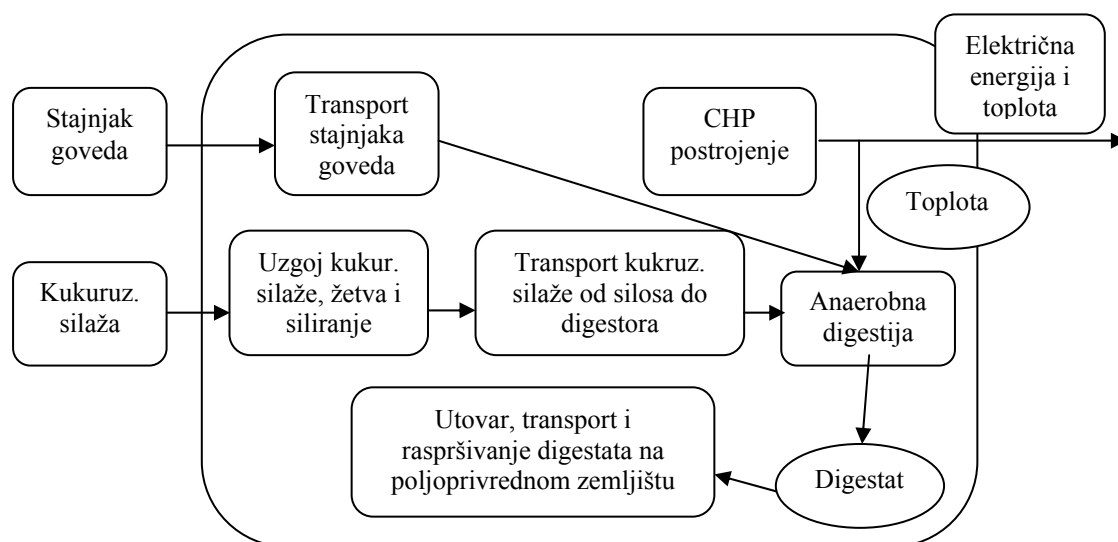
U ovom radu su definisana četiri scenarija sa granicama sistema za LCEA. U svim scenarijima pretpostavljeno je da će se sirovine (kukuruzna silaža i kravlji stajnjak) proizvoditi na poljoprivrednom zemljištu kompanije Mirotin, kao i na njihovoj farmi krava. Uspostavljeni scenariji:

Scenario (S1) (slika 5.1): za uzgoj useva koristi se digestat kao đubrivo, sva energija za anaerobnu digestiju se uvodi spolja, biogas se dobija i koristi za proizvodnju toplote energije.



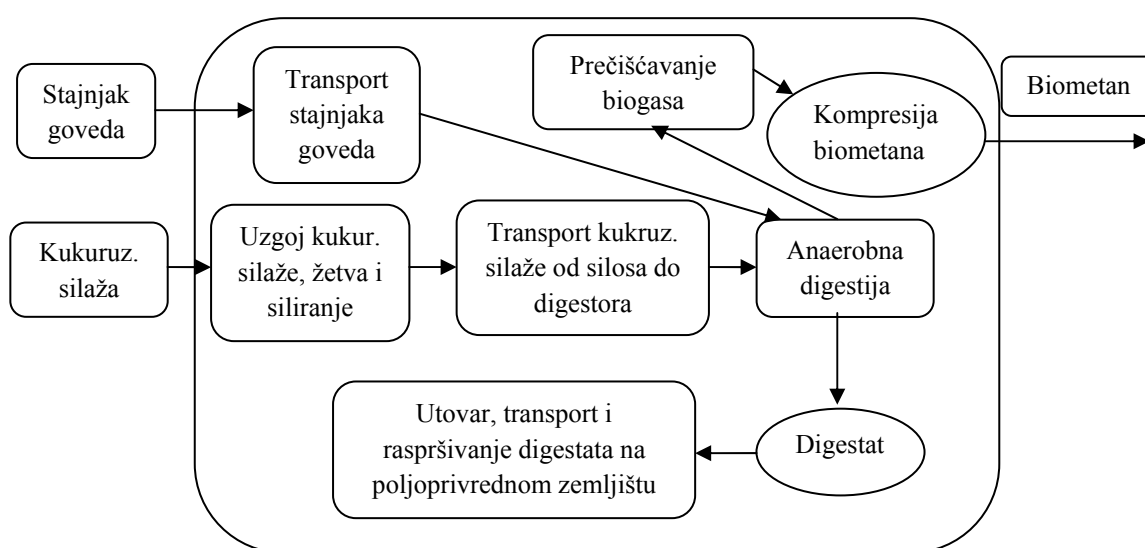
Slika 5.1 Granica sistema za LCEA analizu u scenariju (S1)

Scenario (S2) (slika 5.2): za uzgoj useva koristi se digestat kao đubrivo, sva energija se uvodi spolja, toplotna energija za anaerobnu digestiju se dobija iz kogenerativne jedinice, električna energija i ostatak toplote iz kogenerativne jedinice se izvozi.



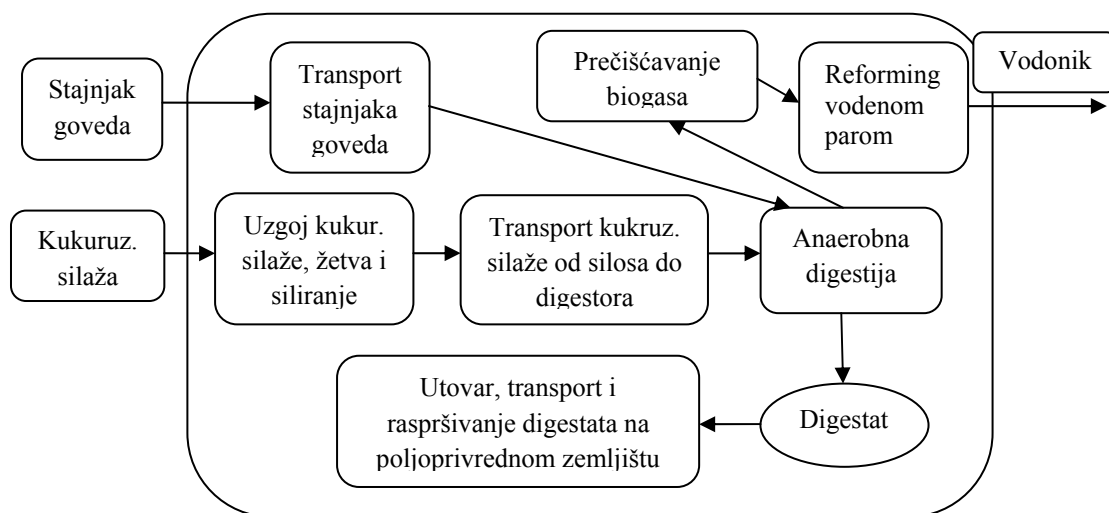
Slika 5.2 Granica sistema za LCEA analizu u scenariju (S2)

Scenario (S3) (slika 5.3): za uzgoj useva koristi se digestat kao đubrivo, sva električna energija i toplota se uvodi spolja, biogas se prerađuje u biometan, biometan se komprimuje i na izlazu se dobija bio-CNG koji se koristi kao gorivo u saobraćaju.



Slika 5.3 Granica sistema za LCEA analizu u scenariju (S3)

Scenario (S4) (slika 5.4): za uzgoj useva koristi se digestat kao đubrivo, sva energija za anaerobnu digestiju se uvodi spolja, biogas se prečišćava, 20% dobijenog biometana koristi se kao energent u reformingu vodenom parom, i na izlazu se dobija vodonik kao energetska izvor.



Slika 5.4 Granica sistema za LCEA analizu u scenariju (S4)

5.2 Materijalno i energetska bilansiranje procesa

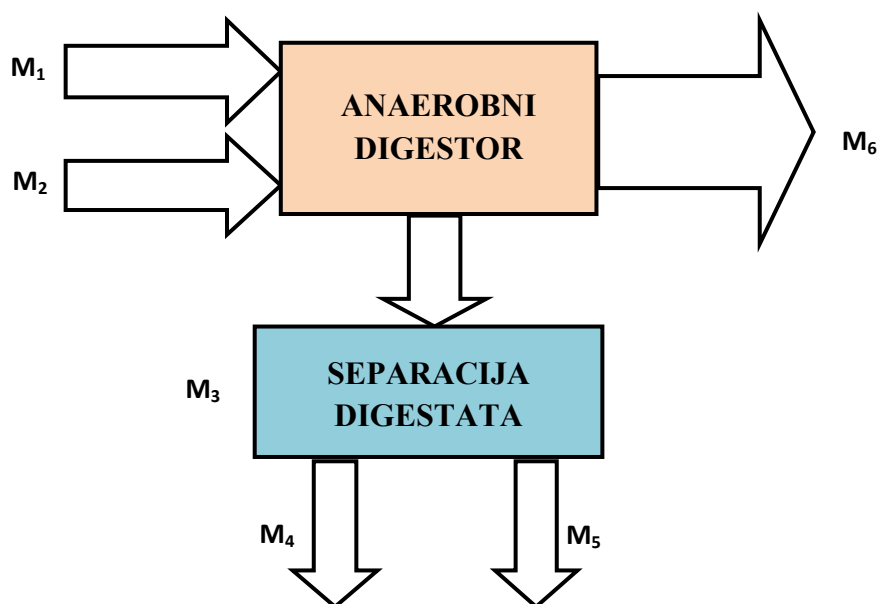
U cilju uspostavljanja modela biogasnog postrojenja i analize energetske tokova u predloženim scenarijima u kompaniji Mirotin izvršena su merenja:

- ulaznih i izlaznih materijalnih tokova (kravlje stajnjaka, kukuruzne silaže, digestata, biogasa, tečnog i čvrstog digestata),
- sadržaja suve materije u ulaznim tokovima (stajnjaka krava i kukuruzne silaže),
- sastava biogasa,
- sastava čvrstog digestata,
- proizvedene električne i toplotne energije u kogenerativnoj jedinici,

- utrošene toplotne i električne energije za rad digestora,
- utrošene toplotne energije za rad kogenerativne jedinice,
- potrošene električne energije za transport kravljeg stajnjaka.

5.2.1 Maseni bilans

Maseni tokovi u biogas postrojenju Mirotin prikazani su na slici 5.5 i dati u tabeli 5.1.



Slika 5.5 Dijagram masenih protoka u biogasnom postrojenju Mirotin u Vrbasu

M_1 je maseni bilans kravljeg stajnjaka (t/godišnje); M_2 maseni bilans kukuruzne silaže (t/godišnje); M_3 maseni bilans ukupnog digestata (t/godišnje); M_4 maseni bilans tečnog digestata (t/godišnje); M_5 maseni bilans čvrstog digestata (t/godišnje) i M_6 zapreminski protok biogasa ($\text{m}^3_{\text{N}}/\text{godišnje}$).

Udeo suve materije u stajnjaku krava bio je 22%, dok je udeo suve materije u kukuruznoj silaži iznosio 32%.

Tabela 5.1 Vrednosti masenog protoka u biogas postrojenju Mirotin

Maseni protok	
M₁ (t/godišnje)	26,800
M₂ (t/ godišnje)	10,363
M₃ (t/ godišnje)	30,930.4
M₄ (t/ godišnje)	24,469.9
M₅ (t/ godišnje)	6,433.5
M₆ (m³_N/ godišnje)	3,903,163

Sastav biogasa je određen korišćenjem gasnog analizatora, Chemec BC30 (Chemec GmbH, Nemačka) i rezultati su prezentovani u tabeli 5.2.

Tabela 5.2 Sastav biogasa

Komponenta	Udeo
CH₄	50-55%
CO₂	40-45%
H₂S	do 250 ppm
O₂	0.9%

Prepostavljeni udeo metana u ovom radu iznosio je 53.5%. Pretpostavljeno je i da će u procesu uzgoja kukuruzne silaže mineralno đubrivo biti zamenjeno čvrstim digestatom dobijenim posle anaerobne digestije i separacije u biogas postrojenju Mirotin. Sastav čvrstog digestata (M₅) dat je u u tabeli 5.3.

Tabela 5.3 Sastav čvrstog digestata

Komponenta	UDEO
Azot N	2% SM
Fosfat P ₂ O ₅	1.34 % SM
Kalijum-oksidi K ₂ O	1.46 % SM
Vlaga	30%

5.2.2 *Definisanje ulaznih energetske tokova*

U LCEA analizi su razmatrana dva oblika energije: direktna i indirektna energija. Direktna energija je energija koja se koristi u direktnom 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 izradu i dostavu proizvoda korišćenih u proizvodnji kukuruzne silaže (đubrivo, seme i dr.).

Prema EU direktivi (Res direktiva, 2009), energija utrošena za izradu mašina i opreme nije uključena u ovu analizu i ne treba je uzeti u obzir kada se izračunava GHG emisija biogoriva ili biotečnosti. Takođe, u diskusiji nije uključen, kao energetski ulaz, ni ljudski rad.

Energetske karakteristike svih scenarija određene su na četiri načina, korišćenjem sledećih indikatora:

- razlika izlazne energije i ukupne primarne ulazne energije, gde je izlazna energije energetski sadržaj u finalnim proizvodima (biogas, bio-CNG, vodonik ili zbir korisne toplotne i električne energije proizvedene u kogenerativnoj jedinici), 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),
- 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,
- odnos energetskog bilansa i suve materije ulazne sirovine ($E_{F/TS}$).

Prva dva pokazatelja su izabrana u cilju procene uticaja određenih procesa na energetske performanse biogasnih 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 biogoriva u ovim scenarijima.

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 ulaz za proizvodnju useva, E_{crop} , u GJ:

$$E_{crop} = H \cdot (A_1 - B) \quad (10)$$

$$H = M_2/P \quad (11)$$

gde je A_1 energetski ulaz za proizvodnju kukuruzne silaže po hektaru obradive površine (tabela 5.4); B je indirektna energetska ušteda dobijena zamenom mineralnog đubriva čvrstim digestatom u proizvodnji kukuruzne silaže, u GJ/ha, H je površina neophodnog

zemljišta za proizvodnju kukuruzne silaže u ha i P je prinos kukuruzne silaže po hektaru.

Energetski ulaz povezan sa mineralnim đubrivom u proizvodnji kukuruzne silaže nije uključen u proračun jer se pretpostavlja da će to đubrivo biti kompletno zamenjeno čvrstim digestatom. Energetski ulaz za mineralno đubrivo u kultivaciji kukuruzne silaže iznosi 8.3 GJ/ha (Salter, 2007), pa se energetski ulaz za proizvodnju kukuruzne silaže umanjuje za ovu vrednost.

Prinos kukuruzne silaže je u opsegu od 40 do 60 t/ha (Weiland, 2010). Na osnovu trenutne poljoprivredne prakse u Republici Srbiji u ovoj tezi je usvojena vrednost prinosa kukuruzne silaže od 40 t/ha.

Energetski ulaz za transport kukuruzne silaže, $E_{\text{transp-crop}}$, u MJ, dobijen je kao:

$$E_{\text{transp-crop}} = A_2 \cdot M_2 \cdot d \quad (12)$$

gde je A_2 energetski ulaz za transport kukuruzne silaže po toni i kilometru (MJ/(t·km)) (tabela 5.4) i d je dužina transportnog puta kukuruzne silaže (km). U ovom radu usvojena je dužina transportnog puta kukuruzne silaže od 0.2 km.

Energetski ulaz za transport stajnjaka krava, $E_{\text{transp-manure}}$, u digestor je određen na osnovu merenja na licu mesta i iznosi 3,500 kWh/godišnje.

Energetski ulaz za anaerobnu digestiju, $E_{\text{digestion}}$, je određen na osnovu podataka sa lica mesta u iznosu od 1,356 MWh/godišnje toplotne energije i 441 MWh/godišnje električne energije. $E_{\text{digestion}}$ je proračunata u vrednosti 6,469 GJ/godišnje u (S1), (S3) i (S4) i 1,587.6 GJ/godišnje u (S2), jer se u (S2) potrebna toplotna energija za anaerobnu digestiju dobija iz kogenerativne jedinice kao dela procesa.

Energetski ulaz za kogenerativnu jedinicu, E_{chp} , zahteva 207 MWh/godišnje toplote i 244.5 MWh/godišnje električne energije (koristi 3% električne energije proizvedene u kogenerativnoj jedinici).

Energetski ulaz za separaciju digestata, $E_{\text{digest-sep}}$, u MJ, izračunat je kao:

$$E_{digest-sep}=A_3 \cdot M_3 \quad (13)$$

gde je A_3 ulazna energija za separaciju digestata po toni digestata (tabela 5.4).

Energetski ulaz za tečni digestat, E_{L-dig} , u MJ, izračunat je prema:

$$E_{L-dig}=M_4 \cdot (A_4+A_6+ d_2 \cdot A_5) \quad (14)$$

gde je A_4 energetski ulaz za utovar tečnog digestata (tabela 5.4); A_5 energetski ulaz za transport tečnog digestata (tabela 5.4); d_2 je dužina transportnog puta tečnog digestata (km) i A_6 energetski ulaz za distribuciju tečnog digestata (tabela 5.4). U ovom radu usvojena je dužina transportnog puta tečnog digestata od 7 km.

Energetski ulaz za čvrsti digestat, E_{S-dig} , u MJ, izračunat je kao:

$$E_{S-dig}=M_5 \cdot (A_7+A_9+ d_3 \cdot A_8) \quad (15)$$

gde je A_7 energetski ulaz za utovar čvrstog digestata (tabela 5.4), A_8 energetski ulaz za transport čvrstog digestata (tabela 5.4); A_9 energetski ulaz za distribuciju čvrstog digestata (tabela 5.4) i d_3 dužina transportnog puta čvrstog digestata. U ovom radu usvojena je dužina transportnog puta čvrstog digestata od 3 km.

Energetski ulaz za preradu biogasa u biometan, $E_{biogas-biomethane}$, u MJ, određena je prema:

$$E_{biogas-biomethane}=0.96 \cdot 0.535 \cdot M_6 \cdot A_{10} \quad (16)$$

gde je A_{10} energetski ulaz za preradu biogasa u biometan u kWh po m³ metana (tabela 5.4). Pretpostavljeni gubici metana tokom procesa su 4% (Niesner i saradnici, 2013).

Energetski ulaz za kompresiju biometana, $E_{comp-biomethane}$, u MJ:

$$E_{comp-biomethane}= 0.96 \cdot 0.535 \cdot M_6 \cdot A_{11} \quad (17)$$

gde je A_{11} energetski ulaz za kompresiju biometana u kWh po m³ metana (tabela 5.4).

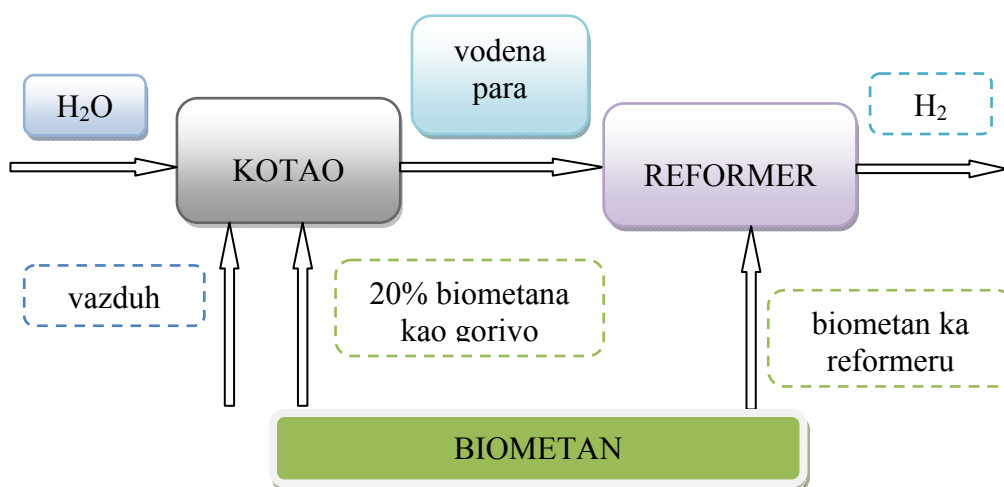
Tabela 5.4 Parametri korišćeni za računanje energetskeg ulaza

	GJ/ha	MJ/t	MJ/t·km	kWh/ m ³ _N CH ₄	m ³ _N CH ₄ /m ³ _N H ₂	Ref.
A ₁	16.6					(Gropgen, 2007b)
A ₂			12.6			(Gerin i saradnici, 2008; KTBL, 2008)
A ₃		78.6				(Lootsma i Raussen, 2008; Becker i saradnici, 2007)
A ₄		0.63				(KTBL, 2008; KTBL, 2009)
A ₅			2.84			(KTBL, 2008; KTBL, 2009)
A ₆		20.16				(KTBL, 2008; KTBL, 2009)
A ₇		3.78				(Pöschl i saradnici, 2010)
A ₈			3.15			(Pöschl i saradnici, 2010)
A ₉		25.83				(Pöschl i saradnici, 2010)
A ₁₀				0.46		(Intelligent Energy, 2012)
A ₁₁				0.35		(Smyth i saradnici, 2009)
A ₁₂					0.4	(Stoll i von Linde, 2000)

Vodonik se iz biometana može dobiti procesom katalitičkog reforminga vodenom parom. Pretpostavljeno je da se reforming vodenom parom izvodi putem katalitičke

reakcije na 900°C, pri čemu se dobija 4 mola H₂ po 1 molu CH₄. Komercijalni reformeri troše kao gorivo 20% ulaznog metana i njihova efikasnost je oko 86% (Shiga i saradnici, 1998). Stoga je u ovom radu usvojeno da se proizvodi 2.752 mola H₂ po molu CH₄ (Shiga i saradnici, 1998).

Proces reforminga vodenom parom, korišćen u (S4), prikazan je na blok dijagramu na slici 5.6.



Slika 5.6 Blok dijagram za proces reforminga vodenom parom korišćen u (S4)

Energetski ulaz za konverziju biometana u vodonik, E_H , u MJ, određen je jednačinom (18) i korišćenjem prethodno definisanih koeficijenta:

$$E_H = 2.752 \cdot 0.96 \cdot 0.535 \cdot 0.8 \cdot M_6 \cdot A_{12} \cdot LHV_{CH_4} \quad (18)$$

gde je A_{12} je energetski ulaz za konverziju biometana po m³_N dobijenog vodonika (tabela 5.4) i LHV_{CH_4} je donja toplotna moć metana (35.8 MJ/m³_N). Gubici metana tokom procesa procenjeni su na 4% (Niesner i saradnici, 2013).

5.2.3 Energetski bilans

Energetski bilans za (S1), E_{b1} , sledi iz izraza:

$$E_{b1} = E_{out1} - E_{in1} \quad (19)$$

$$E_{in1} = E_{crop} + E_{transp-crop} + E_{trans-manure} + E_{digestion} + E_{digest-sep} + E_{L-dig} + E_{S-dig} \quad (20)$$

$$E_{out1} = 0.535 \cdot M_6 \cdot LHV_{CH4} \quad (21)$$

μ_p je u ovom scenariju izračunat kao:

$$\mu_p = E_{out1} / (E_{transp-manure} + E_{digestion} + E_{digest-sep}) \quad (22)$$

$E_{F/TS}$ je u (S1) dobijen iz:

$$E_{F/TS} = E_{b1} / M_{FTS} \quad (23)$$

M_{FTS} (ukupna suva materija) iznosi 9,212 t u ovom radu.

Energetski bilans za (S2), E_{b2} , sledi iz izraza:

$$E_{b2} = E_{out2} - E_{in2} \quad (24)$$

$$E_{in2} = E_{crop} + E_{transp-crop} + E_{trans-manure} + E_{digestion} + E_{digest-sep} + E_{L-dig} + E_{S-dig} + E_{chp} \quad (25)$$

E_{out2} iznosi (8,839 MWh/godišnje (toplotna energija) i 8,149.5 MWh/godišnje (električna energija) - podaci sa merenja u Mirotin kompaniji.

U ovom scenariju efikasnost proizvodnje električne energije, ($\mu_{CHP, el}$), i proizvodnje toplotne energije, ($\mu_{CHP, H}$), izračunate su prema jednačinama (Eastern Research Group, 2011):

$$\mu_{CHP, el} = E_{el. prod} / E_{bg, biogas} \quad (26)$$

$$\mu_{CHP, H} = E_{H, prod} / E_{bg, biogas} \quad (27)$$

gde su $E_{el. prod}$ i $E_{H, prod}$ električna i toplotna energija generisane u kogenerativnoj jedinici; $E_{bg, biogas}$ je energetski sadržaj ulaznog biogasa u kogenerativnoj jedinici.

μ_p je u ovom scenariju dobijen kao:

$$\mu_p = E_{out2} / (E_{transp-manure} + E_{digestion} + E_{digest-sep} + E_{chp}) \quad (28)$$

$E_{F/TS}$ je u ovom scenariju dobijen kao:

$$E_{F/TS} = E_{b2}/M_{FTS} \quad (29)$$

Energetski bilans za (S3), E_{b3} , je izračunat kao:

$$E_{b3} = E_{out3} - E_{in3} \quad (30)$$

$$E_{in3} = E_{crop} + E_{transp-crop} + E_{transp-manure} + E_{digestion} + E_{digest-sep} + E_{L-dig} + E_{S-dig} + E_{biogas-biomethane} + E_{comp-biomethane} \quad (31)$$

$$E_{out3} = 0.535 \cdot M_6 \cdot 0.96 \cdot LHV_{CH4} \quad (32)$$

μ_p je u (S3) dobijen kao:

$$\mu_p = E_{out3} / (E_{transp-manure} + E_{digestion} + E_{digest-sep} + E_{biogas-biomethane} + E_{comp-biomethane}) \quad (33)$$

$E_{F/TS}$ je u ovom scenariju izračunat kao:

$$E_{F/TS} = E_{b3}/M_{FTS} \quad (34)$$

Energetski bilans za (S4), E_{b4} , izračunat je kao:

$$E_{b4} = E_{out4} - E_{in4} \quad (35)$$

$$E_{in4} = E_{crop} + E_{transp-crop} + E_{trans-manure} + E_{digestion} + E_{digest-sep} + E_{L-dig} + E_{S-dig} + E_{biogas-biomethane} + E_H - 0.2 \cdot 0.535 \cdot 0.96 \cdot M_6 \cdot LHV_{CH4} \quad (36)$$

$$E_{out4} = 2.752 \cdot 0.535 \cdot 0.96 \cdot 0.8 \cdot M_6 \cdot LHV_{H2} \quad (37)$$

LHV_{H2} - donja toplotna moć vodonika (10.8 MJ/m³_N)

μ_p je u (S4) izračunat kao:

$$\mu_p = E_{out4} / (E_{transp-manure} + E_{digestion} + E_{digest-sep} + E_{biogas-biomethane} + E_H) \quad (38)$$

$E_{F/TS}$ je računat u (S4) kao:

$$E_{F/TS} = E_{b4}/M_{FTS} \quad (39)$$

5.3 Metodologija proračuna emisija u životnu sredinu pri proizvodnji električne energije iz biogasnih postrojenja

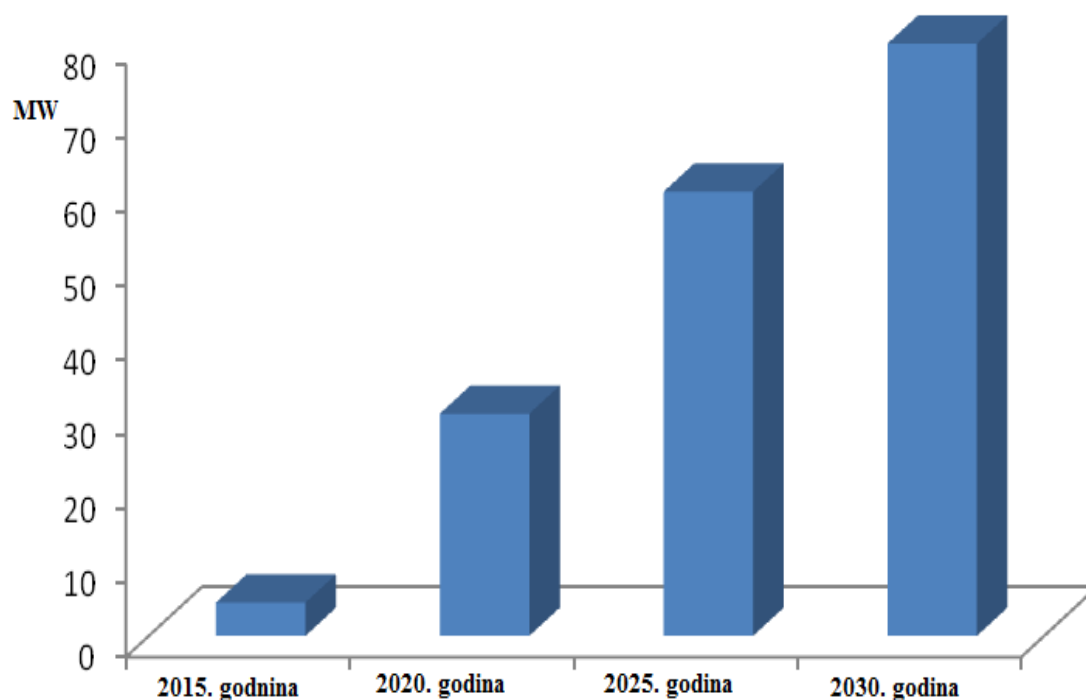
Emisije iz energetskeg sektora predstavljaju glavni izvor zagađenja životne sredine u Republici Srbiji. Termoelektrane u Republici Srbiji koriste čvrsto gorivo (lignit) za proizvodnju električne energije. Takođe, u ovom procesu nastaje i preko 5.5 miliona tona pepela godišnje, što dovodi do nekontrolisanih sekundarnih emisija sa deponija pepela. Emisija azotnih i sumpornih oksida iz ovih postrojenja predstavlja veliki problem u zagađenju vazduha. Smanjenje emisije azotnih oksida je vrlo značajno zbog njihovog uticaja na zdravlje stanovništva, stvaranje fotohemijskog smoga, pojavu štetnog ozona u nižim slojevima atmosfere i nastanka kiselih kiša (RGF Beograd). Smanjenje emisije CO₂ i N₂O je značajno pre svega što su to gasovi sa efektom staklene bašte koji doprinosi globalnom zagrevanju, a N₂O indirektno oštećuje i ozonski omotač (RGF Beograd). Smanjenje emisija čestica u atmosferu značajno je u cilju redukcije negativnih uticaja na zdravlje, posebno uticaja na disajne organe kao i na nastajanje smoga u nižim delovima atmosfere.

Republika Srbija potpisala je i ratifikovala UN Okvirnu konvenciju o klimatskim promenama (UNFCCC). Kao zemlja u razvoju, Republika Srbija je dužna da razvije inventar GHG gasova i da izveštava o merama za smanjenje emisije GHG. Jedan od prvih koraka ka ispunjenju navedenih obaveza, Republika Srbija je ispunila kroz pripremu Prve nacionalne komunikacije o emisijama gasova staklene bašte (UN klima, 2010) i programa ublažavanja emisije gasova staklene bašte za najznačajnije sektore iz kojih se emituju (energetika, transport, poljoprivreda, otpad i šumarstvo).

Kao zemlja koja u energetskeom sektoru najvećim delom troši neobnovljive fosilne izvore, Republika Srbija mora da promeni način korišćenja prirodnih resursa i poveća proizvodnju energije iz obnovljivih izvora (Res direktiva, 2009). Biogas predstavlja obnovljiv izvor energije koji može doprineti ovoj obavezi.

Posle usvojenih stimulativnih mera Vlade Republike Srbije u periodu od 2009. do 2013. godine, počela su ulaganja u izgradnju biogasnih postrojenja. Strategija razvoja energetike do 2025. godine sa projekcijom do 2030. godine predvidela je izgradnju do

80 MW_e instalisane snage (slika 5.7) za proizvodnju električne energije iz biogasa (Strategija, 2015).



Slika 5.7 Plan izgradnje biogas postrojenja po instalisanoj snazi (MW_e) do 2030. godine (Cvetkovic i saradnici, 2014; NREAP, 2013; Strategija, 2015)

5.3.1 Sirovine za proizvodnju električne energije

U ovom poglavlju su opisani neobnovljivi i obnovljivi izvori energije, koji se koriste u proizvodnji električne energije u ovom razmatranju.

Kolubarski lignit

Kolubarski rudarski basen smešten je u centralnom delu Republike Srbije. Lignit iz ovog basena predstavlja najznačajniji resurs za proizvodnju električne energije u Republici Srbiji. Ukupna snaga termoelektrana i termoelektrana-toplana koje koriste lignit iz kolubarskog basena prelazi 3,000 MW_e (SuDES project, 2012). Karakteristike kolubarskog lignita date su u tabeli 5.5.

Tabela 5.5 Karakteristike kolubarskog lignita (Milisavljevic i saradnici, 2009)

Vlaga	44%–56%
Sumpor	0.4–0.6%
Pepeo	9.8%–16.55%
Donja toplotna moć	7.3–9.4 MJ/kg

Niska toplotna moć i visok sadržaj pepela doprinose velikoj emisiji polutanata u životnu sredinu iz termoelektrana koje koriste kolubarski lignit kao energent. Step en energetske efikasnosti u proizvodnji električne energije iz uglja iznosi 0.3-0.4 (Cuélar i Webber, 2008; EURELECTRIC, 2003).

Prirodni gas

U Republici Srbiji, 4% instalisanih kapaciteta za proizvodnju električne energije koristi prirodni gas. Republika Srbija godišnje potroši oko 2.5 milijarde m³_N gasa, uglavnom za proizvodnju toplotne energije, od čega se 80% potrošenog prirodnog gasa uvozi. Tipičan sastav prirodnog gasa predstavljen je u tabeli 5.6.

Tabela 5.6 Tipičan sastav prirodnog gasa (EMS)

Komponente	vol %
ugljen–dioksid	0-8
metan	70-90
etan+propan+butan	0-20
azot	0-5
kiseonik	0-0.2

Prirodni gas se može konvertovati u električnu energiju korišćenjem gasne turbine ili u kombinovanom procesu (eng. Combined Cycle Gas Turbine processes-CCGT proces), gde se i otpadni gasovi iz gasne turbine koriste u procesu proizvodnje električne energije. Stepenergetске efikasnosti u proizvodnji električne energije iz prirodnog gasa iznosi 0.25-0.58 (EURELECTRIC, 2003; Mancarella i Chicco, 2008). Strategija razvoja energetike do 2025. godine sa projekcijom do 2030. (Strategija, 2015), predviđa izgradnju novih gasnih elektrana i njihov priključak na elektro-energetski sistem Republike Srbije.

Biogas

Biogas predstavlja energent koji se može koristiti u proizvodnji električne energije. Stepenergetске efikasnosti u proizvodnji električne energije iz biogasa iznosi 0.25-0.60 (Trendewicz i Braun, 2013). Izbor tehnologije za određenu primenu zavisi od izvora biogasa, tipa industrije, nivoa kontaminacije biogasa, cene opreme, sistema podsticaja za korišćenje biogasa na nacionalnom i lokalnom nivou.

5.3.2 Određivanje emisija

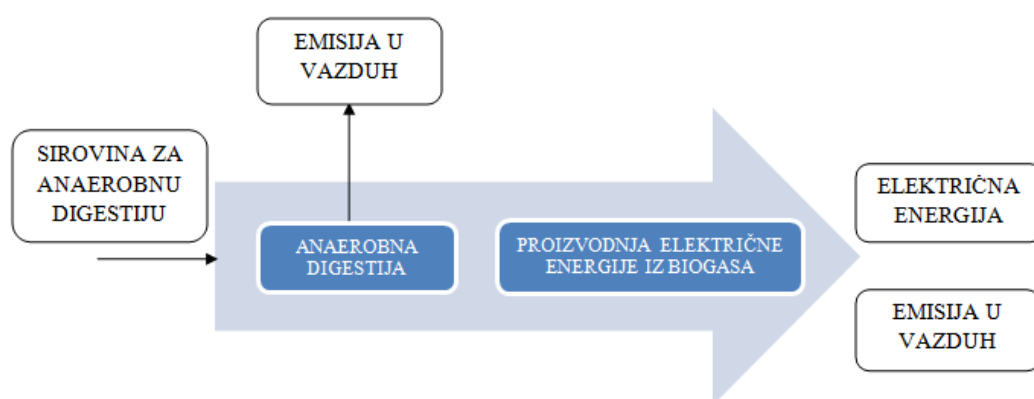
U ovoj tezi razmatrane su emisije u tri scenarija u kojima je proizvedena ista količina električne energije iz postrojenja koja kao energent koriste biogas, odnosno kolubarski lignit ili prirodni gas. U svakom od scenarija je analizirana emisija u životnu sredinu.

Scenario (S5) (slika 5.8): električna energija se proizvodi iz biogasa nastalog u anaerobnoj digestiji u postrojenjima snage 80 MW, gde je energetska efikasnost u proizvodnji električne energije, (μe), iznosila 0.25-0.45 (Trendewicz i Braun, 2013). U ovom scenariju emisije u okolinu potiču iz procesa anaerobne digestije, (gubitak i emisija metana) i proizvodnje električne energije iz nastalog biogasa.

U ovom radu u podscenariju (**S5a**) analiziran je uticaj razvoja tehnologija za proizvodnju električne energije iz biogasa, i njihovog stepena energetske efikasnosti, na korišćenje ukupnog potencijala biogasa u Srbiji u skladu sa pretpostavljenim učešćem ovih tehnologija u ukupnoj instalisanoj snazi biogasnih postrojenja do 2030. godine.

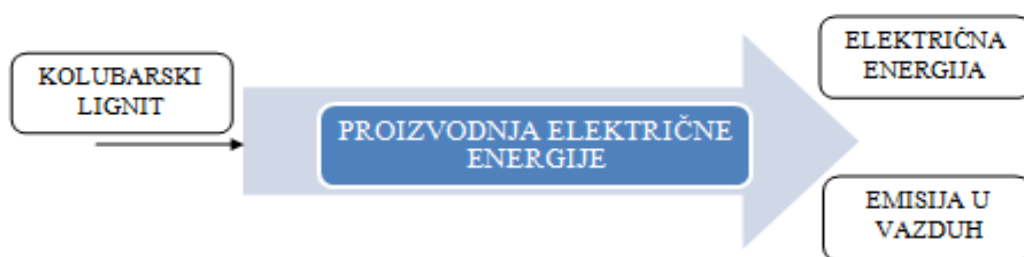
U podscenariju, (*S5a*), pretpostavljeno je da će do 2030. godine 80% (64 MW_e) od ukupno instalisanih biogasnih postrojenja koristiti gasne motore sa stepenom energetske efikasnosti u proizvodnji električne energije od 0.45. Pretpostavka u ovom podscenariju je i da će 10% (8 MW_e) biogasnih postrojenja koristiti gorivne ćelije sa stepenom energetske efikasnosti od 0.55, dok će ostala biogasna postrojenja (8 MW_e) koristiti druge tehnologije sa energetsom efikasnošću u proizvodnji električne energije od 40%. Pretpostavljeni udeo metana u biogasu u ovom podscenariju bio je 60% (AEBIOM, 2009).

Obezbeđenje sirovina i njihova upotreba za proizvodnju biogasa može imati veliki uticaj na razvoj biogas sektora u Republici Srbiji do 2030. godine. U podscenariju, (*S5b*), pretpostavljeno je da će do 2030. godine: 70% (56 MW_e) instalisanih postrojenja koristi kao sirovinu poljoprivrednu biomasu; 20% instalisanih postrojenja (16 MW_e) koristiće komunalni otpad i 10% (8 MW_e) koristiće sirovine iz otpadnih voda prehrambene industrije koje sadrže organsku komponentu. U ovom podscenariju pretpostavljeni su sledeći sadržaji metana: u biogasu iz poljoprivredne biomase 52% (Pucker i saradnici, 2013); u biogasu iz komunalnog otpada 60% (Frankiewicz, 2014) i biogasu iz otpadnih voda prehrambene industrije 65% (Biogas Renewable Energy, 2015). Donja toplotna moć metana bila je 35.8 MJ/m³.



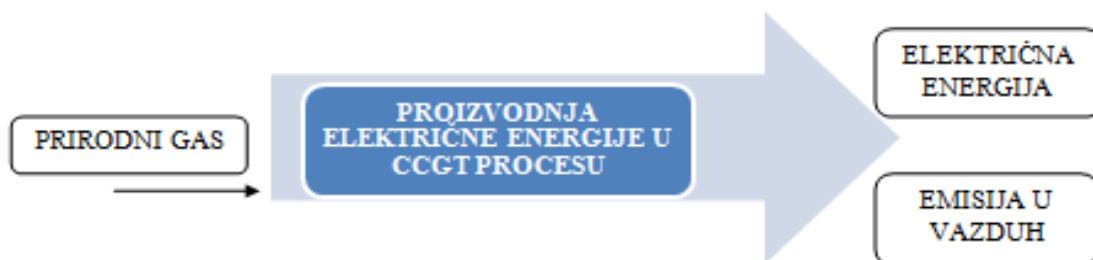
Slika 5.8 Blok dijagram scenarija (S5)

Scenario (S6) (slika 5.9): ista količina električne energije koja je proizvedena u scenariju (S5), proizvedena je u postrojenju koje koristi kolubarski lignit, gde je energetska efikasnost u proizvodnji električne energije, (μ_e), iznosila 0.33 (Cuélar i Webber, 2008; EURELECTRIC, 2003). Emisije u okolinu u ovom scenariju potiču iz procesa proizvodnje električne energije iz kolubarskog lignita.



Slika 5.9 Blok dijagram scenarija (S6)

Scenario (S7) (slika 5.10): ista količina električne energije koja je proizvedena u scenariju (S5), proizvedena je i u ovom scenariju iz postrojenja koje koristi prirodni gas u CCGT procesu. Pretpostavljena vrednost energetske efikasnosti u ovom procesu, (μ_e), iznosila je 0.5 (EURELECTRIC, 2003; Mancarella i Chicco, 2008). Emisija u životnu sredinu je posledica proizvodnje električne energije iz prirodnog gasa.



Slika 5.10 Blok dijagram scenarija (S7)

5.4 Proračun emisija

Proizvedena električna energija, Eel , iz biogasa određena je prema:

$$Eel = P_i \cdot T \quad (40)$$

gde je P_i - instalisana snaga biogas postrojenja u kW_e (usvojeno je 80 MW_e); T - broj radnih sati godišnje biogas postrojenja (usvojeno je 7,700 časova kao u poglavlju 4.2).

U ovom istraživanju potrebna zapremina biogasa za proizvodnju električne energije, (V_{BG}), računata je na osnovu formule:

$$V_{BG} = (P_i \cdot T) / (\mu_e \cdot LHV_{BG}) \quad (41)$$

LHV_{BG} - toplotna moć biogasa (usvojeno je 6 kWh/m^3).

Potrebna količina kolubarskog lignita za proizvodnju električne energije, (M_L), koja je jednaka proizvodnji električne energije iz biogasnih postrojenja snage 80 MW određena je na osnovu formule:

$$M_L = Eel / (\mu_e \cdot LHV_C) \quad (42)$$

gde je LHV_C - donja toplotna moć kolubarskog lignita i u ovom radu iznosila je 8 MJ/kg uglja.

Zapremina prirodnog gasa, (V_{NG}), potrebna za rad postrojenja čiji je izlaz jednak proizvodnji električne energije iz biogasnih postrojenja snage 80 MW_e određena je na osnovu jednačine:

$$V_{NG} = Eel / (\mu_e \cdot LHV_{NG}) \quad (43)$$

gde je LHV_{NG} - donja toplotna moć prirodnog gasa, koja je iznosila 10 kWh/m^3 prirodnog gasa.

Tokom procesa anaerobne digestije (S5), dolazi do gubitka biogasa nastalog u anaerobnom digestoru (1-10%) (Scholz i saradnici, 2011), uglavnom tokom skladištenja

biogasa (Liebetrau i saradnici, 2010), pri čemu dolazi do emisije metana u životnu sredinu. U ovoj analizi, imajući u vidu da prosečan gubitak biogasa iznosi 1-3% (Scholz i saradnici, 2011; Liebetrau i saradnici, 2010), pretpostavljena vrednost gubitaka biogasa iznosila je 2% od količine nastale u anaerobnom digestoru, što znači da V_{BG} predstavlja 98% ukupno proizvedene količine biogasa koja je proizvedena u procesu anaerobne digestije.

Zapremina ispuštenog biogasa u okolinu tokom anaerobne digestije, ($V_{BG, LOSSES}$), računata je prema formuli:

$$V_{BG, LOSSES} = V_{BG} \cdot (100/98 - 1) \quad (44)$$

Masa metana koja je ispuštena iz biogasa u okolinu tokom procesa anaerobne digestije, (M_{LCH_4}), u atmosferu računata je prema:

$$M_{LCH_4} = 0.6 \cdot V_{BG, LOSSES} \cdot \rho_{CH_4} \quad (45)$$

gde je ρ_{CH_4} , gustina metana u kg/m^3 i ovom radu iznosila je 0.71 kg/m^3 (Cuélar i Webber, 2008).

Ukupna emisija metana u scenariju (S5) jednaka je zbiru emisije metana koji je ispušten u okolinu tokom anaerobne digestije i emisije metana nastale u procesu proizvodnje električne energije iz biogasa.

Za određivanje emisije nastale u procesu sagorevanja biogasa korišćena je tabela 5.7, dok je za određivanje ukupne emisije u scenariju (S6) korišćena tabela 5.8.

Tabela 5.7 Specifične emisije iz postrojenja koja koriste biogas

Polutant	Emisioni faktor	Reference
Ugljen-dioksid	18.7 g/MJ	(Spielman i saradnici, 2007)
Azot (I) oksid	1.1 mg/MJ	(Spielman i saradnici, 2007)
Ukupni azotni oksidi	12 mg/MJ	(Berglund i Borjesson, 2006)
Ukupne čestice	3.8 mg/MJ	(Berglund i Borjesson, 2006)
Sumpor dioksid	5.5 mg/MJ	(Spielman i saradnici, 2007)
Metan	1.9 mg/MJ	(Berglund i Borjesson, 2006)

Tabela 5.8 Specifične emisije iz postrojenja koja koriste kolubarski lignit

Polutant	Emisioni faktor	Reference
Ugljen-dioksid	1.2 kg/kWh	(Eric i saradnici, 2012)
Azot (I) oksid	25.3 mg/kg	(US EPA, 2015)
Ukupni azotni oksidi	0.622 g/kWh	(Jovanovic i Komatina, 2012; Ito, 2011)
Ukupne čestice	0.8 g/kWh	(EPS Zelena knjiga, 2009)
Sumpor dioksid	2.87 g/kWh	(Jovanovic i Komatina, 2012; Ito, 2011)
Metan	172 mg/kg	(US EPA, 2015)

U svrhu određivanja ukupne emisije nastale u scenariju (S7) korišćena je tabela 5.9.

Tabela 5.9 Specifične emisije iz postrojenja koja koriste prirodni gas

Polutant	Emisioni faktor	Reference
Ugljen-dioksid	1.92 kg/m ³	(US EPA Natural gas)
Azot (I) oksid	0.01024 g/m ³	(US EPA Natural gas)
Ukupni azotni oksidi	0.0024 kg/m ³	(US EPA Natural gas)
Ukupne čestice	0.12 g/m ³	(US EPA Natural gas)
Sumpor dioksid	0.0096 g/m ³	(US EPA Natural gas)
Metan	0.0368 g/m ³	(US EPA Natural gas)

Proračun GHG emisije

U razmatranim scenarijima analizirana je emisija sledećih gasova sa efektom staklene bašte: ugljen-dioksida, metana i azot (I) oksida. U skladu sa preporukama Međunarodnog panela o klimatskim promenama (IPCC vodič, 2006; Pucker i saradnici, 2013), sledeći faktori konverzije su primenjeni: 1 kg CO₂ = 1 kg CO₂ eq, 1 kg CH₄ = 25 kg CO₂ eq, 1 kg N₂O = 298 kg CO₂ eq.

Ekvivalentna emisija GHG u scenarijima dobijena je kao :

$$Z_{I,II,III} = Z_{CO_2} + Z_{CH_4} + Z_{N_2O} \quad [\text{kg CO}_2\text{-eq}] \quad (46)$$

$Z_{I,II,III}$ - ekvivalentna emisija GHG u odgovarajućem scenariju; Z_I u (S5); Z_{II} u (S6); Z_{III} u (S7);

Z_{CO_2} - [kg CO₂-eq]

$$Z_{CH_4} - [\text{kg CO}_2\text{-eq}]$$

$$Z_{N_2O} - [\text{kg CO}_2\text{-eq}]$$

Neto emisija GHG gasova određena je iz sledećih jednačina:

$$\Delta Z_{GHG, I-II} = Z_I - Z_{II} \quad [\text{kg CO}_2\text{-eq}] \quad (47)$$

$$\Delta Z_{GHG, I-III} = Z_I - Z_{III} \quad [\text{kg CO}_2\text{-eq}] \quad (48)$$

$$\Delta Z_{GHG, II-III} = Z_{II} - Z_{III} \quad [\text{kg CO}_2\text{-eq}] \quad (49)$$

6. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

Rezultati proračuna potencijala za proizvodnju biogasa prema metodologijama prikazanim u poglavlju 4.1. dati su u tabeli 6.1 (Cvetkovic i saradnici, 2014).

Prema tabeli 6.1 potencijal za proizvodnju biogasa iz poljoprivrednih useva proizvedenih na zemljištu namenjenom u energetske svrhe iznosi 1,635.8 miliona m³/godišnje ili 5.25% primarne energije u 2011. godini. Korišćena toplotna moć biogasa (sa 60% metana) iznosila je 0.52 ten/1,000 m³ biogasa (AEBIOM, 2009). Na osnovu toga, potencijal za proizvodnju biogasa iz poljoprivrednih useva proizvedenih na zemljištu namenjenom u energetske svrhe iznosi 850.63 kten. Imajući u vidu da 0.2 miliona ha/godišnje obradive zemlje ostane neiskorišćeno (NREAP, 2013), postoji mogućnost za proizvodnju značajne količine biogasa sa ovih poljoprivrednih površina.

Prema istoj tabeli proizvodnja biogasa iz poljoprivrednih useva proizvedenih na zemljištu namenjenom u energetske svrhe, predstavlja najveći potencijal za proizvodnju biogasa u Srbiji. Imajući na umu da je potrošnja prirodnog gasa u Srbiji oko 2.5 milijarde m³, dobijena vrednost potencijala biogasa predstavlja dobru osnovu kao zamena za prirodni gas. Prema Nacionalnom akcionom planu za obnovljive izvore energije, do 2020. godine (NREAP, 2013) biće instalirano 30 MW za proizvodnju električne energije iz biogasa. Godišnji prinos kukuruzne silaže sa jednog hektara,

dovoljan je da omogući godišnji rad kogenerativnog biogas postrojenja snage 2.2 kW (Martinov i saradnici, 2012). Ako se pretpostavi da je udeo snage biogasnih postrojenja koja bi koristila kukuruznu silažu za proizvodnju električne energije 25%, 50% i 75% od ukupno 30 MW_e koliko se očekuje do 2020. godine, bile bi potrebne sledeće površine pod silažnim kukuruzom: 3,409 ha, 6,818 ha i 10,227 ha, respektivno, što je 2-6% od procenjenih 177,500 ha (5% obradivog zemljišta koje bi se koristilo u energetske svrhe). Kako bi se potencijali što efikasnije iskoristili treba usvojiti dugoročnu politiku podsticaja za proizvodnju biomase za proizvodnju biogasa, a da to ne ugrozi proizvodnju i cenu hrane na domaćem tržištu.

Tabela 6.1 Pregled potencijala za proizvodnju biogasa iz različitih sirovina

	Biogas potencijal
	(milion m³/godišnje)
Poljoprivredni usevi proizvedeni na zemljištu namenjenom u energetske svrhe	1,635.8
Komunalni otpad	95.6
Otpadni tokovi iz stočarstva Stajnjak krava	123.1
Otpadni tokovi iz stočarstva Svinjski stajnjak	47.8
Otpadni tokovi iz stočarstva Stajnjak živine	10
Otpad iz industrije prerade mesa	19.1
Otpadne vode industrije prerade mleka	6.2
<u>UKUPNO</u>	<u>1,937.6</u>

Dalje, tabela 6.1 pokazuje da je izračunati potencijal za proizvodnju biogasa iz otpadnih tokova u stočarstvu 180.9 miliona m³/godišnje ili 94.13 kten/godišnje. Potencijal za proizvodnju biogasa iz otpadnih tokova u stočarstvu (koristeći 35% ukupnog svinjskog i kravljeg stajnjaka), izračunat je i iznosi 170.9 miliona m³ biogasa ili 88.91 kten. Prema metodologiji u Biogas mapi puta u Evropi (AEBIOM, 2009) (5% zemljišta + 35% stajnjaka od goveda i svinja), ovaj potencijal za proizvodnju biogasa iznosi 0.94 Mten. Proizvodnju biogasa iz stajnjaka treba kombinovati sa korišćenjem poljoprivrednih useva, zbog niskog sadržaja organske materije koju stajnjak ima, kao i zbog velike potrošnje energije za održavanje temperaturnih uslova anaerobne digestije u ovim sistemima. U ovakvim proizvodnim procesima sporedni proizvod je digestat, koji se može koristiti kao đubrivo, što smanjuje troškove proizvodnje.

Očekuje se da se ovi potencijali pretežno koriste na srednjim i velikim farmama. Za farme sa malom površinom zemljišta i malim stočnim fondom, proizvodnja biogasa nije ekonomski održiva. U ovakvim slučajevima treba promovisati udruživanje malih farmi kako bi se potencijali iskoristili.

Na osnovu primenjene metodologije za proizvodnju biogasa može se koristiti 776,181 t komunalnog otpada. Potencijal za proizvodnju biogasa iz komunalnog otpada u Srbiji procenjen je na 95.6 miliona m³/godišnje (tabela 6.1) ili 49.72 kten. Na osnovu ove analize može se zaključiti da komunalni otpad može biti potencijalno dobar energetski izvor u Srbiji.

Kada se govori o potencijalima korišćenja komunalnog otpada za proizvodnju biogasa treba napomenuti da je primarni cilj upravljanje i tretman ove vrste otpada. Potencijal se može povećati, ali je neophodno proširiti sistem sakupljanja otpada, naročito u seoskim sredinama. Strategija upravljanja otpadom (2010), predviđa izgradnju 26 regionalnih deponija, od kojih je do sada izgrađeno 8. To može biti dobra mogućnost za prikupljanje biodegradabilne frakcije otpada koja se zahteva u proizvodnji biogasa.

Kako se može videti iz tabele 6.1, 73,350 t otpada iz industrije prerade mesa može biti tretirano za proizvodnju biogasa, sa procenjenim potencijalom od 19.11 miliona m³/godišnje, što je ekvivalentno količini od 11.68 miliona m³ prirodnog gasa godišnje.

Uzimajući u obzir da je otpad iz industrije prerade mesa veliki problem u zagađenju životne sredine, korišćenje ovog potencijala bi smanjilo zagađenje vode i zemljišta, kao i poboljšalo zaštitu od infektivnih bolesti koje se sa životinja prenose na ljude. U cilju povećanog iskorišćenja ovog potencijala, neophodno je poboljšati sistem prikupljanja otpada iz industrije mesa u Republici Srbiji.

Prema tabeli 6.1, ukupni potencijal za proizvodnju biogasa iz otpadnih voda industrije prerade mleka u Srbiji iznosi 6.2 miliona m³/godišnje ili 3.21 kten/godišnje. Dobijeni rezultat ima dobro slaganje sa rezultatom koji je dobijen za određivanje potencijala za proizvodnju biogasa iz otpadnih voda industrije mleka u Turskoj i koji je iznosio 54.2 miliona m³/godišnje uz učešće industrijske prerade mleka od 60% (Coscun i saradnici, 2012).

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da se biogasom iz otpadnih voda industrije mleka može godišnje supstituisati 3.8 miliona m³ prirodnog gasa. Industrija mleka ima potrebu za korišćenjem rashladne energije, što omogućava upotrebu ovog potencijala za hlađenje mlečenih proizvoda u sistemu trigeneracije.

U ovom radu korišćene su različite pretpostavke koje su uključene u proračun potencijala za proizvodnju biogasa, što uvodi određene stepene nesigurnosti. Iz tog razloga vrednosti procenjenih parametara korišćenih u ovoj tezi su uvek bile restriktivne.

Nesigurnosti mogu nastati iz načina na koji su definisani principi u pristupu proračunu, a to se posebno odnosi za procenu količina materijala koje se mogu koristiti za proizvodnju biogasa, kao i procenu prinosa biogasa iz različitih izvora. Prinos biogasa zavisi od korišćene tehnologije proizvodnje biogasa kao i od parametara procesa. Stočni fond u Srbiji se smanjuje poslednjih godina (tabela 3.1) zbog loših ekonomskih uslova za stočarstvo. Stoga nesigurnost u proračunima potencijala za proizvodnju biogasa iz otpadnih tokova u stočarstvu, može se javiti jer je 2011. godina korišćena za procenu brojnosti stočnog fonda. Budućnost stočnog fonda u Srbiji će zavisiti od ekonomskih mera koje će Vlada Srbije preduzeti u cilju stimulacije poljoprivredne proizvodnje.

Takođe, parametri: B - prinos suve materije kukuruzne silaže po ha, A₂ - procenjeni prinos stajnjaka po jednoj životinji i B₂ - procenjeni procenat suve materije, zavise od poljoprivredne prakse i mogu se menjati u budućnosti.

Korišćenje proračunatih potencijala biogasa

Energija koju je potrebno proizvesti iz biogasa da bi se dostigli ciljevi po preporuci AEBIOM (poglavlje 4.2), izračunata je i data je u tabeli 6.2.

Tabela 6.2 Finalna energija iz biogasa po sektorima potrošnje po preporuci AEOBIM do 2030. godine

El. energija (kten)	Saobraćaj (kten)	Toplotna energija (kten)	Scenario
56	25.09	10.58	(SA)
49.82	20.22	9.36	(SB)

Tabela 6.2 pokazuje da je u scenariju (SA), potrebno do 2030. godine ostvariti godišnju proizvodnju električne energije od 651.28 miliona kWh, dok je u sektorima saobraćaja i proizvodnje toplotne energije potrebno ostvariti 291.8 miliona kWh i 123 miliona kWh, respektivno. U scenariju sa merama energetske efikasnosti (SB) potrebno je do 2030. godine ostvariti 579.4 miliona kWh u proizvodnji električne energije, 235.16 miliona kWh u sektoru saobraćaja i 108.86 miliona kWh u proizvodnji toplotne energije.

Ukupna instalisana snaga za proizvodnju električne energije iz biogasa, određena je pomoću jednačine (6) i iznosila je u scenariju (SA) 84.58 MW_e, dok je u scenariju sa merama energetske efikasnosti (SB) iznosila 75.24 MW_e (Cvetkovic i saradnici, 2015a). Ako se porede izračunate vrednosti u oba scenarija, može se zaključiti dobro slaganje sa predviđanjem instalisane snage biogasnih elektrana u Republici Srbiji do 2030. godine od 80 MW_e, koja je sadržana u Strategiji razvoja energetike do 2025. godine sa projekcijom do 2030. (Strategija, 2015).

Ukupno proizvedena toplotna energija u biogas kogenerativnim postrojenjima izračunata je prema jednačini (7) i iznosila je 63 kten u (SA) i 56.05 kten u (SB).

Dobijene vrednosti pokazuju da se predviđeni cilj za proizvodnju finalne toplotne energije iz biogasa (tabela 6.2), može u potpunosti ostvariti iz kogenerativnih postrojenja na biogas, ako se iskoristi 16.7% od proizvedene toplotne energije u scenarijima (SA) i (SB).

Zapremina biogasa potrebna da se proizvede električna energija u (SA) i (SB) određena je iz jednačine (8) i iznosila je 271.36 miliona m³ u (SA), dok je u (SB) iznosila 241.41 miliona m³ (tabela 6.3). Zapremina biogasa u sektoru saobraćaja u (SA) i (SB) određena je iz jednačine (9) i iznosila je 48.45 miliona m³ u (SA), dok je u (SB) iznosila 39.2 miliona m³ (tabela 6.3).

Tabela 6.3 Potrebna zapremina biogasa za ostvarivanje ciljeva po preporuci AEOBIM do 2030. godine

El. Energija (milion m³)	Saobraćaj (milion m³)	Scenario
271.36	48.45	(SA)
241.41	39.2	(SB)

Ukupno utrošena zapremina za proizvodnju energije iz biogasa u scenariju (SA) iznosila je 16.5% od ukupno proračunatog potencijala za proizvodnju biogasa u Republici Srbiji, dok je u (SB) ukupno utrošena zapremina biogasa bila 14.48% od ukupno proračunatog potencijala za proizvodnju biogasa (Cvetkovic i saradnici, 2015a). Ako se poredi dobijena vrednost ukupne potrebne zapremine biogasa (319.81 miliona m³) u (SA) sa vrednostima potencijala za proizvodnju biogasa iz različitih izvora (tabela 6.1), može se zaključiti da predviđeni ciljevi za proizvodnju energije iz biogasa do 2030. godine u scenariju (SA) ne mogu se ostvariti bez korišćenja poljoprivrednih useva proizvedenih na zemljištu namenjenom u energetske svrhe. Potrebna zapreminu za proizvodnju energije iz biogasa do 2030. godine (280.61 miliona m³) u (SB) može se dobiti korišćenjem potencijala za proizvodnju biogasa iz komunalnog otpada, stajnjaka iz poljoprivrede, otpadnih tokova mesne industrije i otpadnih voda industrije prerade

mleka, bez korišćenja poljoprivrednog zemljišta na kome bi se proizvodile biljne kulture namenjene proizvodnji energije.

6.1 Rezultati LCEA analize

LCEA analiza u ovom radu izvršena je na osnovu razmatranja materijalnih i energetskih bilansa biogasnog postrojenja u poljoprivrednoj kompaniji Mirotin.

6.1.1 Rezultat materijalnog bilansa

Kukuruzna silaža potrebna za rad biogas postrojenja može se proizvoditi na 259 ha poljoprivrednog zemljišta u vlasništvu kompanije Mirotin. Rezultati pokazuju da čvrsti digestat u potpunosti može zameniti mineralno đubrivo (tabela 6.4) na poljoprivrednom zemljištu koje se koristi za proizvodnju kukuruzne silaže namenjenoj za proizvodnju energije (Cvetkovic i saradnici, 2015b). Za proces proizvodnje kukuruzne silaže neophodno je obezbediti 38.85 t azota, 51.8 t fosfata u obliku P_2O_5 kao i 45.3 t kalijuma u obliku K_2O .

Tabela 6.4 Digestat kao đubrivo

	Količina đubriva kg/ha (Cropgen, 2007b)	Proizvodnja nutrijenata u čvrstom digestatu u biogas postrojenju Mirotin (t/godišnje)	Nutrijenti potrebni za proizvodnju kukuruzne silaže na 259 ha u kompaniji Mirotin (t/godišnje)
Azot N	150	90.07	38.85
Fosfat kao P_2O_5	200	60.35	51.8
Kalijum oksid kao K_2O	175	65.75	45.3

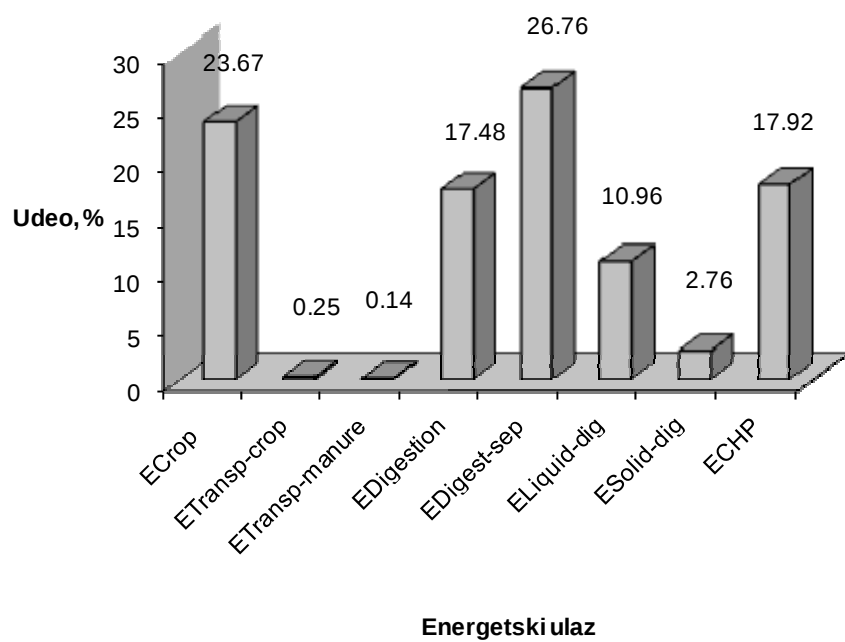
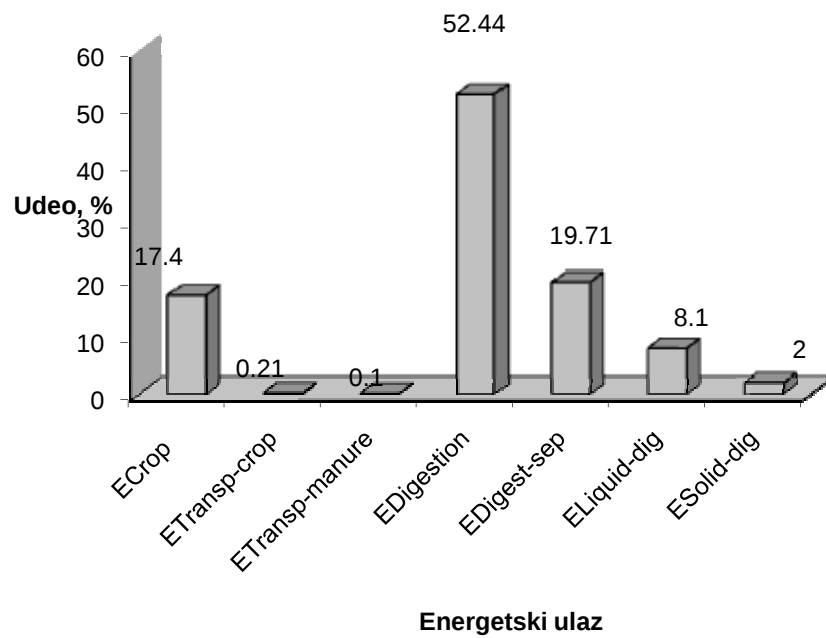
Proizvodnja mineralnih đubriva je energetska intenzivna. Naročito se to odnosi na azotna đubriva koja u svojoj proizvodnji zahtevaju znatne količine prirodnog gasa. Korišćenje digestata dovodi do uštede fosfatnih minerala čije su rezerve ograničene, što pozitivno utiče na lanac kruženja fosfora u prirodi.

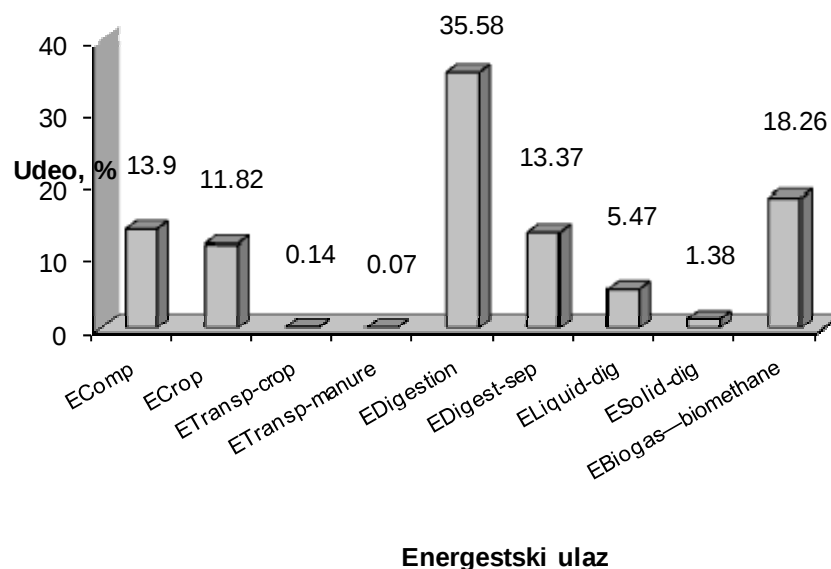
6.1.2 Rezultat eneretskog bilansiranja

Rezultati za različite energetske ulaze dati su u tabeli 6.5, a struktura energetskih ulaza za različite scenarije prikazana je na slikama 6.1a-6.1c.

Tabela 6.5 Energetski ulazi u ovom istraživanju

ENERGETSKI ULAZ	VREDNOST
E_{crop}	2,149.7 GJ
$E_{transp-crop}$	26.1 GJ
$E_{transp-manure}$	3,500 kWh/god
$E_{digestion}$	6,469 GJ/god i 1,587.6 GJ/god u (S2)
E_{chp}	207 MWh/ god toplote i 244.5 MWh/god el.energije
$E_{digest-sep}$	2,431.1 GJ
E_{L-dig}	995.2 GJ
E_{S-dig}	251.3 GJ
$E_{biogas-biomethane}$	3,320.2 GJ
$E_{comp-biomethane}$	2,526 GJ
E_H	63,200 GJ





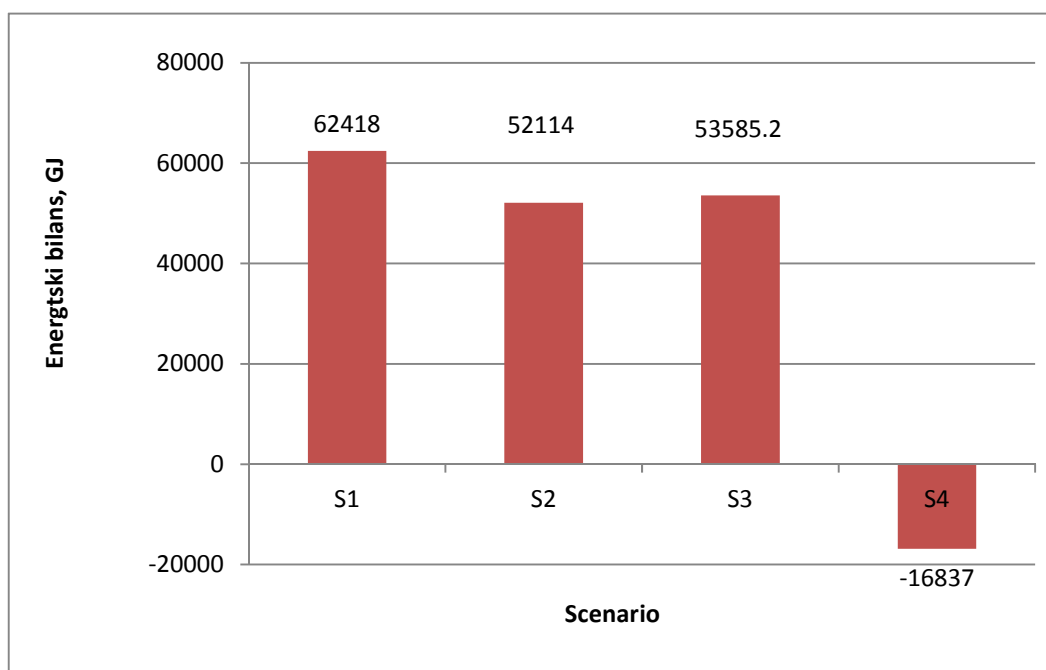
c)

Slika 6.1 Struktura energetske ulaza za različite scenarije a) (S1), b) (S2), c) (S3)

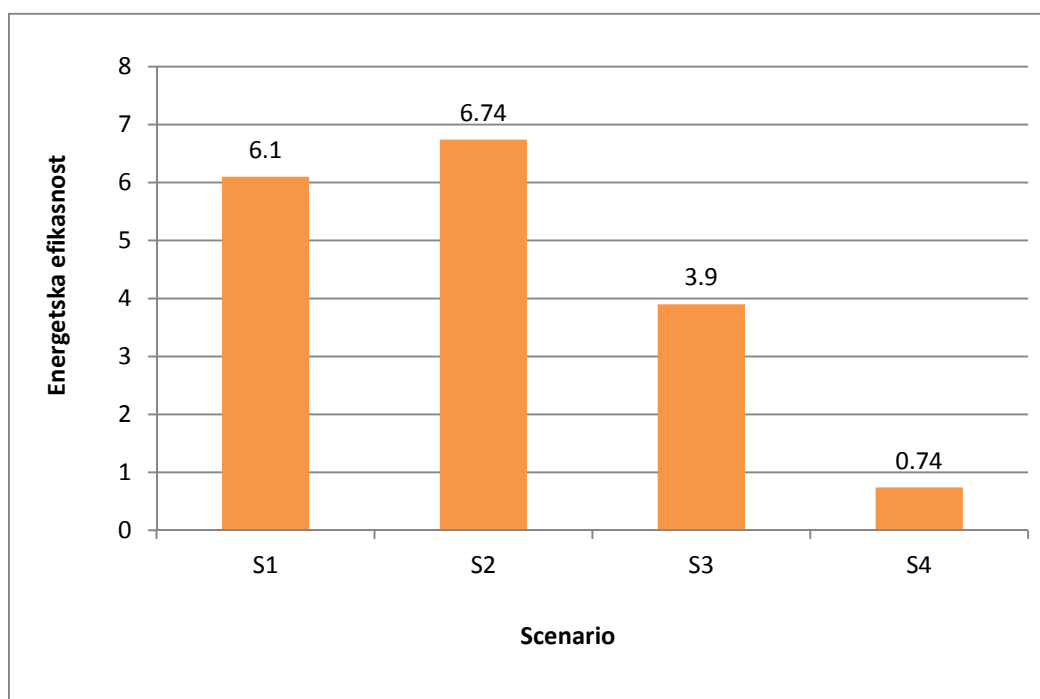
Rezultat energetske bilansiranja prema (S1)

Rezultati proračuna za scenario (S1) pokazuju da ukupan energetske ulaz iznosi 12,335 GJ. Kako se može videti sa slike 6.1a, vrednost energetske ulaza za proces anaerobne digestije je najveća i iznosi 52.44% ukupnog energetske ulaza. Ovaj scenario ima pozitivan energetske bilans od 62,418 GJ (slika 6.2). Rezultat za energetske efikasnost (μ_1) iznosi 6.1 (slika 6. 3) i pokazuje da je sa energetske aspekta ovaj scenario održiv. U (S1) pretpostavljeno je da će se čvrsti 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.

Rezultat za energetske efikasnost dobijen u analizi scenarija (S1) pokazuje dobro slaganje sa drugim radovima koji su analizirali energetske efikasnost u životnom ciklusu proizvodnje toplotne energije iz biogasa, u kojima su dobijene vrednosti energetske efikasnosti u opsegu od 2.5 do 7.2 (Pöschl i saradnici, 2010; Cropgen, 2007a; Davis i saradnici, 2009; Uellendahl i saradnici, 2008).



Slika 6.2 Energetski bilans u GJ po scenarijima



Slika 6.3 Energetska efikasnost po scenarijima

Manje vrednosti koje su dobijene u ovim radovima, mogu se objasniti različitim izborom granice sistema za LCEA analizu. Rezultat za energetske efikasnosti (6.1) dobijen u (S1), 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 (Mortimer, 1991).

Parazitska energija u scenariju (S1) sastoji se od: ulazne energije za transport stajnjaka, energije potrebne za proces anaerobne digestije i ulazne energije za razdvajanje digestata. U scenariju (S1), μ_p , je određen prema jednačini (22) i bio je 8.37 (tabela 6.6), 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 istraživanju (Gropgen, 2007a). Najveći deo parazitske ulazne energije odnosi se na ulaznu energiju potrebnu za zagrevanje reaktorske jedinice u kojoj se odvija anaerobna digestija.

Vrednost dobijena za $E_{F/TS}$ u (S1) je određen prema jednačini (23) i iznosila je 6.77 MJ/kg suve materije ulazne sirovine (Tabela 6.6). Ovaj rezultat znači da obrada 147.71 g suve materije ulazne sirovine pod uslovima u ovom scenariju ostvaruje 1 MJ pozitivnog energetskog bilansa.

Tabela 6.6 Izračunate vrednosti za (μ_p) i ($E_{F/TS}$) po scenarijima

Indikator	(S1)	(S2)	(S3)	(S4)
μ_p	8.37	10.81	4.82	0.61
$E_{F/TS}$ [MJ/kg SM]	6.77	5.65	5.81	-1.82

Rezultat energetskog bilansiranja prema (S2)

Ukupan energetski ulaz za (S2) iznosio je 9,081 GJ (Cvetkovic i saradnici, 2015b). U ovom scenariju toplotna energija za digestor obezbeđuje se iz kogenerativne jedinice u iznosu od 1,356 MWh godišnje, što značajno smanjuje energetski ulaz u odnosu na

(S1). Najveće vrednosti energetske ulaza u ovom scenariju imaju energetski ulaz za separaciju digestata (26.76%) i energetski ulaz za proizvodnju kukuruzne silaže (23.67%) (slika 6.1b).

Vrednosti energetske efikasnosti u proizvodnje električne ($\mu_{CHP,el}$) i toplotne energije ($\mu_{CHP,H}$) u kogenerativnoj jedinici respektivno iznose 0.39 i 0.42. Ukupno dobijena vrednost (zbir $\mu_{CHP,el}$ i $\mu_{CHP,H}$), iznosila je 0.81. Ovaj rezultat je veći od vrednosti (0.6-0.73), koju su za isto razmatranje dobili (Laaber i saradnici, 2007; Blengini i saradnici, 2011; Havukainen i saradnici, 2014).

Scenario (S2) ima pozitivan energetski bilans od 52,114 GJ (Slika 6.2), kao i energetsku efikasnost (μ_2) od 6.74 (slika 6.3) (Cvetkovic i saradnici, 2015b). Vrednost za energetsku efikasnost dobijena u ovom radu, pokazuje dobro slaganje sa vrednostima (2.5-7) koje su dobijene u istraživanjima (Eastern Research Group, 2011; Cherubini i saradnici, 2009; Berglund i Börjesen, 2006).

Parazitska energija u (S2) obuhvata: energetski ulaz za transport stajnjaka, energetski ulaz za anaerobnu digestiju, energetski ulaz za separaciju digestata i ulaznu energiju za kogenerativnu jedinicu. U scenariju (S2) prema jednačini (28) određen je, μ_p , i bio je 10.81 (tabela 6.6), što pokazuje da je parazitska energija činila 9.25% ukupnog energetskeg izlaza. Dobijeni rezultat je u dobrom slaganju sa vrednošću parazitske energije (8.5%) dobijene u analizi (Gropgen, 2007a). Energetski ulaz za razdvajanje digestata najviše doprinosi parazitskoj energiji u ovom scenariju. Parazitska električna energija neophodna je za rad motora u procesu odvajanja digestata. Sprovođenje mera za efikasno korišćenje električne energije u procesu odvajanja digestata (korišćenje frekventnih regulatora, optimizacija napona, itd.), može značajno da doprinese smanjenju parazitske električne energije u ovom scenariju.

$E_{F/TS}$ u (S2) je određen prema jednačini (29) i iznosio je 5.65 MJ/ kg suve materije ulazne sirovine za anaerobnu digestiju (tabela 6.6). Ovaj rezultat znači da procesiranje 176.67g suve materije ulazne sirovine pod uslovima u ovom scenariju, dovodi do 1 MJ pozitivnog energetskeg bilansa.

Rezultat energetskeg bilansiranja prema (S3)

Ukupna ulazna energija u (S3) iznosila je 18,181.2 GJ (Cvetkovic i saradnici, 2015b). Vrednost ukupnog energetskeg ulaza iznosi 25.32% od energije sadržane u bio-CNG, što pokazuje dobro slaganje sa vrednostima (22%-37%) koje su u svom istraživanju dobili (Tuomisto i Helenius, 2008). Energetski ulaz za anaerobnu digestiju (35.58%) (slika 6.1c), obezbeđuje se iz okoline i predstavlja najveći iznos u ukupnom energetskeg ulazu u ovom scenariju. Potrebna energija za preradu biogasa u biometan predstavlja drugi značajan deo energetskeg ulaza (18.26%). Za razliku od ovog rada, energija potrebna za preradu biogasa u biometan, predstavlja fazu sa najvećim iznosom u energetskeg ulazu (42-48%) u istraživanju (Papong i saradnici, 2014). Ova činjenica se može objasniti različitom prirodom sirovina koje se koriste za proizvodnju biogasa. U istraživanjima (Papong i saradnici, 2014), sirovina za proizvodnju biometana bila je otpadna voda iz industrije skroba, dok je u (S3) bila sirovina sastavljena od kukuruzne silaže i stajnjaka krava.

Scenario (S3) ima pozitivan energetski bilans od 53,585.2 GJ (slika 6.2) i vrednost energetske efikasnosti (μ_3) 3.9 (slika 6.3) (Cvetkovic i saradnici, 2015b). U poređenju sa scenarijima (S1) i (S2), ovaj scenario ima manju vrednost energetske efikasnosti iz dva razloga: prvi razlog odnosi se na energetski ulaz potreban za preradu biogasa u biometan i kompresiju dobijenog biometana; drugi razlog je gubitak metana u procesu prerade, usled čega je smanjen energetski izlaz iz sistema. Gubici metana zavise od izbora tehnologije. U nekim tehnologijama, gubitak metana može da ide i do 10% (Niesner i saradnici, 2013). Procena gubitaka metana u ovom radu iznosi 4% i to dovodi do gubitaka energije iz sistema od 3,000 GJ. Emisija metana u okolinu predstavlja ozbiljan problem, uzimajući u obzir da metan ima 25 puta veći efekat na klimatske promene nego ugljen-dioksid. Vrednost energetske efikasnosti dobijene u ovom scenariju pokazuju dobro slaganje sa rezultatima (0.8-6.6) koje su dobili u svojim istraživanjima (Papong i saradnici, 2014; Cherubini i saradnici, 2009; Cropgen 2007a; Havukainen i saradnici, 2014).

Bioenergetski sistemi čija je energetska efikasnost ispod 3, nisu održivi i predstavljaju potencijalnu opasnost po životnu sredinu, pre svega u degradaciji zemljišta, zagađenju

vode i gubitku biodiverziteta (Hall i saradnici, 2009; Arodudu i saradnici, 2014). Imajući ovo u vidu, može se zaključiti da scenario (S3) predstavlja održiv bioenergetski sistem. Rezultat energetske efikasnosti u ovom scenariju daleko je veći od dobijenih rezultata energetske efikasnosti (0.83-0.95) u LCEA analizima koje su razmatrale upotrebu fosilnih izvora u saobraćaju (benzin, dizel ili prirodni gas) (Cherubini i saradnici, 2009).

Parazitska energija u (S3) se sastoji od: ulazne energije za transport stajnjaka, energetskog ulaza za anaerobnu digestiju, energetskog ulaza za razdvajanje digestata, ulazne energije za preradu biogasa u biometan, i ulazne energije za kompresiju biometana. U scenariju (S3), μ_p , određen je prema jednačini (33), i izračunato je da iznosi 4.82 (tabela 6.6), što pokazuje da je parazitska energija iznosila 20.74% od izlazne energije. Ova vrednost je manja od vrednosti (25.46% -38.46%), koje su dobili u svom radu (Havukainen i saradnici, 2014).

$E_{F/TS}$ u (S3) je dobijen prema jednačini (34) i iznosio je 5.81 MJ/ kg suve materije ulazne sirovine (tabela 6.6). Ovaj rezultat znači da obrada 172.12 g suve materije ulazne sirovine za anareobni proces, pod uslovima u ovom scenariju, dovodi do 1 MJ pozitivnog energetskog bilansa sistema.

Rezultat energetskog bilansiranja prema (S4)

U (S4) ukupni energetski ulaz iznosi 64,502 GJ. U ovom scenariju, energetski ulaz utrošen za reforming vodenom parom iznosi 63,200 GJ i predstavlja najveću vrednost u strukturi ukupnog energetskog ulaza. Scenario (S4) ima negativan energetski bilans od 16,837 GJ (slika 6.2), i energetske efikasnost (μ_4) od 0.74 (slika 6.3). Ovi podaci pokazuju da ovaj sistem nije energetski održiv i da značajno troši fosilne resurse.

Rezultat energetske efikasnosti u (S4) može se uporediti sa vrednošću energetske efikasnosti ($\mu=0.66$), koja je dobijena u LCEA analizi dobijanja vodonika procesom reforminga prirodnog gasa u istraživanju (Spath i Mann, 2001). Vrednost energetske efikasnosti u analizi (Spath i Mann, 2001), je manja od vrednosti u ovom radu, što se može objasniti činjenicom da se u (S4), 20% biometana koristi da obezbedi potrebnu energiju za reforming vodenom parom. Rezultat energetske efikasnosti u scenariju (S4)

je veći i od vrednost (0.55), koju su dobili (Wulf i Kaltschmitt, 2013), ispitujući energetske efikasnosti u procesu dobijanja vodonika iz biogasa reformingom vodenom parom. Vrednost energetske efikasnosti u (S4) je uporediva i sa vrednostima energetske efikasnosti iz drugih LCEA studija proizvodnje biovodonika iz biomase, koje su iznosile od 0.38-0.81 (Djomo i Blumberga, 2011). Dobijena vrednosti energetske efikasnosti u (S4), veća je i od vrednosti energetske efikasnosti (0.39) dobijene u LCEA analizi procesa dobijanja vodonika gasifikacijom uglja (Spath i saradnici, 2003).

Parazitska energija u (S4) uključuje: ulaznu energiju za transport stajnjaka, energetski ulaz za anaerobnu digestiju, energetski ulaz za razdvajanje digestata, ulaznu energiju za preradu biogasa u biometan i ulaznu energiju za proces reforminga vodenom parom. U scenariju (S4), prema jednačini (38), μ_p , izračunato je da iznosi 0.61 (tabela 6.6). Parazitska energija u (S4) bila je 1.63 puta veća od vrednosti izlazne energije sadržane u vodoniku kao izvoru energije. Toplotna energija potrebna za reforming proces, kao i energija potrebna za anaerobnu digestiju, najviše učestvuju u iznosu parazitske energije u ovom scenariju. Parazitska energija iz fosilnih izvora korišćena u (S4) ima negativan uticaj na životnu sredinu, pre svega u povećanim emisijama.

Vrednost za $E_{F/TS}$ u (S4) je izračunata prema jednačini (39) i bila je -1.82 MJ /kg suve materije ulazne sirovine (tabela 6.6). Ova vrednost je pokazala da prerada 1 kg suve materije ulazne sirovine pod uslovima opisanim u (S4), dovodi do gubitka u energetskom bilansu od 0.55 MJ.

Treba napomenuti da su u proračunima energetske performansi u pretpostavljenim scenarijima korišćene različite pretpostavke, koje mogu dovesti do određenih nesigurnosti u proračunima. Procena energetskog ulaza u proizvodnji silaže zavisi od poljoprivredne prakse, sastava zemljišta, starosti mehanizacije i drugih faktora. Pretpostavljeni prinos kukuruzne silaže od 40 t/ha zasnovan je na nekompletnoj primeni agrotehničkih mera koje su karakteristične za poljoprivrednu proizvodnju u Republici Srbiji. Pretpostavljena dužina transporta tečnog digestata (7 km) i čvrstog digestata (3km) do poljoprivrednih površina, takođe može uticati na određene nesigurnosti pri određivanju realnih energetske ulaza ovih faza.

Brojne tehnologije prečišćavanja biogasa i proizvodnje biometana imaju različite gubitke metana tokom procesa kao i potrebu za primarnom energijom. Proizvodnja vodonika može se izvoditi na temperaturama nižim od onih napomenutih u radu, ali je posledica takvog procesa manji prinos vodonika. Proračun energetske izlaza zasnovan na donjim toplotnim moćima dobijenih goriva (biogas, biometan, vodonik) u razmatranim scenarijima, može takođe uneti izvesne nesigurnosti u proceni energetske izlaza u scenariju.

6.2 Rezultati modelovanja emisije u životnu sredinu pri proizvodnji električne energije iz biogasa

Ukupno proizvedena električna energija u svakom od analiziranih scenarija, iznosila je 616 miliona kWh godišnje. Potrebna minimalna i maksimalna zapremina biogasa za proizvodnju ove količine energije (scenario S5) pri različitim stepenima energetske efikasnosti u proizvodnji električne energije iz biogasa, μe , su određene i predstavljene u tabeli 6.7.

Tabela 6.7. Potrebna minimalna i maksimalna zapremina biogasa za proizvodnju 616 miliona kWh pri različitim stepenima energetske efikasnosti u proizvodnji električne energije iz biogasa (μe)

μe (%)	V biogasa (milion m ³)
25	max 410.64
45	min 228.13

Masa kolubarskog lignita potrebna za proizvodnju 616 miliona kWh/god, scenario (S6), određena je na osnovu jednačine (42) i iznosila je 840 kt. Zapremina prirodnog gasa potrebna za proizvodnju 616 miliona kWh/god određena je iz jednačine (43) i bila je 123.2 miliona m³ (Cvetkovic i saradnici, 2015c). Imajući na umu da se u kolubarskim

rudnicima proizvodi oko 30 miliona tona uglja (Milisavljevic i saradnici, 2009), može se zaključiti da se korišćenjem biogasa za proizvodnju električne energije može uštedeti oko 2.8% godišnje proizvodnje lignita iz ovog basena. Ako se pretpostave investicije (3,300\$/kW-5,000\$/kW) (IEA ETSAP, 2010), potrebne za dostizanje 80 MW_e instalisane snage iz biogasa, može se izvesti gruba procena da su potrebna investiciona ulaganja između 264 i 400 miliona dolara do 2030. godine.

Koristeći jednačine (40) i (41) i donju toplotnu moć metana, može se u podscenariju (**S5a**), izračunati zapremina i energija biogasa, potrebni za: proizvodnju električne energije u biogas postrojenjima snage 64 MW sa energetsom efikasnošću od 45% (gasni motori); proizvodnju električne energije u biogas postrojenjima snage 8 MW sa energetsom efikasnošću od 55% (gorivne ćelije) i proizvodnju električne energije u biogas postrojenjima snage 8 MW sa energetsom efikasnošću od 40%, koja respektivno iznosi 94.1 kten, 9.62 kten i 13.23 kten.

Dobijeni podaci ukazuju da se za proizvodnju energije iz ovih biogasnih postrojenja troši 116.96 kten potencijala biogasa što je 11.5% od ukupnog potencijala za proizvodnju biogasa u Republici Srbiji (Cvetkovic i saradnici, 2014).

Iz jednačina (40) i (41) i donje toplotne moći metana može se u podscenariju (**S5b**) izračunati potrebna zapremina i potencijal biogasa potrebni za proizvodnju električne energije: u biogas postrojenjima snage 56 MW koja kao sirovinu koriste poljoprivrednu biomasu; u biogas postrojenjima snage 16 MW koja kao sirovinu koriste komunalni otpad i u biogas postrojenjima snage 8 MW koja kao sirovinu koriste otpadne vode iz prehrambene industrije, koja respektivno iznosi 82.4 kten, 23.54 kten i 11.77 kten. Dobijeni podaci ukazuju da se za proizvodnju električne energije iz ovih biogasnih postrojenja troši 117.71 kten potencijala biogasa što je 11.7% od ukupnog potencijala biogasa (Cvetkovic i saradnici, 2014).

Određene vrednosti za emisiju polutanata u svakom od scenarija (Cvetkovic i saradnici, 2015c) date su u tabeli 6.8. Podaci iz tabele 6.8 pokazuju da je u sva tri scenarija dominantna emisija ugljen-dioksida u atmosferu u odnosu na druge efluente. Emisija ugljen-dioksida iz kolubarskog lignita je najveća i za 502.7 kt veća nego emisija ugljen-

dioksida iz prirodnog gasa u (S7). Emisija ugljen-dioksida iz biogasnih postrojenja u (S5) je 4.5-8 puta manja od emisije ugljen-dioksida u (S6).

Tablela 6.8 Ukupna emisija po scenarijima

Polutant	(S5)		(S6)	(S7)
	$\mu e=0.25$	$\mu e=0.45$		
CO ₂	165.86 kt	92.55 kt	739.2 kt	236.54 kt
NO _x	106.43 t	59.39 t	383.64 t	295.68 t
N ₂ O	9.756 t	5.44 t	21.25 t	1.26 t
SO ₂	48.78 t	27.22 t	1.77 kt	1.18 t
čestice	33.70 t	18.8 t	492.8 t	14.98 t
CH ₄	3,570 t	2,000 t	144.4 t	4.53 t

Analiza ovih emisija je vrlo značajna, imajući u vidu činjenicu da je ugljen-dioksid gas sa efektom staklene bašte i doprinosi efektima globalnog zagrevanja.

Emisije ukupnih azotnih oksida (tabela 6.8) ukazuju takođe da je najveća emisija iz postrojenja koje koristi kolubarski lignit. Emisija iz ovog postrojenja je 3.66-6.45 puta veća nego emisija azotnih oksida iz postrojenja koja koriste biogas kao energent (što zavisi od stepena enegetske efikasnosti u proizvodnji električne energije iz biogasa). Emisija azotnih oksida je 2.78-5 puta manja u (S5) nego emisija iz postrojenja koje koristi prirodni gas (S7).

Emisija N₂O (tabela 6.8) je daleko manja u odnosu na ukupnu emisiju azotnih oksida u (S6), kada se kao energent koristi lignit i iznosi 5.54% od ukupne emisije azotnih oksida. Emisija N₂O je u slučaju korišćenja biogasa kao energenta (S5) 4.32 -7.73 puta veća nego emisija N₂O u slučaju da se kao energent koristi prirodni gas (S7).

Na osnovu rezultata proračuna emisije sumpor dioksida (tabela 6.8) u posmatranim scenarijima zaključeno je da korišćenjem kolubarskog lignita nastaje najveća emisija sumpor dioksida (S6), koja je 36.3-65 puta veća nego emisija kada se kao energent koristi biogas (S5). Emisija sumpor dioksida u (S5) je 23.1- 41.34 puta veća nego kada se kao energent koristi prirodni gas (S7). Ovo se može objasniti većom koncentracijom sumpora u formi vodonik sulfida kod biogasa, koji doprinosi nastanku sumpor dioksida prilikom sagorevanja biogasa.

Emisija čestica (tabela 6.8) najveća je u (S6). Sagorevanjem kolubarskog lignita stvaraju se nesagorele čestice goriva i pepeo. Visok sadržaj pepela u kolubarskom lignitu doprinosi velikoj emisiji čestica u poređenju sa ostalim scenarijima. Vrednost emisije u scenariju (S6) je 14.62-26.21 puta veća nego emisija čestica u scenariju (S5), gde se kao energent koristi biogas. Ako se porede emisije čestica gde se kao energenti koriste biogas i prirodni gas može se zaključiti da se radi o emisiji istog reda veličine, gde razlike mogu poticati od tehnologije sagorevanja biogasa ili prirodnog gasa.

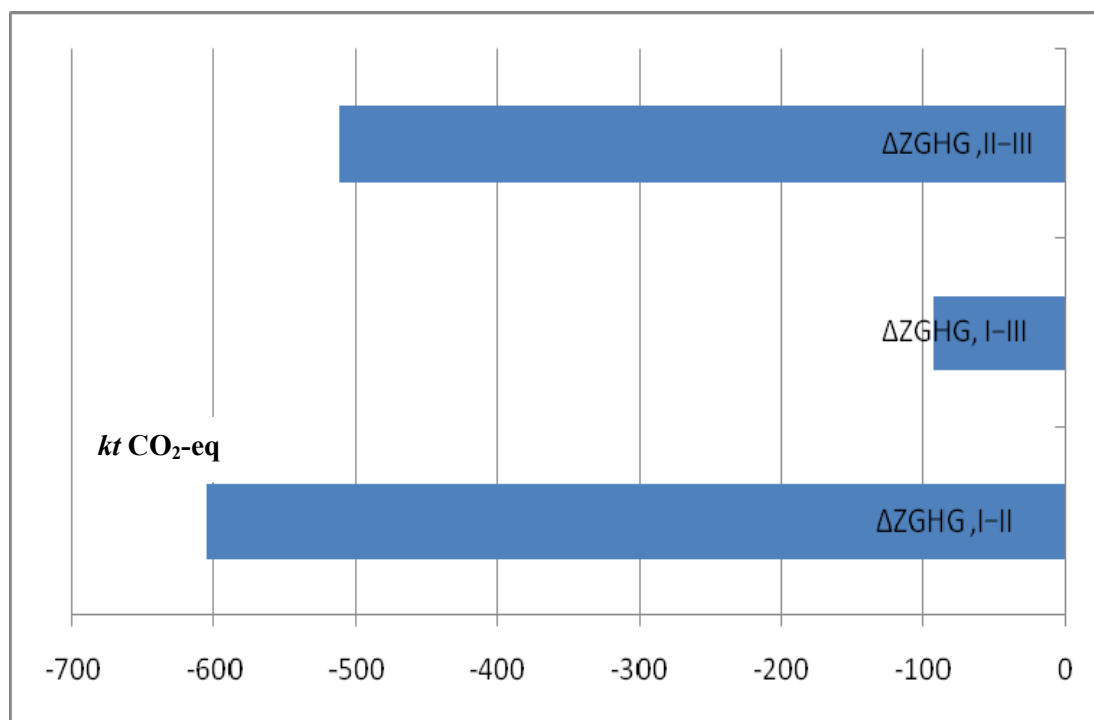
Ekvivalentna emisija GHG gasova (CH₄ i N₂O) u svakom od scenarija prikazana je u tabeli 6.9. Ekvivalentna emisija GHG gasova za CO₂ ista je kao i emisija CO₂ u svakom scenariju.

Tabela 6.9 Ekvivalentna emisija GHG gasova u svakom od scenarija

	Scenario (S5) ($\mu e=0.25$) (kt) CO₂-eq	Scenario (S5) ($\mu e=0.45$) (kt) CO₂-eq	Scenario (S6) (kt) CO₂-eq	Scenario (S7) (kt) CO₂-eq
CO₂	165.86	92.55	739.2	236.54
CH₄	89.25	50	3.61	0.113
N₂O	2.9	1.62	6.33	0.375
Ukupno	258.01	144.17	749.14	237.028

Ukupna ekvivalentna emisija GHG gasova u (S5), pri stepenu energetske efikasnosti u proizvodnji električne energije, $\mu e=0.25$, iznosila je 258 kt CO₂-eq, dok je u istom scenariju (S5), pri stepenu energetske efikasnosti u proizvodnji električne energije, $\mu e=0.45$, iznosila 144.17 kt CO₂-eq. Ukupne emisije GHG gasova u (S6) i (S7) iznosile su 749.14 kt CO₂-eq i 237.03 kt CO₂-eq, respektivno. U scenariju (S5), emisija GHG gasova koja potiče od N₂O u odnosu na druga dva gasa sa efektom staklene bašte (CO₂ i CH₄) je zanemarljiva. U scenarijima (S6) i (S7), dominantan je uticaj ugljen-dioksida na emisiju GHG gasova, dok je emisija GHG vezana za CH₄ i N₂O minimalna. Neto GHG emisija u posmatranim scenarijima prikazana je na slici 6.4.

Podaci sa slike 6.4 pokazuju da se najveća ušteda GHG emisije ostvaruje u slučaju kada se poredi scenario (S5), gde je $\mu e=0.45$ i scenario (S6) i ona iznosi 605 kt CO₂-eq. Godišnja emisija GHG gasova iz elektro-energetskog sektora iznosila je u 2010. godini 28.96 Mt CO₂-eq (SuDES project, 2012), što znači da bi proizvodnja električne energije iz biogasa (S5) dovela do uštede od 1.7%-2% ukupne emisije iz elektro-energetskog sektora u 2010. godini.



Slika 6.4 Neto GHG emisija (kt CO₂-eq) u posmatranim scenarijima

Rezultati sa slike 6.4 ukazuju veliku uštedu emisije GHG gasova i u slučaju proizvodnje električne energije iz prirodnog gasa u odnosu na kolubarski lignit (poređenje scenarija (S7) i scenarija (S6)) u iznosu od 512.11 kt CO₂ eq, kao i na neto uštedu GHG emisije od 92.83 kt CO₂ eq, kada se poredi scenario (S5), gde je $\mu e=0.45$ i scenario (S7).

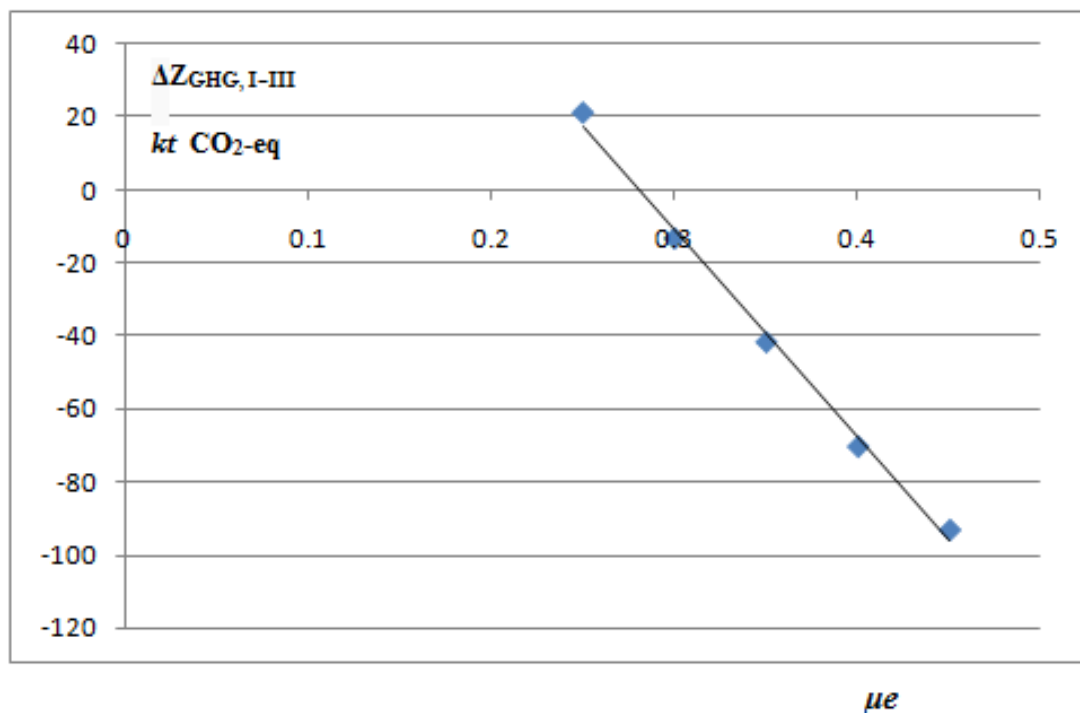
Specifične neto GHG emisije gasova, izražene kao kg CO₂-eq/kWh proizvedene električne energije u ovom radu iznose 791 g/kWh za poređenje scenarija (S5), ($\mu e=0.25$) i scenarija (S6); 982 g/kWh za poređenje scenarija (S5) ($\mu e=0.45$) i scenarija (S6); 150 g/kWh u poređenju scenarija (S5) i (S7); kao i 831.3 g/kWh u poređenju (S6) i scenarija (S7). Dobijene vrednosti pokazuju odlično slaganje sa rezultatima koji su dobili (Bachmaier i saradnici, 2010) u svojim istraživanjima (573–910 g CO₂-eq/kWhel), kao i (Cuéllar i Webber, 2008) (366-685 g/kWhel).

Podaci iz tabele 6.9 ukazuju da je specifična GHG emisija iz biogasnih postrojenja iznosila 0.23-0.42 kg CO₂-eq /kWh, što pokazuje dobro slaganje sa rezultatima (0.1-0.4 kg CO₂-eq /kWh) u istraživanju (Aurich i saradnici, 2012). Vrednost (0.23 kg CO₂-eq /kWh) dobijena za specifičnu GHG emisiju iz biogasnog postrojenja za ($\mu e=0.45$), niža je od vrednosti specifične GHG emisije iz postrojenja na prirodni gas (0.38 kg CO₂-eq/kWh), dok je vrednost (0.42 kg CO₂-eq /kWh) za specifičnu GHG emisiju iz biogasnog postrojenja za ($\mu e=0.25$), veća od vrednosti specifične GHG emisije iz postrojenja na prirodni gas.

Može se zapaziti da gubitak metana (tabela 6.8) u procesu anaerobne digestije (S5) značajno učestvuje u emisiji gasova sa efektom staklene bašte. Pretpostavljeni gubitak biogasa u ovom radu od 2%, znači emisiju 2.75 i 4.93 miliona m³ metana u životnu sredinu u zavisnosti od μe , što predstavlja štetnu emisiju u okolinu imajući u vidu efekte metana koji dovode do klimatskih promena.

Koristeći različite vrednosti energetske efikasnosti u opsegu od 0.25 do 0.45, jednačine (41), (44) - (46) i (48), tabelu 5.7 i vrednosti ekvivalentnih GHG emisija u (S7) iz tabele 6.9, može se prikazati $\Delta Z_{GHG, I-III}$ u funkciji energetske efikasnosti (slika 6.5).

Sa slike 6.5 može se konstatovati da se za efikasnost proizvodnje električne energije iz biogasa veću od 0.28, dobija ušteda emisije gasova sa efektom staklene bašte, prilikom poređenja (S5) i (S7) scenarija.



Slika 6.5 $\Delta Z_{GHG, I-III}$ u funkciji energetske efikasnosti u proizvodnji električne energije iz biogasa (2% gubitak metana tokom anaerobne digestije)

U ovom istraživanju korišćene su pretpostavke u izboru podataka i korišćenim jednačinama, koje mogu dovesti do izvesnog stepena nesigurnosti u dobijenim rezultatima. Ove se pretpostavke prvenstveno odnose na sastav biogasa, stepen efikasnosti u transformaciji energije, prosečnoj emisiji iz biogasnih postrojenja i proceni emisije iz energetskih postrojenja koja koriste kolubarski lignit i prirodni gas, kao i na razvoj novih, efikasnijih tehnologija za korišćenje biogasa, lignita i prirodnog gasa koje se mogu pojaviti do 2030. godine.

7. ZAKLJUČAK

U okviru ove doktorske disertacije proučavan je potencijal za proizvodnju biogasa u Republici Srbiji iz različitih izvora, kao i dalje korišćenje proračunatih potencijala u energetsom sistemu Republike Srbije. Proučavani su takođe energetski tokovi u životnom ciklusu upotrebe biogasa i izvršena je analiza emisija u životnu sredinu pri proizvodnji električne energije iz biogasa u odnosu na referentne fosilne izvore energije (kolubarski lignit i prirodni gas). Najvažniji naučni doprinosi dobijeni iz ove doktorske disertaciji su:

- Razvijena je metodologija za određivanje potencijala za proizvodnju biogasa u Republici Srbiji iz najznačajnijih resursa (poljoprivrednih useva proizvedenih na zemljištu namenjenom u energetske svrhe, otpadnih tokova iz stočarstva, komunalnog otpada, otpada iz industrije prerade mesa i otpadnih voda industrije mleka)

Rezultati primenjene metodologije pokazali su da je ukupni godišnji potencijal za proizvodnju biogasa iz ovih izvora u Republici Srbiji 1,937.6 miliona m^3_{N} , dok su pojedinačni potencijali za proizvodnju biogasa: iz poljoprivrednih useva proizvedenih na zemljištu namenjenom u energetske svrhe 1,635.8 miliona $\text{m}^3/\text{godišnje}$; iz otpadnih tokova u stočarstvu 180.9 miliona $\text{m}^3/\text{godišnje}$; iz komunalnog otpada 95.6 miliona

m³/godišnje; iz otpada industrije prerade mesa 19.1 miliona m³/godišnje; iz otpadnih voda industrije prerade mleka 6.2 miliona m³/godišnje.

- Uspostavljena je metodologija za dalje korišćenje proračunatih potencijala za proizvodnju biogasa u energetsom sistemu Republike Srbije na osnovu prikazanih bilansa.

Na osnovu razvijene metodologije, dalje sprovedena analiza korišćenja proračunatih potencijala za proizvodnju biogasa, pokazala je da bi se prilikom dostizanja pretpostavljenog cilja u energetsom sektoru Srbije (da se 2% finalne električne energije proizvede iz biogasa, da se 1% finalne energije u saobraćaju dobije korišćenjem biogasa kao goriva i da se 1% finalne toplotne energije proizvede iz biogasa), utrošilo između 14.48% i 16.5% od ukupno proračunatog potencijala za proizvodnju biogasa u Republici Srbiji.

- Razvijen je model analize energetske tokova i određivanja energetske efikasnosti u životnom ciklusu biogasnog postrojenja, prilikom primene biogasa u proizvodnji toplotne energije, kogenerativnom procesu, saobraćaju i proizvodnji biovodonika.

Sprovedena analiza energetske tokova u životnom ciklusu biogasnog postrojenja na osnovu upostavljenog modela, pokazala je da primena biogasa u scenarijima (proizvodnje toplotne energije, kogenerativnom procesu i saobraćaju) ima pozitivan energetski bilans, što ove procese čini održivim sa energetskeg aspekta. Rezultat scenarija u kome se biogas koristi u proizvodnji biovodonika reformingom vodenom parom, pokazuje da ovaj scenario ima negativan energetski bilans, uzrokovan velikom potrošnjom energije za ostvarivanje temperature hemijske reakcije reforminga vodenom parom i ovaj scenario dominantno koristi fosilne izvore. Energetska efikasnost ima najveću vrednost (6.74) u scenariju gde se biogas koristi u kogeneraciji, dok je najniža vrednost (0.74) energetske efikasnosti u scenariju gde se biogas koristi za proizvodnju biovodonika reformingom vodenom parom. Rezultati ove analize zasnivaju se na

primarnim podacima sa realnog biogas postrojenja i omogućavaju da se prošire postojeće baze podataka za dalju energetska analizu biogasnih postrojenja.

- Razvijen je model za ocenu emisije u životnu sredinu i za procenu uštede emisija gasova sa efektom staklene bašte pri primeni biogasa za dobijanje električne energije u odnosu na emisiju iz referentnih fosilnih sistema (na pr. prirodni gas).

Model je razvijen kroz komparativnu analizu emisija nastalih u proizvodnji električne energije iz postrojenja koja bi koristila biogas, ukupne snage od 80 MW, sa emisijama u scenarijima gde je proizvedena ista količina električne energije u postrojenjima koja bi koristila kolubarski lignit i prirodni gas. Dobijeni rezultati pokazali su da bi godišnja proizvodnja (7,700 sati) električne energije iz biogasnih postrojenja snage 80 MW rezultirala u supstituciji 840 kt kolubarskog lignita i 123.2 miliona m³ prirodnog gasa, kao i do uštede u emisiji gasova sa efektom staklene bašte između 491.1 i 605 kt CO₂-eq u odnosu na korišćenje kolubarskog lignita za proizvodnju električne energije i do uštede u emisiji gasova sa efektom staklene bašte od 92.83 kt CO₂-eq u odnosu na upotrebu prirodnog gasa za proizvodnju električne energije.

Implementacijom uspostavljenih modela i predloženih rešenja iz ove disertacije u procesu proizvodnje energije iz biogasa očekuje se smanjenje potrošnje energije posmatranih energetska sistema, poboljšanje energetske efikasnosti, povećanje korišćenja obnovljivih izvora energije, kao i smanjenje emisija zagađujućih materija u životnu sredinu.

8. LITERATURA

Abdoun, E., Weiland, P., 2009. Optimization of monofermentation from renewable raw materials by the addition of trace elements. *Bornimer Agrartechnische Berichte* 68, 69-78

AEBIOM, 2009. A biogas road map for Europe. European Biomass Association <http://www.aebiom.org/?p=231>

Ahman, M., 2010. Biomethane in the transport sector: an appraisal of the forgotten option. *Energy Policy* 38, 208–17

Akhgari, P.A., Kamalan, H., 2013. Economical – environmental evaluation of natural gas and renewable energy systems. *Int. J. Energy Res.* 37, 1550–1561

Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., Janssen, R., 2008. *Biogas Handbook*. University of Southern Denmark Esbjerg, NielsBohrsVej 9-10, DK-6700 Esbjerg, Denmark 126

Appari, S., Janardhanan, V.M., Bauri, R., Jayanti, S., Deutschmann, O., 2014. A detailed kinetic model for biogas steam reforming on Ni and catalyst deactivation due to sulfur poisoning. *Appl. Catal. A. Gen.* 471, 118–25

Arodudu, O., Ibrahim, E., Voinov, A., van Duren, I., 2014. Exploring bioenergy potentials of built-up areas based on NEG-EROEI indicators. *Ecol. Indic.* 47, 67-79

Aurich, M.A., Schattauer, A., Hellebrand, H.J., Klauss, H., Plösch, M., Berg, W., 2012. Impact of uncertainties on greenhouse gas mitigation potential of biogas production from agricultural resources. *Renew. Energy* 37, 277–284

Bacenetti, J., Negri, M., Fiala, M., González-Garsía, S., 2013. Anaerobic digestion of different feedstocks: Impact on energetic and environmental balances of biogas process. *Sci. Total Environ.* 463–464, 541–51

Bachmaier, J., Effenberger, M., Gronauer, A., 2010. Greenhouse gas balance and resource demand of biogas plants in agriculture. *Eng. Life Sci.* 6, 560–569

Baldwin, S., Lau, A., Wang, M., 2009. Development of a Calculator for the Techno-economic Assessment of Anaerobic Digestion Systems. [pdf] Vancouver: Chemical and Biological Engineering University of British Columbia.: [http://www.biomass.ubc.ca/IBSAL/AD % 20Calculator%20 Project%20- %20Final%20 Report.pdf](http://www.biomass.ubc.ca/IBSAL/AD%20Calculator%20Project%20-%20Final%20Report.pdf)

Banks, C.J., Chesshire, M., Heaven, S., Arnold, R., 2011. Anaerobic digestion of sources segregated domestic food waste: performance assessment by mass and energy balance. *Bioresour. Technol.* 102, 612–20

Becker, C., Döhler, H., Eckel, H., Fröba, N., Georgieva, T., Grube, J., Hartmann, S., Hauptmann, A., Jäger, P., Klages, S., Krötzsch, S., Sauer, N., Nakaki, S., Niebaum, A., Roth, U., Wirth, B., Wulf, S., Xin, Y., 2007. Empirical values for biogas. 1st ed. Germany: Darmstadt.

Beil, M., Hoffstede, U., 2010. Guidelines for the implementation and operation of biogas upgrading systems, Biogasmax EU project

Berglund, M., Börjesson, P., 2006. Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production. *Biomass Bioenergy* 30, 254–66

Bio fuel cells, 2000. Anaerobic Digestion Applications - The Use of Pig Slurry. <http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/99-00/bio_fuel_cells/groupproject/library/applications/pageframe.htm

Biogas Renewable Energy, 2015. Information website on biogas. http://www.biogas-renewable-energy.info/biogas_composition.html

Bischoff, M., 2009. Erkenntnisse beim Einsatz von Zusatz- und Hilfsstoffen sowie von Spurenelementen in Biogasanlagen. *VDI-Ber* 2057, 111–123

Bitir, I., Tazerout, M., Le Corre, O., 2002. Optimal Use of the Generated Biogas from Manure. Paper No. 387-395 in Proceedings of the World Congress of Computers in Agriculture and Natural Resources (13-15 March 2002). ASAE Publication No.701P0301

-
- Blengini, G.A., Brizio, E., Cibrario, M., Genon, G., 2011. LCA of bioenergy chains in Piedmont (Italy): A case study to support public decision makers towards sustainability. *Resour. Conserv. Recycl.* 57, 36-47
- 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. *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 3, 617-24
- Braga, B.L., Silveira, L.J., da Silva, M.E., Tuna, C.E., Machin, E.B, Pedroso, D.T., 2013. Hydrogen production by biogas steam reforming: A technical, economic and ecological analysis. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 28, 166-173
- Bravo, Y., Carvalho, M., Serra, L.M., Monné, C., Alonso, S., Moreno, F., Muñoz, M., 2012. Environmental evaluation of dish-Stirling technology for power generation. *Sol. Energ.* 86, 2811-25
- Brynolf, S., Fridell, E., Andersson, K., 2014. Environmental assessment of marine fuels: liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol. *J. Cleaner Prod.* 74, 86-95
- Budzianowski, W.M., 2012. Sustainable biogas energy in Poland: Prospects and challenges. *Renew. Sust. Energy Rev.* 16, 342-9
- Cao, Y., Pawlowski, A., 2012. Sewage sludge-to-energy approaches based on anaerobic digestion and pyrolysis: brief overview and energy efficiency assessment. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 1657-65
- Capponi, S., Fazio, S., Barbanti, L., 2012. CO₂ savings affect the break-even distance of feedstock supply and digestate placement in biogas production. *Renew. Energy* 37, 45-52
- Chaubey, R., Sahu, S., James, O., Maity, S., 2013. A review on development of industrial processes and emerging techniques for production of hydrogen from renewable and sustainable sources. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 23, 443-62
- Chen, Y., Hu, W., Feng, Y., Sandra, S., 2014. Status and prospects of rural biogas development in China. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 39, 679-685
- Cherubini, F., Birda, N., Cowie, A., Jungmeier, G., Schlamadinger, B., Woess-Gallasch S., 2009. Energy and greenhouse gas based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resour. Conserv. Recycl.* 53(8), 434-447
- Cherubini, F., Strømman, A.H., 2011. Life cycle assessment of bioenergy systems: state of the art and future challenges. *Bioresour. Technol.* 102 (2), 437-51

-
- Coskun, C., Akyuz, E., Oktay, Z., Dincer, I., 2011. Energy analysis of hydrogen production using biogas-based electricity. *Int. J. Hydrogen Energy* 36 (17), 11418–24
- Coskun, C., Bayraktar, M., Oktay, Z., Dincer, I., 2012. Investigation of biogas and hydrogen production from waste water of milk-processing industry in Turkey. *Int. J. Hydrogen Energy* 37, 16498-504
- Cristian, O., 2010. Characteristics of the untreated wastewater produced by food industry. University of Oradea-Faculty of Environmental Protection
- Crolla, A., Kinsley, C., 2011. Background on Anaerobic Digestion at the Farm. [pdf] Ontario: Ontario Rural Wastewater Centre, Université de Guelph-Campus d'Alfred http://www.uoguelph.ca/orwc/Research/documents/InfoSheet_AD%20Basics.pdf
- Cropgen 2007a. Cropgen, University of Vienna, 2007. An overall energy balance for energy production taking into account energy inputs associated with farming
- Cropgen 2007b. Cropgen, University of Vienna, 2007. Life cycle energy balance on a number of crop species
- Cuélar, A.D., Webber, M.E., 2008. Cow power: the energy and emissions benefits of converting manure to biogas. *Environ. Res. Lett.* doi:10.1088/1748-9326/3/3/034002
- Cvetkovic, S., Radoičić, T.K., Vukadinović, B., Kijevčanin, M., 2014. Potentials and status of biogas as energy source in the Republic of Serbia. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 31, 407-416
- Cvetkovic, S., Kaluđerović Radoičić, T., Kijevčanin, M., 2015a. Perspective of using biogas in Serbia in European context. *Energy Sources Part B* in press doi 10.1080/15567249.2015.1136973
- Cvetkovic, S., Kaluđerović Radoičić, T., Vukadinović, B., Kijevčanin, M., 2015b. A life cycle energy assessment for biogas energy in Serbia. *Energy Sources Part A* in press doi 10.1080/15567036.2015.1135207
- Cvetkovic, S., Kaluđerović Radoičić, T., Kragic, R., Kijevčanin, M., 2015c. Electricity production from biogas in Serbia-assessment of emissions reduction. *Therm. Science* doi 10.2298/TSCI150812189C
- Davidsson, A., la Cour, J., Appelqvist, B., Gruvberger, C., Hallm, M., 2007. Anaerobic digestion potential of urban organic waste: a case study in Malmö. *Waste Manage. Res.* 25, 162–169

Davis, S., Teixeira, A.K., DeLucia, E., 2009. Life-cycle analysis and the ecology of biofuels. *Trends Plant Sci.* 14, 140-6

Dennis, A., Burke, P.E., 2001. *Dairy Waste Anaerobic Digestion Handbook*. Environmental Energy Company, 6007 Hill St., Olympia, WA 98516, USA. 57

Dinkloh, L., 2009. Maximizing Biogas Production Technical and Biological Challenges, European Biomethane Fuel Conference, Goteborg

Dirkse, E.H.M., 2009. Biogas upgrading using the DMT Carborex® PWS Technology, www.dirkseilieuetechniek.com/dmt/do/download/_/true/210370/Biogas_upgrading_using_the_DMT_Carborex_PWS_Technology._2009.pdf

Djomo, S.N., Blumberga, D., 2011. Comparative life cycle assessment of three biohydrogen pathways. *Bioresour. Technol.* 102, 2684–2694

Donoso-Bravo, A., Retamal, C., Carballa, M., Ruiz-Filippi, G., Chamy, R., 2009. Influence of Temperature on the Hydrolysis, Acidogenesis and Methanogenesis in Mesophilic Anaerobic Digestion: Parameter Identification and Modeling Application. *Water Sci. Technol.* 60 (1), 9-17

Eastern Research Group, 2011. Protocol for quantifying and reporting the performance of anaerobic digestion systems for livestock manures

EEA, 2007. Estimating the environmentally compatible bioenergy potential from agriculture. EEA Technical report, No 12/2007

Effendi, A., Hellgardt, K., Zhang, Z., Yoshida, T., 2005. Optimising H₂ production from model biogas via combined steam reforming and CO shift reactions. *Fuel* 84, 869–74

EIA , 2013. <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=12251>

EMS. Natural gas http://www.ems.psu.edu/~pisupati/ACSO Outreach/Natural_Gas.html

EPA, 2007. Combined Heat and Power Partnership Biomass CHP Catalogue of Technologies

EPA, 2015. https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/emission-factors_2014.pdf

EPS Zelena knjiga, 2009. Green book of Elektroprivreda Srbije, 2009. Belgrade

Eric, M., Marković, Z., Spasojević, V., Stefanović, P., Cvetinović, D., Škobalj, P., 2012. Carbon Dioxide Emission From Thermal Power Plant Nikola Tesla A, International Conference On Power Plants, Power Plants 2012, 1303-1312

EU BAT, 2006. European Commission, Reference Document on Best Available Techniques in the Food, Drink and Milk Industries

EURELECTRIC, 2003. Efficiency in Electricity Generation, EURELECTRIC, July 2003. www.eurelectric.org/Download/Download.aspx?

EUROOBSERV'ER, 2014. Biogas Barometer 2014

Feed in tarife, 2013. Regulation on requirements for obtaining the status of the privileged electric power producer. Official Gazette of the Republic of Serbia, No. 8/13

Frankiewicz, T., 2014. Summary and Status of NAMAs in Solid Waste Sector, Global Methane Initiative. Florianopolis, Brazil, 13 March 2014

Friedmann, H., Kube, J., 2008. Optimierung der Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen durch den Einsatz von Mikronährstoffen– ein Erfahrungsbericht. In: Tagungsband 17. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas, Nürnberg, 125–130

Frijns, J., Hofman, J., Nederlof, M., 2013. The potential of (waste)water as energy carrier. *Energ. Convers. Manage.* 65, 357–63

Fuchsz, M., Kohlheb, N., 2015. Comparison of the environmental effects of manure- and crop-based agricultural biogas plants using life cycle analysis. *J. Cleaner Prod.* 86, 60-66

Galvagno, A., Chiodo, V., Urbani, F., Freni, F., 2013. Biogas as hydrogen source for fuel cell applications. *Int. J. Hydrogen Energy* 38, 3913-3920

Gerin, P.A., Vliegen, F., Jossart, J.M., 2008. Energy and CO₂ balance of maize and grass as energy crops for anaerobic digestion. *Bioresour. Technol.* 99, 2620–27

González-García, S., Bacenetti, J., Negri, M., Fiala, M., Arroja, L., 2013. Comparative environmental performance of three different annual energy crops for biogas production in Northern Italy. *J. Cleaner Prod.* 43, 71-83

Goulding, D., Power, N., 2013. Which is the preferable biogas utilisation technology for anaerobic digestion of agricultural crops in Ireland: Biogas to CHP or biomethane as a transport fuel? *Renew. Energy* 53, 121-131

Guo Guo, L., 2010. Potential of biogas production from livestock manure in China. Master's thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden

Hahn, H., Hartmann, K., Bühle, L., Wachendorf, M., 2015. Comparative life cycle assessment of biogas plant configurations for a demand oriented biogas supply for flexible power generation. *Bioresour. Technol.* 179, 348–358

-
- Hajjaji, N., Martinez, S., Trably, E., Steyer, J.P., Helia, A., 2016. Life cycle assessment of hydrogen production from biogas reforming. *Int. J. Hydrogen Energy* 41, 6064 -6075
- Hall, C.A.S., Balogh, S., Murphy, D.J.R., 2009. What is the minimum EROI that a sustainable society must have? *Energies* 2 (1), 25–47
- Havukainen, J.V., Uusitalo, V., Niskanen, A., Kapustina, V., Horttanai, M., 2014. Evaluation of methods for estimating energy performance of biogas production. *Renew. Energy* 66, 232-240
- Hejnfelt, A., Angelidaki, I., 2009. Anaerobic digestion of slaughterhouse by-products. *Biomass Bioenergy* 33, 1046–54
- Hennig, C., Gawor, M., 2012. Bioenergy production and use: Comparative analysis of the economic and environmental effects. *Energ. Convers. Manage.* 63, 130–137
- Höhn, J., Lehtonen, E., Rasi, S., Rintala, J., 2014. A Geographical Information System (GIS) based methodology for determination of potential biomasses and sites for biogas plants in southern Finland. *Appl. Energy* 113, 1–10
- Huangfu, Y., Wu, J.Y., Wang, R.Z., Xia, Z.Z., 2007. Experimental investigation of adsorption chiller for micro-scale chp system application. *Energy Build.* 39 (2), 120–127
- Huopana, T., Song, H., Kolehmainen, M., and Niska, H., 2013. A regional model for sustainable biogas electricity production: A case study from a Finnish province. *Appl. Energy* 102, 676–686
- IEA ETSAP, 2010. Biomass for Heat and Power, 2010. IEA ETSAP - Technology Brief E05 www.etsap.org
- IEA, 2013. Bioenergy Task 37 – Plant list <www.iea-biogas.net/_content/plant-list/plant-list.html>
- Intelligent Energy, 2012. Europe programme, 2012. Biogas to biomethane technology review. Vienna University of Technology; Vienna
- IPCC Assessment Report 3, 2007. <http://ipcc.ch/>
- IPCC vodič, 2006. Intergovernmental Panel on Climate Change, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories
- ISO 14044, 2006. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. International Organization for Standardization

ISO 14040, 2006. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. International Organization for Standardization

Ito, O., 2011. Emissions from coal fired power Generation-Energy Technology Policy Division International Energy Agency Workshop on IEA High Efficiency, Low Emissions Coal Technology Roadmap, New Delhi

Izquierdo, U., Barrio, V.L., Lago, N., Requies, J., Cambra, J.F., Güemez, M.B, 2012. Biogas steam and oxidative reforming processes for synthesis gas and hydrogen production in conventional and microreactor reaction systems. *Int. J. Hydrogen Energy* 37, 13829-42

Jarvis, A., Nordberg, A., Jarlsvik, T., Mathisen, B., Svensson, B.H., 1997. Improvement of a grass-clover silage-fed biogas process by the addition of cobalt. *Biomass Bioenergy* 12, 453–460

Jin, Y., Chen, T., Chen, X., Zhixin, Y., 2015. Life-cycle assessment of energy consumption and environmental impact of an integrated food waste-based biogas plant. *Appl. Energy* 151, 227-236

Jovanovic, V.V., Komatina, M.S., 2012. NO_x and SO₂ emission factors for serbian lignite Kolubara. *Therm. Sci.* 16, 1213-1228

Kaltschmitt, M., Hartmann, H., 2001. *Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York

Kaparaju, P., Rintala, J., 2011. Mitigation of greenhouse gas emissions by adopting anaerobic digestion technology on dairy, sow and pig farms in Finland. *Renew. Energy* 36, 31-41

Kossmann, W., Pönitz, U., Habermehl, S., Hoerz, T., Krämer, P., Klingler, B., Kellner, C., Wittur, T., v. Klopotek, F., Krieg, A., Euler, H., 1999. *Biogas Digest*. Volume I and II. German Agency for Technical Cooperation (GTZ), Germany

Kratzeisen, M., Starcevic, N., Martinov, M., Maurer, C., Mülle, J., 2010. Applicability of biogas digestate as solid fuel. *Fuel* 89, 2544-2548

KTBL, 2008. Association for Technology and Structures in Agriculture. Diesel fuel consumption during agricultural processes

KTBL, 2009. Association for Technology and Structures in Agriculture (KTBL). Business planning agriculture 2008/09 – data for business planning in agriculture. Germany: Darmstadt

Laaber, M., Madlener, R., Kirchmayr, R., Braun, R., 2007. Aufbau eines Bewertungssystems für Biogasanlagen Gütesiegel Biogas

Lantz, M., 2012. The economic performance of combined heat and power from biogas produced from manure in Sweden – A comparison of different CHP technologies. Appl. Energy 98, 502-511

Lau, C.S., Tsolakis, A., Wyszynski, M.L., 2011. Biogas upgrade to syn-gas (H₂-CO) via dry and oxidative reforming. Int. J. Hydrogen Energy 36, 397–404

Lehtomäki, A., 2006. Biogas Production from Energy Crops and Crop Residues. [pdf] JYVÄSKYLÄ: University of JYVÄSKYLÄ .
<https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/13152/9513925595.pdf?sequence>

Lfu, 2007. Biogashandbuch Bayern. Materialband. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, Germany

Liebetrau, J., Clemens, J., Cuhls, C., Hafermann, C., Friehe, J., Weiland, P., Daniel-Gromke, J., 2010. Methane emissions from biogas-producing facilities within the agricultural sector. Eng. Life Sci. 6, 595–599

Liska, A.J., Cassman, K.G., 2008. Towards Standardization of Life-Cycle Metrics for Biofuels: Greenhouse Gas Emissions Mitigation and Net Energy Yield. J. Biobased Mater. Bioenergy 2, 187–203

Lleleji, ID-406-W. Lleleji, K. Basics of energy production through anaerobic digestion of livestock manure, Purdue University, ID-406-W

Lootsma, A., Raussen, T., 2008. Current practise for pre-treatment and utilization of digestate. Kasseler Abfall- und Bioenergieforum 2008. Germany:Witzenhausen

Lovrencec, L., 2010. Highlights of socioeconomic impacts from biogas in 28 target regions. Zagreb, Croatia: BiogasIN.
http://www.biogasin.org/files/pdf/Highlights_of_socio-economic%20issues.pdf

Maghanaki, M., Ghobadian, B., Najafi, G., Janzadeh Galogah, R., 2013. Potential of biogas production in Iran. Renew. Sustain. Energy Rev. 28, 702–714

Malça, J., Freire, F., 2011. Life-cycle studies of biodiesel in Europe: A review addressing the variability of results and modeling issues. Renew. Sustain. Energy Rev. 15 (1), 338-351

Mancarella, P., Chicco, C., 2008. Assessment of the greenhouse gas emissions from cogeneration and trigeneration systems. Part II: Analysis techniques and application cases. *Energy* 33, 418–430

Manninen, K., Koskela, S., Nupponen, A., Sorvari, J., Nevalainen, O., Siitonen, S., 2013. The applicability of the renewable energy directive calculation to assess the sustainability of biogas production. *Energy Policy* 56, 549-558

Martinov, M., Kovacs, K., Đatkov, Đ., 2012. Biogas technology, Faculty of Technical Science, Novi Sad

Milisavljevic, V., Čokorilo, V., Zlatanović, D., Milenković, J., 2009. Consumption of coal in Serbia and CO₂ emissions related to it's combustion. 14. Simpozijum Termitčara Srbije, 13 - 16. oktobar 2009, Sokobanja

Monnet, F., 2003. An Introduction to Anaerobic Digestion of Organic Wastes. [pdf] Scotland:RemadeScotland.
<http://www.biogasmax.co.uk/media/introanaerobicdigestion073323000_1011_24042007.pdf

Moreda, I.L., 2016. The potential of biogas production in Uruguay. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 54, 1580–1591

Mortimer, N.D., 1991. Energy analysis of renewable energy sources. *Energy Policy* 19 (4), 374-385

Nacionalni program poljoprivrede Srbije, 2010. Serbian National Agriculture Programme 2010-2013 (in Serbian). Official Gazette of the Republic of Serbia, No. 83/10

Nges, I.A., Liu, J., 2010. Effects of solid retention time on anaerobic digestion of dewatered-sewage sludge in mesophilic and thermophilic conditions. *Renew. Energy* 35, 2200–6

NGVA, 2008. Global statistics. www.ngva.co.uk2008

Niesner, J., Jecha, D., Stehlik, P., 2013. Biogas upgrading technologies: state of art review in European region. *Chem. Eng. Trans.* 35, 517-22

NREAP, 2013. Serbian National Renewable Energy Action Plan (NREAP) up to 2020 (in Serbian), Official Gazette of the Republic of Serbia, No. 53/13

NREL, 2013. Biogas Potential in the United States. National Renewable Energy Laboratory /<http://www.nrel.gov/docs/fy14osti/60178.pdf>

Papong, S., Rotwiroon, P., Chatchupong, T., Malakul, P., 2014. Life cycle energy and environmental assessment of bio-CNG utilization from cassava starch wastewater treatment plants in Thailand. *Renew. Energy* 65, 64–9

Patel, H. A., 2006. Anaerobic Digestion - A Renewable Energy Resource. [pdf]
Leicestershire: Leicestershire Country Council.
http://www.leics.gov.uk/supplementary_ad_report-2.pdf

Pitk, P., Kaparaju, P., Vilu, R., 2012. Methane potential of sterilized solid slaughterhouse wastes. *Bioresour. Technol.* 116, 42–6

Popławska, A.O., Matyka, M., Ryńska, E.D., 2014. Evaluation of a long-term potential for the development of agricultural biogas plants: A case study for the Lubelskie Province, Poland. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 36, 329–349

Pöschl, M., Ward, S., Owende, P., 2010. Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. *Appl. Energy* 87, 3305–21

Pöschl, M., Ward, S., Owende, P., 2012. Environmental impacts of biogas deployment – Part I: life cycle inventory for evaluation of production process emissions to air. *J. Cleaner Prod.* 24, 168–183

Prade, T., Svensson, S.E., Mattsson, J.E., 2012. Energy balances for biogas and solid biofuel production from industrial hemp. *Biomass Bioenergy* 40, 36–52

Pravilnik o animalnom otpadu, 2011. Rulebook on Classification and Management of the By-products of Animal Origin Not Intended for Human Consumption. Official Gazette of RS, No. 31/2011

Pre' Tutorial, 2006. SimaPro 7. Tutorial.

Pucker, J., Jungmeier, G., Siegl, S., Potsch, E.M., 2013. Anaerobic digestion of agricultural and other substrates –implications for greenhouse gas emissions. *Animal* 7, 283–291

Rajagopal, R., Saady, C.N.M., Torrijos, M., Thanikal, J.V., Hung, Y.T., 2013. Sustainable Agro-Food Industrial Wastewater Treatment Using High Rate Anaerobic Process. *Water* 5, 292–311

REN 21, 2014. Renewables 2014 Global Status Report

Res direktiva, 2009. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources

RGF Beograd. Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade.
<http://www.rgf.bg.ac.rs/predmet/RO/VII%20semestar/Sagorevanje/Predavanja/12Ekologija%20sagorevanja.pdf>

Rio +20. United Nations Conference on Sustainable Development, Rio de Janeiro, Brazil, June 2012

Ryckebosch, E., Drouillon, M., Vervaeren, H., 2011. Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass Bioenergy* 35, 1633-1645

Salter, A., 2007. Crops for biogas productions; yields, suitability and energy balance. In: 15th European Biomass Conference, Workshop 2–Biogas: Energy throughout the whole world, Berlin

Salter, A., Banks, C., 2009. Establishing an energy balance for crop-based digestion. *Water Sci. Technol.* 59, 1053-60

Saur, G., Milbrandt, A., 2014. Renewable Hydrogen Potential from Biogas in the United States. Technical Report NREL/TP-5400-60283. National Renewable Energy Laboratory <http://www.nrel.gov/docs/fy14osti/60283.pdf>

Scholz, L., Aurich, A.M., Kirschke, D., 2011. Greenhouse gas mitigation potential and mitigation costs of biogas production in Brandenburg Germany. *AgBioForum* 14, 133-141

Scholz, M., Melin, T., Wessling, M., 2013. Transforming biogas into biomethane using membrane technology. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 17, 199-212

Schulz, W., Heitmann, S., Hartmann, D., Manske, S., Peters-Erjawetz, S., Risse, S., Rübiger, N., Schlüter, M., Jahn, K., Ehlers, B., Havran, T., Schnober, M., 2007. Utilization of heat excess from agricultural biogas plants. Bremen (Germany):Bremer Energie Institut, Universität Bremen, Institut für Umweltverfahrenstechnik

SEPA, 2012. Report on the environmental situation in the Republic of Serbia for 2011 year (in Serbian), Serbian Environment Protection Agency, Belgrade, Republic of Serbia

Seppälä, M., Paavola, T., Lehtomäki, A., Pakarinen, O., Rintala, J., 2008. Biogas from energy crops—optimal pre-treatments and storage, co-digestion and energy balance in boreal conditions, *Water Sci. Technol.* 58, 1857-1863

SGC, 2012. Basic Data On Biogas. Malme, 2012

Shiga, H., Shinda, K., Hagiwara, K., Tsutsumi, A., Sakurai, M., Yoshida, K., 1998. Large-scale hydrogen production from biogas. *Int. J. Hydrogen Energy* 23, 631-40

Smyth, B.M., Murphy, J.D., O'Brien, C.M., 2009. What is the energy balance of grass biomethane in Ireland and other temperate northern European climates? *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13, 2349–60

Somehsaraei, H.N., Majoumerd, M.M., Breuhaus, P., Assadi, M., 2014. Performance analysis of a biogas-fueled micro gas turbine using a validated thermodynamic model. *Appl. Therm. Eng.* 66, 181-190

Sonnemann, G., Castells, F., Schumacher, M., 2003. *Integrated Life-Cycle and Risk Assessment for Industrial Processes*. 1 ed. Lewis Publishers, London

Spath, P.L., Mann, M.K., 2001. *Life Cycle Assessment of Hydrogen Production via Natural Gas Steam Reforming*. NREL Golden Colorado

Spath, P.L., Mann, M.K., Amos, W.A., 2003. *Update of Hydrogen from Biomass-Determination of the Delivered Cost of Hydrogen*. NREL Golden Colorado

Spielman, M., Dinkel, F., Schleiss, K., 2007. *Lifecycle Inventories of Bioenergy Report Number 17*. Swiss Centre for Lifecycle Inventories, Dubendorf

Starr, K., Gabarrell, X., Villalba, G., Peiro, L.T., Lombardi, L., 2014. Potential CO₂ savings through biomethane generation from municipal waste biogas. *Biomass Bioenergy* 62, 8-16

Statistika otpada, 2012. *Statistics of waste and waste management in Serbia, 2012*. Statistical Office of the Republic of Serbia

Statistika, 2013. *Statistical Yearbook, 2013*. Statistical Office of the Republic of Serbia

Stoll, R.E., von Linde, F., 2000. *Hydrogen-what are the cost? Hydrocarbon. Process*; december 2000

Strategija razvoja energetike, 2005. *Strategy of Energy Development in the Republic of Serbia until 2015*

Strategija upravljanja otpadom, 2010. *Waste Management Strategy for period 2010-2019*, Official Gazette of the Republic of Serbia, No. 29/10

Strategija, 2015. *Strategy of Energy Development in the Republic of Serbia until 2025 with projections up to 2030*

Studija Tehnički fakultet Novi Sad, 2008. Feasibility study of using municipal solid waste for energy purposes in the Autonomous Province of Vojvodina and Republic of Serbia, Faculty of Technical Science, Novi Sad

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. *Appl. Energy* 105, 17–29

SuDES project, 2012. Aspect of climate change on development of the energy sector in Serbia. IPA EU SuDES project, Belgrade

Svetska banka, 2007. World Bank, Serbia: Analysis of Policies to Increase Renewable Energy Use

Thomas, B., Wyndorps, A., 2012. Efficiencies and emissions of a 192 kWel Otto engine CHP-unit running on biogas at the research station “Unterer Lindenhof”. *Eng. Life Sci.* 12 (3), 306–312 DOI: 10.1002/elsc.201100070

Trendewicz, A., Braun, R.J., 2013. Techno-economic analysis of solid oxide fuel cell based combined heat and power systems for biogas utilization at waste water treatment facilities. *J. Power Sources* 233, 380-393

Trogisch, S., Hoffmann, J., Bertrand, L.D., 2005. Operation of molten carbonate fuel cells with different biogas sources: a challenging approach for field trials. *J. Power Sources* 145, 632–8

Tuomisto, H.L., Helenius, J., 2008. Comparison of energy and greenhouse gas balances of biogas with other transport biofuel options based on domestic agricultural biomass in Finland. *Agric. Food Sci.* 17, 240–51

Uellendahl, H., Wang, G., Møller, H., Jørgensen, U., Skiadas, I.V., Gavala, H.N., Ahring, B.K., 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

UN klima, 2010. First (Initial) National Communication of the Republic of Serbia under the United Nations Framework Convention on Climate Changes, published by Ministry of Environment and Spatial Planning, November 2010, Belgrade

Uredba o povlašćenim proizvođačima, 2013. Regulation on incentive measures for the production of electricity by using renewable energy sources and combined heat and power. *Official Gazette of the Republic of Serbia*, No. 8/13

US EPA, Natural gas. Emission factor documentation for ap-42 section 1.4 natural gas combustion, <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch01/final/c01s04.pdf>

US EPA, 2015. https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/emission-factors_2014.pdf

van der Voet, E., Lifset, R.J., Luo, L., 2010. Life-cycle assessment of biofuels, convergence and divergence. *Biofuels* 1 (3), 435-449

Vasilev, L., 2007. Solid sorption heat pumps for tri-generation. *Arch. Thermodyn.* 28 (3), 15–28

Wang, Q.H., Kuninobu, M., Ogawa, H., Kato, Y., 1999. Degradation of volatile fatty acids in highly efficient anaerobic digestion. *Biomass Bioenergy* 16, 407–416

Weiland, P., 2010. Biogas production: current state and perspectives. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 85, 849–60

Wellinger, A., Lindberg, A., 2001. Biogas Upgrading and Utilisation. IEA Bioenergy. Task 24: Energy from biological conversion of organic waste

Wendland, M., 2009. Biogasgärreste – Einsatz von Gärresten aus der Biogasproduktion als Düngemittel. Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayerne.V, Freising

WtERT, 2009. Anaerobic Digestion Process.
<http://www.wtert.eu/default.asp?Menu=13&ShowDok=12>

Wulf, C., Kaltschmitt, M., 2013. Life cycle assessment of biohydrogen production as a transportation fuel in Germany. *Bioresour. Technol.* 150, 466–475

Yang, L., Ge, X., Wan, C., Yu, F., Li, Y., 2014. Progress and perspectives in converting biogas to transportation fuels. *Renew Sustain. Energy Rev.* 40, 1133–1152

Zavod za statistiku, 2011. Popis 2011.
<http://webrzs.stat.gov.rs/WebSite/Public/PublicationView.aspx?pKey=41&pLevel=1&pubType=2&pubKey=1489>

Zhang, F., Johnson, D.M., Wang, J., 2015. Life-Cycle Energy and GHG Emissions of Forest Biomass Harvest and Transport for Biofuel Production in Michigan. *Energies* 8, 3258-3271 doi:10.3390/en8043258

Biografija autora

Mr Slobodan Cvetković rođen je 3.2.1970. godine u selu Darkovce, opština Crna Trava. Diplomirao je na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu 1996. godine. Magistarski rad pod nazivom „Ispitivanje imobilizacije ćelija aktivnog mulja u PVA čestice za tretman otpadnih voda" odbranio je 2007. godine na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu, pod mentorstvom Dr Bojane Obradović, redovnog profesora TMF-a.

Radnu karijeru započeo je 1996. godine u Industriji skroba „Jabuka" u Pančevu, a od 2008. godine, zaposlen je u Ministarstvu životne sredine, na poslovima unapređenja i primene obnovljivih izvora energije, gde je i danas angažovan kao rukovodilac Grupe za održivo korišćenje prirodnih resursa. Tokom rada u državnoj administraciji bio je angažovan na izradi strateških i zakonskih dokumenata iz oblasti obnovljivih izvora energije i zaštite životne sredine u Republici Srbiji.

U dosadašnjoj praksi rukovodio je i učestvovao u realizaciji domaćih i međunarodnih projekata iz oblasti obnovljivih izvora energije. Mr Slobodan Cvetković je sertifikovani UNIDO ekspert za čistiju proizvodnju, kao i koautor „Uputstva za procenu uticaja vetroelektrana na životnu sredinu", koje je izrađeno u okviru projekta saradnje sa Programom Ujedinjenih nacija za razvoj (UNDP) i Ministarstva životne sredine Republike Srbije.

Mr Slobodan Cvetković je autor i koautor više naučnih radova objavljenih u vodećim međunarodnim časopisima, naučnih i stručnih radova saopštenih na međunarodnim i konferencijama od nacionalnog i međunarodnog značaja. Tokom 2010. godine, usavršavao se iz oblasti obnovljivih izvora energije na Institutu za biogas (Čengdu, NR Kina) u trajanju od dva meseca, a 2013. godine proveo je tri nedelje na studijskom boravku na Institutu za energetiku i prirodne resurse „Teri" u Nju Delhiju. Član je Inženjerske komore Srbije kao odgovorni projektant tehnoloških procesa.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Слободан Цветковић

Број индекса _____

Изјављујем

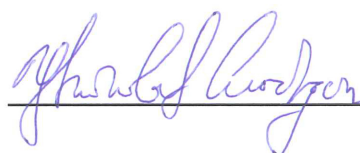
да је докторска дисертација под насловом

**МОДЕЛОВАЊЕ И ОПТИМИЗАЦИЈА ПРОЦЕСА КОРИШЋЕЊА БИОГАСА У
ПРОИЗВОДЊИ ЗЕЛЕНЕ ЕНЕРГИЈЕ**

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 25.5.2016.



Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Слободан Цветковић

Број индекса _____

Студијски програм _____

Наслов рада **МОДЕЛОВАЊЕ И ОПТИМИЗАЦИЈА ПРОЦЕСА КОРИШЋЕЊА
БИОГАСА У ПРОИЗВОДЊИ ЗЕЛЕНЕ ЕНЕРГИЈЕ**

Ментор проф.др Мирјана Кијевчанин

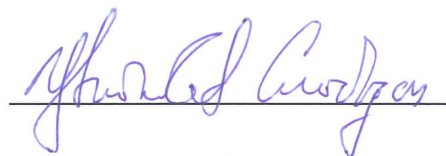
Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 25.5.2016.



Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

МОДЕЛОВАЊЕ И ОПТИМИЗАЦИЈА ПРОЦЕСА КОРИШЋЕЊА БИОГАСА У ПРОИЗВОДЊИ ЗЕЛЕНЕ ЕНЕРГИЈЕ

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
- ③ Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

У Београду, 25.5.2016.

Потпис аутора

