

# Idejni projekt bioplinskog postrojenja

---

**Kuljak, Petar**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:739838>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-18**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**IDEJNI PROJEKT BIOPLINSKOG POSTROJENJA**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Igor Wolf

Rijeka, srpanj 2022.

Petar Kuljak

0035199692

Rijeka, 12. ožujka 2021.

Zavod: Zavod za termodinamiku i energetiku  
Predmet: Obnovljivi izvori energije  
Grana: 2.11.02 procesno energetska strojarstvo

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: Petar Kuljak (0035199692)  
Studij: Diplomski sveučilišni studij strojarstva  
Modul: Termotehnika

Zadatak: Idejni projekt bioplinskog postrojenja / Preliminary Design of a Biogas Plant

### Opis zadatka:

Potrebno je izraditi idejni projekt bioplinskog postrojenja za opskrbu toplinskom i električnom energijom stambenih i gospodarskih objekata u općini veličine 3 000 stanovnika na području sjeverne Hrvatske.

Primarni cilj postrojenja jest iskoristavati biomasu koja nastaje na obližnjim farmama. Koncept kogeneracijskog postrojenja s plinskim motorom s unutrašnjim izgaranjem treba odrediti na temelju energetske-ekonomske analize, u kojoj valja utvrditi potrošnju toplinske i električne energije na području općine, odrediti odgovarajući kapacitet postrojenja, potrebnu količinu i sastav supstrata, utvrditi period povrata investicije te analizirati osjetljivost isplativosti gradnje postrojenja na promjenu ulaznih proračunskih parametara.

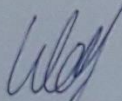
Rješenje postrojenja koje se pokaže najpovoljnijim potrebno je detaljnije obraditi, s proračunima, odabirom opreme i nacrtom dokumentacijom.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Petar Kuljak

Zadatak uručen pristupniku: 15. ožujka 2021.

Mentor:



Izv. prof. dr. sc. Igor Wolf

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Kristian Lenić

## IZJAVA

Sukladno članku 8. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam diplomski rad „Idejni projekt bioplinskog postrojenja“ pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Igora Wolfa, u razdoblju od 15. ožujka 2021. do 12. srpnja 2022. izradio samostalno.

Petar Kuljak

## Zahvala

Zahvaljujem se mentoru, izv. prof. dr. sc. Igoru Wolfu na izvrsnom vođenju i beskrajnom strpljenju tijekom izrade rada. Također se zahvaljujem zlatarbistričkim farmericama i farmerima na potrebnim podacima i sirovinama. Hvala mojoj obitelji i prijateljima na potpori.

## Sadržaj

1. UVOD .....	1
1.1. Biomasa i bioplin .....	1
1.2. Potencijal bioplina.....	5
2. ANAEROBNA DIGESTIJA.....	7
2.1. Supstrati anaerobne digestije .....	7
2.2. Biokemijski postupak anaerobne digestije.....	9
2.2.1. Hidroliza .....	9
2.2.2. Acidogeneza.....	10
2.2.3. Acetogeneza.....	10
2.2.4. Metanogeneza .....	11
2.3. Parametri anaerobne digestije .....	12
2.3.1. Temperatura procesa .....	12
2.3.2. pH-vrijednost supstrata .....	14
2.3.3. Hlapljive masne kiseline (HMK).....	14
2.3.4. Utjecaj amonijaka na proces .....	14
2.3.5. Utjecaj elemenata u tragovima.....	15
2.4. Radni parametri procesa.....	15
2.4.1. Sadržaj organske tvari u digestoru .....	15
2.4.2. Vrijeme zadržavanja supstrata u digestoru .....	15
3. POSTROJENJA ZA DOBIVANJE BIOPLINA .....	17
3.1. Poljoprivredna biopliniska postrojenja .....	17
3.1.1. Biopliniska postrojenja za obiteljska gospodarstva .....	18
3.1.2. Biopliniska postrojenja za poljoprivredna gospodarstva .....	21
3.1.3. Centralizirana biopliniska postrojenja sa zajedničkom kodigestijom.....	22
3.2. Postrojenja za obradu otpadnih voda .....	24

3.3.	Postrojenja za obradu krutog komunalnog otpada.....	25
3.4.	Industrijska postrojenja za proizvodnju bioplina.....	26
3.5.	Proizvodnja deponijskog plina.....	28
4.	ISKORIŠTAVANJE BIOPLINA.....	30
4.1.	Svojstva bioplina.....	31
4.2.	Izravno izgaranje i iskorištavanje bioplina za proizvodnju topline.....	32
4.3.	Kogeneracija toplinske i električne energije.....	33
4.3.1.	Plinski Ottovi motori.....	33
4.3.2.	Plinski dizelski motor s pilot paljenjem.....	35
4.3.3.	Stirlingov motor.....	35
4.3.4.	Bioplinske turbine.....	36
4.3.5.	Gorivni članci.....	37
4.4.	Proizvodnja biometana (dorada/pročišćavanje bioplina).....	39
4.5.	Biometan kao transportno gorivo.....	43
4.6.	Distribucija biometana putem plinske mreže.....	46
5.	UPORABA DIGESTATA.....	47
5.1.	AD tehnologija za upravljanje krutim i tekućim stajskim gnojem.....	47
5.2.	Od gnojnice do digestata i gnojiva.....	47
5.3.	Primjena digestata kao gnojiva.....	48
5.4.	Učinci primjene digestata na tlo.....	49
5.5.	Kondicioniranje digestata.....	49
6.	DIJELOVI BIOPLINSKOG POSTROJENJA.....	51
6.1.	Prihvatna jedinica.....	54
6.2.	Skladištenje sirovine.....	54
6.2.1.	Bunker silosi.....	54
6.2.2.	Spremnici (posude, tankovi) za skladištenje tekuće sirovine.....	56

6.3.	Kondicioniranje sirovine.....	56
6.4.	Sustav punjenja .....	57
6.4.1.	Transport tekuće sirovine.....	57
6.4.2.	Transport krute sirovine .....	59
6.5.	Armatura i cjevovodi .....	60
6.6.	Sustav grijanja digestora .....	60
6.7.	Digestor .....	62
6.7.1.	Digestor obročnog tipa.....	62
6.7.2.	Digestor kontinuiranog tipa .....	63
6.8.	Spremište za bioplin.....	65
6.9.	Spremište digestata .....	67
7.	<b>KONCEPT BIOPLINSKOG POSTROJENJA.....</b>	<b>68</b>
7.1.	Količina sirovine i bioplina.....	72
7.2.	Količina i sastav supstrata.....	75
7.2.1.	Dimenzioniranje spremnika za ostatke od branja kukuruza u zrnu .....	76
7.2.2.	Dimenzioniranje spremnika za gnoj .....	77
7.3.	Dimenzioniranje digestora .....	78
7.4.	Dimenzioniranje predspremnika .....	80
7.5.	Toplina potrebna za održavanje temperature procesa.....	81
7.5.1.	Toplina potrebna za zagrijavanje supstrata.....	81
7.5.2.	Toplinski gubici digestora.....	82
7.6.	Dimenzioniranje spremnika digestata .....	83
7.7.	Volumen spremnika bioplina .....	84
7.8.	Odabir motor generatora .....	87
8.	<b>EKONOMSKA ANALIZA .....</b>	<b>90</b>
8.1.	Analiza osjetljivosti.....	94



8.1.1. Pad investicijskih troškova.....	94
8.1.2. Porast referentne vrijednosti cijene otkupa električne energije .....	96
8.1.3. Pad investicijskih troškova uz $c_{RV} = 1,3$ kn/kWh .....	98
8.1.4. Porast referentne vrijednosti cijene otkupa električne energije uz 30 posto niže investicijske troškove .....	100
9. ZAKLJUČAK .....	103
LITERATURA.....	106
POPIS SLIKA .....	109
POPIS TABLICA.....	112
SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI .....	113
SUMMARY AND KEY WORDS.....	113
PRILOZI.....	114

# 1. UVOD

U trećem semestru diplomskog sveučilišnog studija jedan od kolegija bio je i Obnovljivi izvori energije. Kroz dosadašnje obrazovanje susreo sam se sa tom tematikom, no ovdje se malo dublje zagreblo u pojedini obnovljivi izvor i njegovo iskorištavanje. Pred kraj semestra na red su došli biomasa i bioplina gdje sam spoznao što se sve može iskoristiti kao biomasa za dobivanje bioplina. Kako se u Zlatar Bistrici, mjestu iz kojeg dolazim, nalazi čak 15 farmi pilića, odlučio sam potencijal svog mjesta iskoristiti za diplomski rad.

## 1.1. Biomasa i bioplina

Potreba za energijom, bilo električnom, bio toplinskom se iz dana u dan povećava. Danas se još uvijek za proizvodnju energije koriste fosilna goriva, koja spadaju u neobnovljiv izvor energije jer se njihova količina smanjuje za ljudsko poimanje vremena. Da se i ne smanjuje, njihovo izgaranje za dobivanje energije ima štetne učinke za atmosferu i klimatske promijene, stoga je vrlo važno promicanje svijesti o obnovljivim izvorima energije i težnja ka njihovoj što većoj implementaciji u svakodnevni život. Najpoznatiji obnovljivi izvori energije su sunčeva energija, energija vjetra, vodne snage (energija vodotokova, morskih struja, valova, plime i oseke) te biomasa.

Pod biomasu spada biorazgradiv dio proizvoda, otpada i ostataka biološkog podrijetla iz poljoprivrede, uključujući tvari biljnog i životinjskog podrijetla, iz šumarstva i s njima povezanih proizvodnih djelatnosti, uključujući ribarstvo i akvakulturu, te biorazgradiv dio otpada, uključujući industrijski i komunalni otpad biološkog podrijetla [1]. Biomasa se može podijeliti na:

- drvenu biomasu,
- biomasu iz otpada,
- poljoprivrednu biomasu,
- energetske usjeve.

Drvena biomasa podrazumijeva drva iz šume, drva iz energetske plantaže, ostatak iz drvno-prerađivačke industrije, peleti,... Ona se najčešće koristi za grijanje (individualno, centralno, područno), za kogeneraciju električne i toplinske energije, za preradu u energente (briketi, peleti, drveni ugljen, ...) za roštiljanje i sl. Biomasa iz otpada podrazumijeva otpad iz drvno-prerađivačke industrije, prehrambene industrije, ugostiteljstva, organski dio komunalnog otpada, otpadni mulj nakon pročišćavanja otpadnih voda. Poljoprivredna biomasa podrazumijeva ostatke pri uzgoju poljoprivrednih proizvoda (kukuruz, uljana repica, salama) za primarnu namjenu (prehrana ljudi i

stoke, industrijsko bilje). To su kukuruzovina, oklasak, stabljike, ljuske, koštice,... To se često ostavlja na poljima te se zemlja zajedno s time preore što kasnije posluži kao prirodno gnojivo. Zbog toga se proizvode posebni energetske usjevi, koji se sade samo u energetske svrhe, tj. za uporabu kao energetske gorivo. To su kulture kratkih ophodnji (topola, vrba, bagrem i eukaliptus), travnati i nedrvni energetske usjevi (kineski šaš, rogoz), vodeni usjevi ili hidroponi (mikroalge, makroalge, ribnjački jezerski korovi) te poljoprivredni energetske usjevi (usjevi šećera, škroba i uljarica). Energetske usjevi mogu se koristiti za zaštitu okoliša kod osjetljivih i poplavnih područja zbog toga što preuzmu na sebe štetne tvari iz okoliša jer zahtijevaju dosta vode koju onda filtriraju i time joj poboljšavaju kvalitetu. Problemi kod energetskih usjeva mogu se javiti zbog prenamjene zemljišta iz prehrambene u energetske svrhe gdje dolazi do sukoba interesa između proizvodnje hrane i proizvodnje energije. Neki usjevi su tzv. nametničke vrste koje se jako brzo i daleko prošire pa naruše održivu ravnotežu s drugim kulturama.

Obnovljivost biomase kao energetskog izvora ovisi o tome da li se npr. kod drvene biomase posadi barem toliko da godišnji prinos bude jednak godišnjoj potrošnji (energetski izvor je obnovljiv ako je brzina njegovog generiranja veća od brzine njegovog iskorištavanja). No, za razliku od sunca, vjetra i vode, biomasa ne ovisi o vremenskim uvjetima te ju se može koristiti konstantno, odnosno proizvoditi energiju kad to nama odgovara. To podrazumijeva da se biomasa već nalazi u obliku koji je pogodan za iskorištavanje kao i to da se već nalazi na mjestu predviđenom za iskorištavanje. Stabla se nalaze u šumi, dok su peći odnosno kotlovi u kućama ili u energetskim postrojenjima (u civilizaciji). Također, stabla je potrebno posjeći i usitniti na odgovarajuću veličinu. Gnoj se nalazi na farmama, poljoprivredni i energetske usjevi na njivama,... Drvenu sječku i pobrane usjeve je potrebno osušiti. Općenito, biomasu je potrebno transportirati od mjesta korištenja i prilagoditi načinu iskorištavanja. Za sve to je potrebno i vrijeme i energija pa valja uzeti u obzir isplativost iskorištavanja biomase kao energetskog izvora. Još neki od nedostataka korištenja biomase kao izvora energije su niža energetska vrijednost i gustoća te relativno skupe i ne tako široko dostupne tehnologije za korištenje u odnosu na tehnologije ostalih obnovljivih izvora energije (fotonaponske ćelije, sunčani kolektori).

Iskorištavanje biomase u termoenergetskim postrojenjima ima blago pozitivan utjecaj na okoliš zbog zbrinjavanja tog dijela otpada. Bilo da se biomasa spaljuje za dobivanje energije ili da ju se pretvara u bioplin koji onda izgara, iskorištavanjem biomase u atmosferu se ispušta CO<sub>2</sub>. No, ako se uzme u obzir uvjet obnovljivosti biomase kao energetskog izvora onda će nove sadnice za vrijeme rasta kroz proces fotosinteze preuzeti na sebe CO<sub>2</sub>. Tako gledano može se reći da je biomasa CO<sub>2</sub> neutralna. No, gledajući ukupno, od proizvodnje opreme postrojenja na biomasu (bioplin) pa sve do

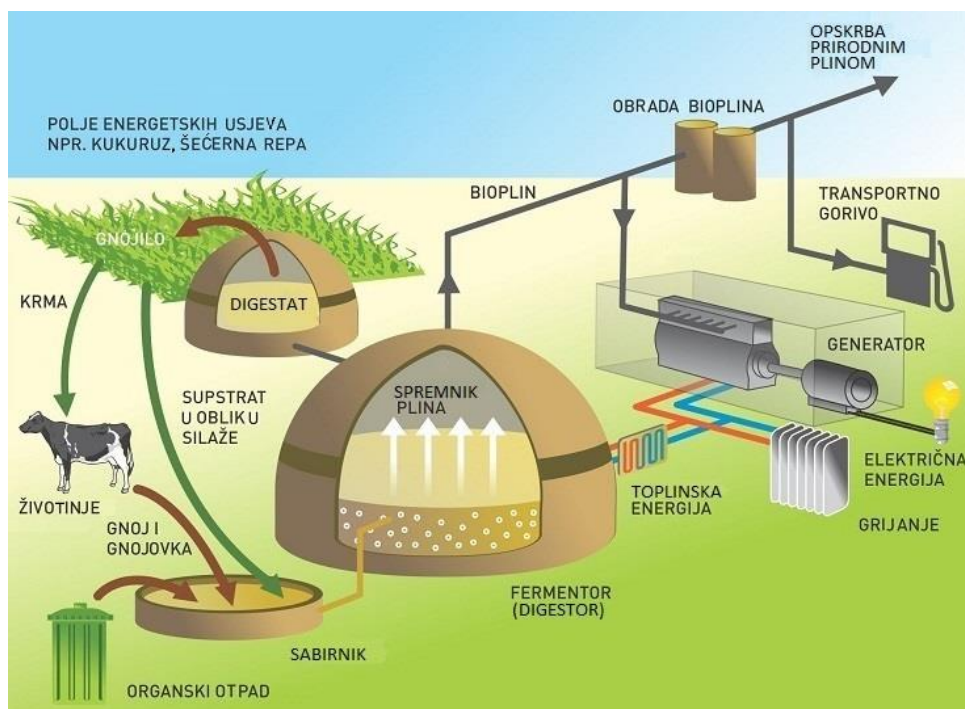
nabave biomase, tada je emisija CO<sub>2</sub> jednaka konvencionalnim postrojenjima. Pozitivan utjecaj ima i na društvenu zajednicu. Samo postrojenje otvara nova radna mjesta, koja ovise o zadržavanju već postojećih. Farmeri će i dalje brinuti o pilićima, kravama,... poljoprivrednici će i dalje uzgajati kukuruz, uljanu repicu,... drvosječe i pilari će i dalje rušiti i obrađivati drva... Svi skupa pridonose povećanju lokalne i regionalne gospodarske aktivnosti.

Bioplin je mješavina plinova (tablica 1.1) koja nastaje prilikom truljenja organske tvari (biomase) bez prisustva zraka. Taj se proces naziva anaerobna digestija (AD), a detaljnije o njemu u poglavlju 2. Uz bioplin iz procesa nastaje i digestat koji se može upotrijebiti kao gnojivo u poljoprivredi. Kao sirovina (biomasa) za proizvodnju bioplina najčešće se koristi gnoj ili gnojnica u kombinaciji s drugom sirovinom biljnog (bogate škrobom, šećerima, uljima, ...) ili životinjskog (bogate proteinima i mastima) porijekla. Kvaliteta i količina nastalog bioplina ovisi o vrsti biomase koja se koristi kao supstrat. Slika 1.1 prikazuje ovisnost količine nastalog bioplina o vrsti supstrata. Donja ogrjevna moć bioplina (60 % CH<sub>4</sub>) iznosi  $H_{d,bp} = 21,6 \text{ MJ/m}^3$ , dok za prirodni plin (~100 % CH<sub>4</sub>) iznosi  $H_{d,pp} = 36 \text{ MJ/m}^3$  [2]. Za približavanje vrijednosti bioplina prirodnom plinu, bioplin je potrebno pročistiti.

*Tablica 1.1 Sastav bioplina [3]*

<b>Kemijski spoj</b>	<b>Kemijski simbol</b>	<b>Volumni udio, %</b>
Metan	CH <sub>4</sub>	50-75
Ugljikov dioksid	CO <sub>2</sub>	25-45
Vodena para	H <sub>2</sub> O	2 (20°C) - 7 (40°C)
Kisik	O <sub>2</sub>	< 2
Dušik	N <sub>2</sub>	< 2
Amonijak	NH <sub>3</sub>	< 1
Vodik	H <sub>2</sub>	< 1
Sumporovodik	H <sub>2</sub> S	< 1

Valja napomenuti kako se iz biomase mogu dobiti i tekuća (biometanol, bietanol, biodizel) te plinovita (deponijski plin) biogoriva, no kako je tema idejni projekt bioplinskog postrojenja, zadržat ćemo se na njemu i njegovoj proizvodnji. Skica jednog takvog postrojenja prikazana je na slici 1.1.



Slika 1.1 Shema bioplinskog postrojenja na poljoprivrednom gospodarstvu [4]

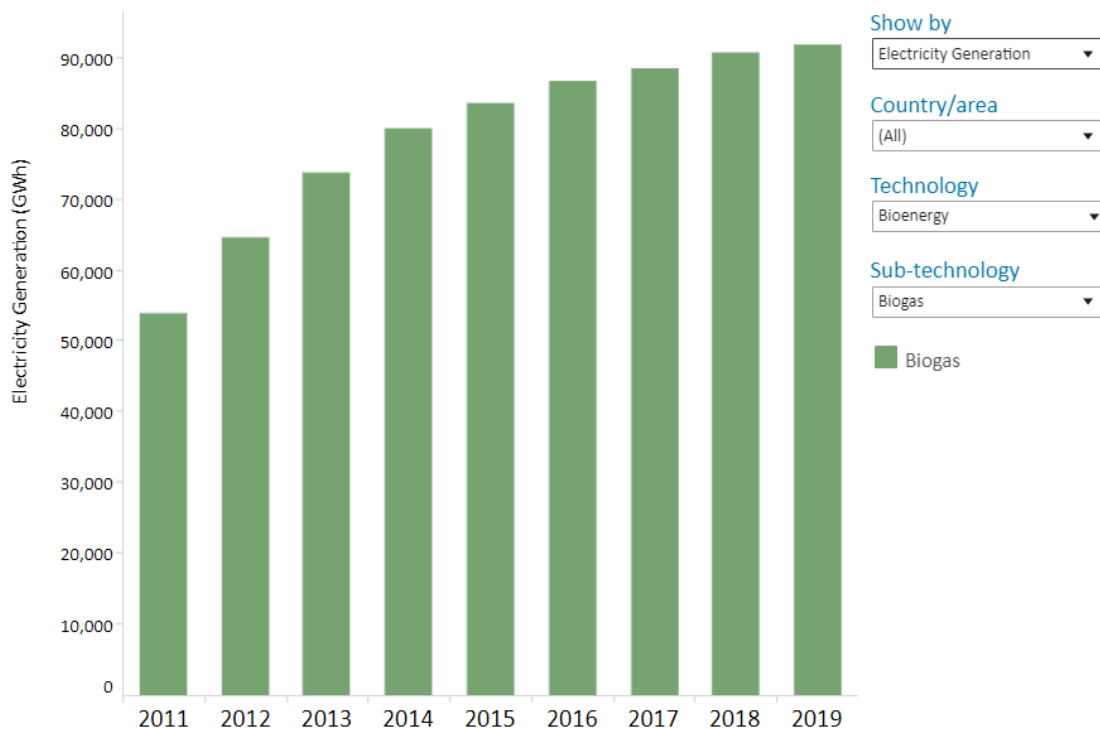
Način kretanja i iskorištavanja resursa prikazan na slici 1.1 spada u neke od podciljeva održivog razvoja. Održivi razvoj podrazumijeva zadovoljavanje potreba sadašnje generacije, bez ugrožavanja mogućnosti budućih generacija da zadovolje svoje potrebe [5]. Temelji se na uzajamnom djelovanju, postizanju i održavanju ravnoteže između gospodarskih, društvenih i okolišnih zahtjeva (slika 1.2).



Slika 1.2 Stupovi održivog razvoja [5]

## 1.2. Potencijal bioplina

Na svjetskoj razini potencijal proizvodnje energije iskorištavanjem biomase, pa time i bioplina je velik. Prema izvješću samita *World Biogas Association* [6] održanog 3.7.2019. godine u svijetu postoji 50 milijuna mikro digestora, 132 000 malih, srednjih i velikih digestora te 700 postrojenja za pročišćavanje bioplina. Na slici 1.3 prikazan je porast količine proizvedene električne energije iz bioplina.



Slika 1.3 Porast proizvodnje električne energije iz bioplina kroz godine [7]

Prema tom izvješću, procjena proizvodnje električne energije iz bioplina od 87 TWh godišnje, znači da koristimo tek 1,6 – 2,2% globalnog potencijala anaerobne digestije uz, naravno, zadržavanje obnovljivosti biomase. Ukupan potencijal za proizvodnju energije (bioplina) iz trenutno dostupnih i održivo uzgojenih/oporabljenih sirovina u svijetu iznosi od 10 100 do 14 000 TWh godišnje. Ta količina energije može zadovoljiti 6 – 9% svjetske potrošnje primarne energije, 16 – 22% svjetske potrošnje električne energije ili 23 – 32% svjetske potrošnje ugljena. Ako bi se ta energija, odnosno ta količina bioplina pročistila do biometana, moglo bi se zamijeniti 993 – 1 380 bcm<sup>1</sup> prirodnog plina, što je ekvivalentno 26 – 37% sadašnje potrošnje prirodnog plina.

---

<sup>1</sup> bcm – engl, *billion cubic meters*, milijarda kubičnih metara

Proces proizvodnje bioplina, anaerobna digestija, ima potencijal smanjiti emisije stakleničkih plinova za 3 290 do 4 360 Mt CO<sub>2</sub> eg<sup>2</sup>, što je ekvivalentno 10 – 13% trenutnih emisija stakleničkih plinova kroz proizvodnju energije iz obnovljivih izvora, spaljivanje usjeva, krčenje šuma, deponijski plin te kroz proizvodnju gnojiva. Također, korištenje digestata za gnojenje tla može zamijeniti 5 – 7% anorganskog gnojiva koje se trenutno koristi, čime bi se moglo pognojiti 82 milijuna hektara zemlje.

---

<sup>2</sup> Mt CO<sub>2</sub> eq – engl. *million metric tons CO<sub>2</sub> equivalents*, ekvivalent milijun metričkih tona CO<sub>2</sub>

## 2. ANAEROBNA DIGESTIJA

Anaerobna digestija (koriste se još i pojmovi *razgradnja* i *fermentacija*) je biokemijski proces razgradnje kompleksnih organskih spojeva bez prisustva kisika. Taj se proces svakodnevno dešava u prirodi, npr. u morskom sedimentu, u želucu preživača (goveda, ovce, koze, antilope,...) ili prilikom nastanka treseta. Produkti procesa su razni plinovi ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,...) te fermentni ostatak. Ako se proces odvija u kontroliranim uvjetima, sa kontinuiranim dovodom tvari za razgradnju (supstrata), kao npr. u bioplinskim postrojenjima, produkte procesa nazivamo bioplin i digestat.

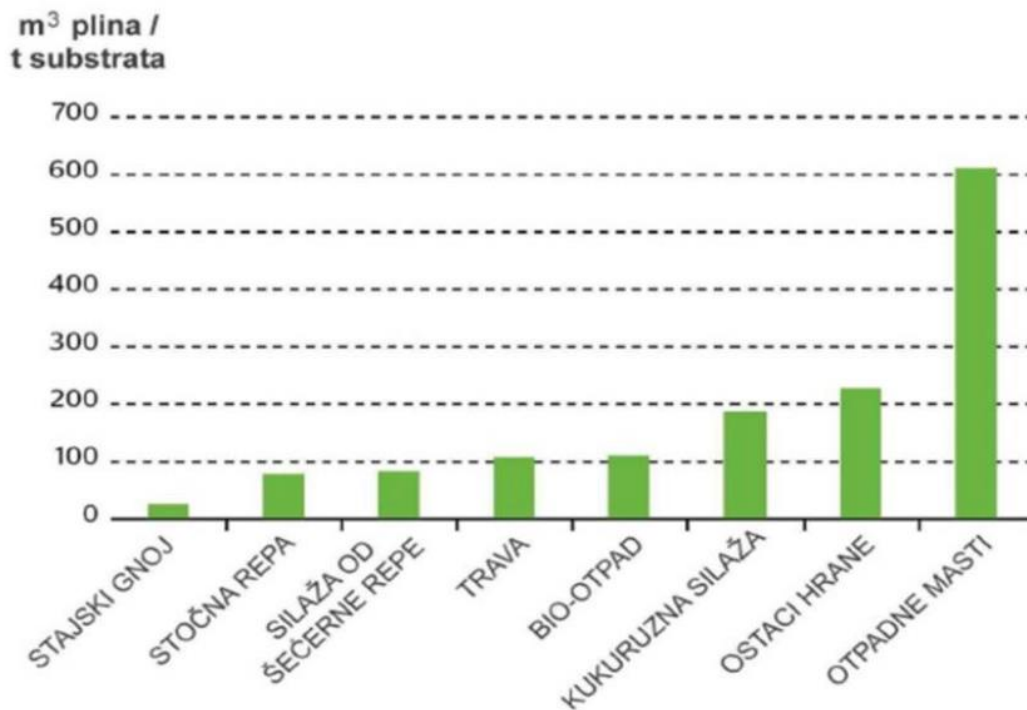
### 2.1. Supstrati anaerobne digestije

Proizvodnja bioplina s dva ili više različita supstrata naziva se kodigestija, a najčešće korištena biomasa kao supstrat je:

- stajski gnoj i gnojnica,
- ostaci i nusproizvodi iz poljoprivredne proizvodnje,
- razgradivi organski otpad iz poljoprivredne i prehrambene industrije (ostaci biljnog i životinjskog porijekla),
- organski dio komunalnog otpada i otpada iz ugostiteljstva (ostaci biljnog i životinjskog porijekla),
- otpadni muljevi,
- energetske usjevi (kukuruz, sirak, trave, ...).

Stajski gnoj i gnojnica nastaju miješanjem krutog (gnoj) i tekućeg (gnojnica) životinjskog izmeta sa steljom. Stelja predstavlja sloj slame (osušene stabljike žitarica) koje služe kao ležaj životinjama. Pruža im udobnost, toplinsku izolaciju, ali i upija dio tekućeg izmeta čime se smanjuju neugodni mirisi. Omjer krutog i tekućeg izmeta, kao i količina potrebne slame ovisi o vrsti životinja koja se uzgaja. Umjesto slame može se koristiti i piljevina, no to nije čest slučaj budući da piljevina količinski nije tako široko dostupna. Uz to, korištenje ostataka drvne industrije kao i drvenih energetskih usjeva u procesu AD-a zahtijeva određenu prethodnu obradu u svrhu uklanjanja lignina, celuloze i hemiceluloze jer anaerobne bakterije teško ili gotovo nemoguće razgrađuju te spojeve. Slika 2.1 prikazuje količine bioplina u ovisnosti o vrsti supstrata.





Slika 2.1 Količina bioplina u ovisnosti o vrsti supstrata [2]

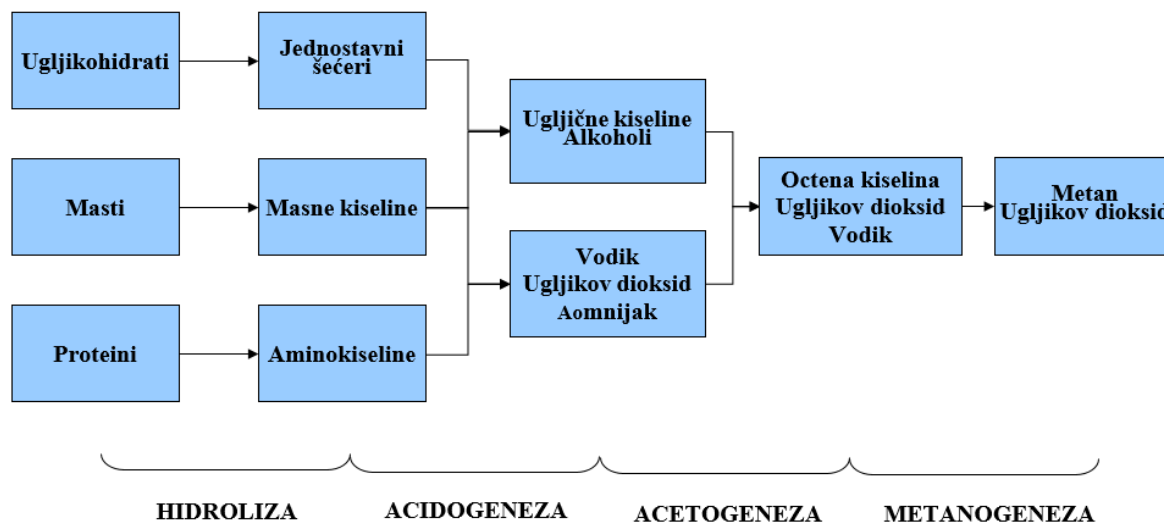
Kako se iz samog stajskog gnoja ne dobiva previše bioplina najčešće ga se za kodigestiju koristi s poljoprivrednim odnosno energetskim usjevima. Prednosti korištenja životinjskih ekskremenata su:

- jeftini i lako dostupni,
- imaju visok sadržaj vode (4 – 8 % suhe tvari), koja služi kao otapalo i za druge tvari te olakšava miješanje,
- prirodno sadrže anaerobne bakterije.

Prema slici 2.1 najviše se bioplina može dobiti iz otpadnih masti i ostataka hrane. Kako se oni prikupljaju iz više različitih mjesta (iz restorana, iz kućanstva, ...) teško je znati što je točno netko izlio/bacio u takav otpad, pa se oni rijetko koriste kao supstrati da ne bi eventualne nepoznate tvari naškodile procesu anaerobne digestije.

## 2.2. Biokemijski postupak anaerobne digestije

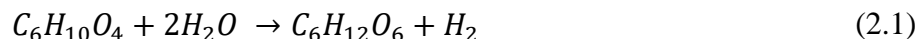
Anaerobna digestija je mikrobiološki proces razgradnje organske tvari bez prisustva kisika. Produkti koji nastaju su bioplin i digestat. Proces je moguće podijeliti u četiri faze koje se u digestoru (fermentor) odvijaju istovremeno. Mikroorganizmi odnosno anaerobne bakterije koje sudjeluju u procesu su roda *Clostridium* *Methanobacterium* i *Methanosarcina* [8]. Slika 2.2 prikazuje dijagram faza anaerobne digestije.



Slika 2.2 Faze anaerobne digestije [2]

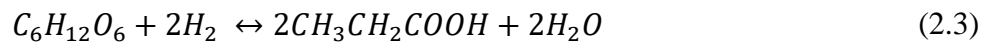
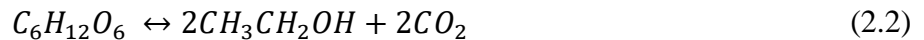
### 2.2.1. Hidroliza

Hidroliza je prva faza AD-a u kojoj se organski polimeri razlažu na monomere i oligomere. Hidrolitičke bakterije izlučuju enzime koji razgrađuju ugljikohidrate, masti i bjelančevine na glukozu, glicerol, purine, piridine i sl. Te bakterije ujedno i koriste produkte hidrolize za vlastite metaboličke procese čime ih dalje razgrađuju. Primjer jedne takve reakcije prikazan je jednadžbom (2.1) u kojoj dolazi do hidrolize nekog ugljikohidrata u glukozu ( $C_6H_{12}O_6$ ) i vodik ( $H_2$ ).



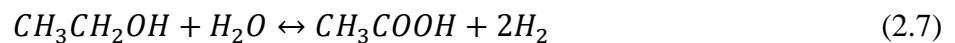
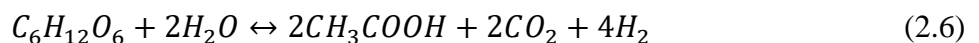
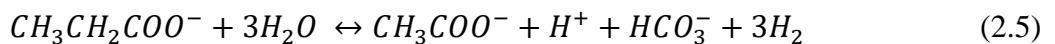
### 2.2.2. Acidogeneza

U fazi acidogeneze produkti hidrolize fermentiraju u metanogene spojeve pomoću acidogenih bakterija. Pa tako fermentacijom jednostavnih šećera, aminokiselina i masnih kiselina nastaju octena kiselina ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), ugljikov dioksid i vodik (70 %) te hlapljive masne kiseline (HMK) i alkohol ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ) (30 %). Budući da se vodik i octena kiselina pomoću metanogenih bakterija direktno mogu pretvoriti u metan, oni „preskaču“ acetogenezu, dok alkoholi i hlapljive masne kiseline s njom započinju. Kemijske jednadžbe u nastavku prikazuju reakcije acidogeneze gdje se glukoza pretvara u etanol (2.2), propionsku (2.3) i octenu kiselinu (2.4).



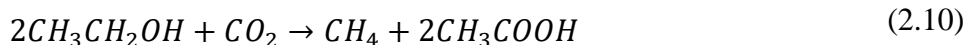
### 2.2.3. Acetogeneza

U fazi acetogeneze produkti acidogeneze koji se ne mogu direktno pretvoriti u metan oksidiraju do metanogenih spojeva. Pa tako oksidacijom alkohola i hlapljivih masnih kiselina nastaju octena kiselina, vodik i ugljikov dioksid. Vodik, iako važan za proizvodnju metana, inhibira metabolizam acetogenih bakterija, čime se može smanjiti oksidacija alkohola i hlapljivih masnih kiselina u vodik, ali i octenu kiselinu iz kojeg se u metanogenezi dobiva više metana nego od vodika. Kemijske jednadžbe u nastavku prikazuju reakcije acetogeneze gdje se propionat (sol propionske kiseline) pretvara u acetat (sol octene kiseline) (2.5). Jednadžba 2.6 prikazuje nastajanje octene kiseline iz glukoze, a jednadžba 2.7 nastajanje octene kiseline iz etanola.



#### 2.2.4. Metanogeneza

Završna faza AD-a je metanogeneza gdje se pomoću metanogenih bakterija proizvode metan i ugljikov dioksid. 70 % proizvedenog metana nastaje iz octene kiseline dok preostalih 30 % iz vodika i ugljikovog dioksida. U cjelokupnom procesu AD-a, metanogeneza je najsporija faza, a metanogene bakterije su najosjetljive na promjene radnih parametara. Kemijske jednadžbe u nastavku prikazuju kemijske reakcije metanogeneze u kojima metan nastaje iz ugljikovog dioksida i vodika (2.8), iz octene kiseline (2.9) te iz etanola (2.10).



Ostatak neiskorištenog supstrata koji bakterije u svim fazama AD-a nisu mogle probaviti predstavlja digestat.

## 2.3. Parametri anaerobne digestije

Uspješnost AD-a, a samim tim i količina nastalog bioplina, ovisi o uvjetima u kojima se proces odvija. Održavanje parametara procesa unutar određenih vrijednosti omogućuje anaerobnim bakterijama normalan rad. U bioplinskim postrojenjima, odnosno u digestoru, najvažniji parametri su temperatura, pH vrijednost, količina hlapljivih masnih kiselina, količina amonijaka, te količina elemenata u tragovima. Također, kako se radi o anaerobnoj digestiji, izuzetno je važno da u sam digestor ne uđe zrak, odnosno kisik.

### 2.3.1. Temperatura procesa

AD se može odvijati na različitim temperaturama. Radna temperatura odabire se prema vrsti supstrata, a duljina trajanja procesa ovisi o radnoj temperaturi kako je to prikazano u tablici 2.1.

*Tablica 2.1 Temperatura i duljina trajanja procesa [3]*

<b>Temperaturna zona</b>	<b>Procesne temperature, °C</b>	<b>Minimalno vrijeme trajanja procesa, dan</b>
Psihrofilna	< 20	70 - 80
Mezofilna	30 - 42	30 - 40
Termofilna	43 - 55	15 - 20

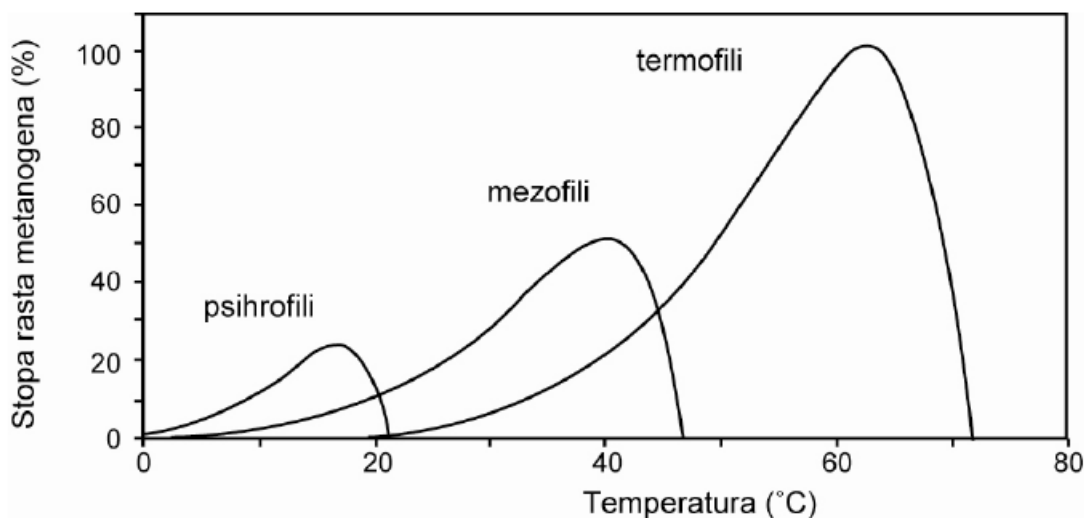
Neke prednosti vođenja procesa AD-a u termofilnoj temperaturnoj zoni spram psihrofilne i mezofilne zone su:

- učinkovito uništavanje patogena,
- viša stopa rasta metanogenih bakterija na višim temperaturama,
- kraće vrijeme digestije, brži i učinkovitiji proces,
- poboljšana razgradnja i iskoristivost hranjivih tvari iz supstrata,
- bolja razgradnja krutih tvari i iskoristivost supstrata,
- bolja mogućnost razdvajanja krute i tekuće frakcije supstrata.

Neki od nedostataka termofilne temperaturne zone su:

- veći stupanj neravnoteže,
- veća potrošnja energije zbog viših temperatura,
- veći rizik od inhibicije amonijakom.

S povećanjem radne temperature raste toksičnost amonijaka pa može doći do usporavanja ili čak zaustavljanja procesa. Smanjenjem radne temperature procesa ispod 50 °C ili niže, smanjuje se i stopa rasta metanogenih bakterija, što isto tako može usporiti ili čak zaustaviti proces AD-a. Stopa rasta metanogenih bakterija je viša na višim temperaturama (slika 2.3). To znači da digestori koji rade u termofilnoj temperaturnoj zoni mogu primiti više supstrata (jer će biti više bakterija za razgradnju) ili da će vrijeme potrebno za razgradnju supstrata biti kraće.



Slika 2.3 Relativni rast nastanka psihrofilnih, mezofilnih i termofilnih metanogena [3]

Veće temperature u digestoru znače manju viskoznost supstrata, čime se olakšava difuzija otopljenih tvari. Viša radna temperatura znači i veći utrošak energije, no digestori s radnom temperaturom u termofilnoj temperaturnoj zoni imaju brže kemijske reakcije te učinkovitiju proizvodnju metana.

Radnu temperaturu procesa važno je održavati konstantnom jer se njezinom promjenom utječe na rast i aktivnost bakterija, a time i na proizvodnju bioplina. Mezofilne bakterije podnose promjenu temperature od  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ , dok su termofilne osjetljivije te podnose promjenu do  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . Također termofilnim je bakterijama nakon temperaturnog poremećaja potrebno dulje vrijeme da se prilagode novim uvjetima i ponovo uspostave maksimalnu proizvodnju bioplina.

### 2.3.2. pH-vrijednost supstrata

U procesu AD-a važna je i kiselost odnosno lužnatost supstrata, što se izražava pH-vrijednošću. Rast i razvoj anaerobnih bakterija ovise o pH-vrijednosti supstrata, a samim tim i kvaliteta razgradnje pojedinih spojeva (amonijaka, sulfidne i organske kiseline) u procesu. Za dobivanje metana pH vrijednost supstrata mora biti između 5,5 i 8,5. Za većinu metanogenih bakterija, najbolji raspon je između 7 i 8, dok su za acidogene bakterije najbolje nešto niže vrijednosti. Kod mezofilne digestije ( $30^{\circ}\text{C} < \vartheta < 42^{\circ}\text{C}$ ) optimalna pH vrijednost je između 6,5 i 8, a ispod 6 i iznad 8,3 dolazi do inhibicije. U termofilnim digesterima ( $43^{\circ}\text{C} < \vartheta < 55^{\circ}\text{C}$ ) osim temperature, veća je i pH vrijednost (supstrat je blago lužnatiji). To je zato jer je topivost ugljikovog dioksida u vodi manja na višim temperaturama pa se stvara manje ugljične kiseline. Amonijak također povećava pH-vrijednost supstrata, dok ju hlapljive masne kiseline snižavaju.

Kontrola pH-vrijednosti unutar digestora vrši se pomoću bikarbonatnih pufera. Općenito, puferi su dvokomponentne otopine u ravnoteži koji se sastoje od smjese slabih kiselina i njihovih soli ili slabih lužina i njihovih soli. Glavno svojstvo im je opiranje promjeni pH-vrijednosti okruženja u kojem se nalaze. Opirati se mogu do određene granice (puferski kapacitet) nakon čega slijedi velika promjena pH-vrijednosti što najčešće dovodi do prekida procesa AD-a.

### 2.3.3. Hlapljive masne kiseline (HMK)

Hlapljive masne kiseline su spojevi s do šest atoma ugljika (acetat, propionat, butirat i laktat) i nastaju kao međuspojevi u fazi acetogeneze. Stabilnost procesa AD-a ovisi o količini nastalih međuspojeva. Povećanjem njihove koncentracije dolazi do smanjenja pH-vrijednosti i narušavanja stabilnosti, pa čak i zaustavljanja procesa. Zbog prisutnosti pufera njihova akumulacija neće se uvijek prepoznati smanjenjem pH-vrijednosti (kapacitet pufera nije još iscrpljen). Zasebno promatranje njihovih količina, kao i pH-vrijednosti, ne može biti indikator kvalitete procesa.

### 2.3.4. Utjecaj amonijaka na proces

Molekulu amonijaka ( $\text{NH}_3$ ) čine atom dušika i tri atoma vodika. Pri okolišnim uvjetima je bezbojan plin oštrog i karakterističnog mirisa. Lakši je od zraka i lako je topiv u vodi. U procesu AD-a glavni izvor amonijaka su bjelančevine. Velike koncentracije amonijaka, pogotovo u neioniziranom obliku, mogu usporiti, pa čak i u potpunosti zaustaviti AD-a. To se često dešava u digesterima koji kao supstrat koriste gnojnicu, jer se u urinu nalazi velika koncentracija amonijaka. Kako se proces AD ne bi u potpunosti zaustavio, koncentracija amonijaka u supstratu ne smije biti veća od 80 mg/l.

Toksičnost amonijaka je veća pri višim temperaturama pa je kod digestora s termofilnom temperaturnom zonom veći rizik od inhibicije amonijakom.

#### 2.3.5. Utjecaj elemenata u tragovima

Elementi u tragovima poput željeza, nikla, kobalta, selena, molibdena i volframa jednako su važni za rast i preživljavanje anaerobnih bakterija kao i makronutrijenata poput ugljika, dušika, fosfora i sumpora. Optimalan omjer makronutrijenata iznosi C:N:P:S = 600:15:5:1.

### 2.4. Radni parametri procesa

Parametri navedeni u prethodnom poglavlju odnose se na općeniti proces anaerobne digestije uz pokoji opasku vezanu za proizvodnju bioplina u bioplinskim postrojenjima. Sljedeći se parametri odnose isključivo na AD u digestoru.

#### 2.4.1. Sadržaj organske tvari u digestoru

Bioplinsko postrojenje gradi se na temelju ekonomske računice koja u obzir uzima početnu investiciju, količinu proizvedenog bioplina, vrijeme povrata investicije, i sl. Tako je za sam odabir veličine i tip digestora potrebno znati količinu organske tvari koja se dnevno unosi u digestor, a ona se računa prema izrazu (2.11):

$$B_R = \frac{m \cdot c}{V_D} \quad (2.11)$$

gdje je:

$B_R$  – unos organske tvari, kg/dan·m<sup>3</sup>

$m$  – masa supstrata unesena po jedinici vremena, kg/dan

$c$  – sadržaj organske tvari, %

$V_D$  – volumen digestora, m<sup>3</sup>.

#### 2.4.2. Vrijeme zadržavanja supstrata u digestoru

Za dimenzioniranje digestora važno je znati i vrijeme koje supstrat provede unutar samog digestora. To se vrijeme naziva vrijeme hidrauličke retencije (VHR) i računa se prema izrazu (2.12):



$$VHR = \frac{V_D}{V} \quad (2.12)$$

gdje je:

$VHR$  – vrijeme hidrauličke retencije, dan

$V_R$  – volumen digestora,  $m^3$

$V$  – volumen supstrata unesenog u jedinici vremena,  $m^3/\text{dan}$

### **3. POSTROJENJA ZA DOBIVANJE BIOPLINA**

Proces dobivanja bioplina koristi se u mnogim granama društva kao jedan od boljih načina zbrinjavanja otpada. Pooštavanje propisa o skladištenju i uporabi stajskog gnoja i otpada organskog podrijetla „prisiljavaju“ industrije čiji primarni cilj nije proizvodnja energije (bioplina) da zbrinjavanje svog otpada okrenu upravo u tom smjeru. Tu se ponajprije misli na poljoprivredne, prehrambeno-prerađivačke, fermentacijske industrije,... ali i OPG-ove, komunalna poduzeća koja naravno, imaju ili prikupljaju takvu vrstu otpada.

#### **3.1. Poljoprivredna bioplinska postrojenja**

Supstrati za AD u poljoprivrednim bioplinskim postrojenjima su stajski gnoj i gnojnica, ostaci i nusproizvodi energetskih usjeva i sl. Kod poljoprivrednika koji ne proizvode bioplin oni se ne bacaju, već se iskorištavaju za gnojenje poljoprivrednih kultura koje uzgajaju (neće propasti). No, u procesu AD-a njihova se hranjiva vrijednost može poboljšati na sljedeće načine:

- miješanje stajskog gnoja različitog podrijetla (krave, svinje, perad) poboljšava odnos hranjivih tvari,
- u procesu se razlažu složene organske tvari (uključujući i organski dušik) čime se povećava količina hranjivih tvari koje biljka može direktno iskorištavati,
- kodigestija stajskog gnoja s drugim supstratima (otpad iz klaonice, otpadne masti i ulja, otpad iz kućanstava, biljni ostaci) dodaje znatnu količinu hranjiva mješavini supstrata.

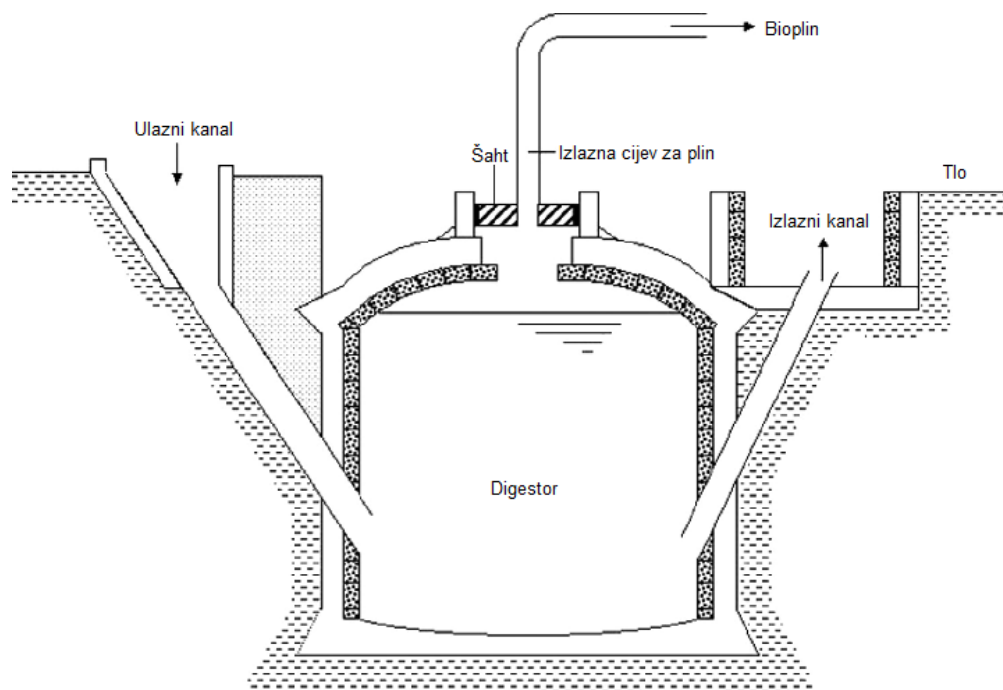
Poljoprivredna bioplinska postrojenja ovisno o relativnoj veličini, funkciji i lokaciji, mogu se podijeliti na:

- bioplinska postrojenja za obiteljska gospodarstva (mala postrojenja),
- bioplinska postrojenja za poljoprivredna gospodarstva (srednje velika postrojenja),
- centralizirana bioplinska postrojenja sa zajedničkom kodigestijom (velika postrojenja).

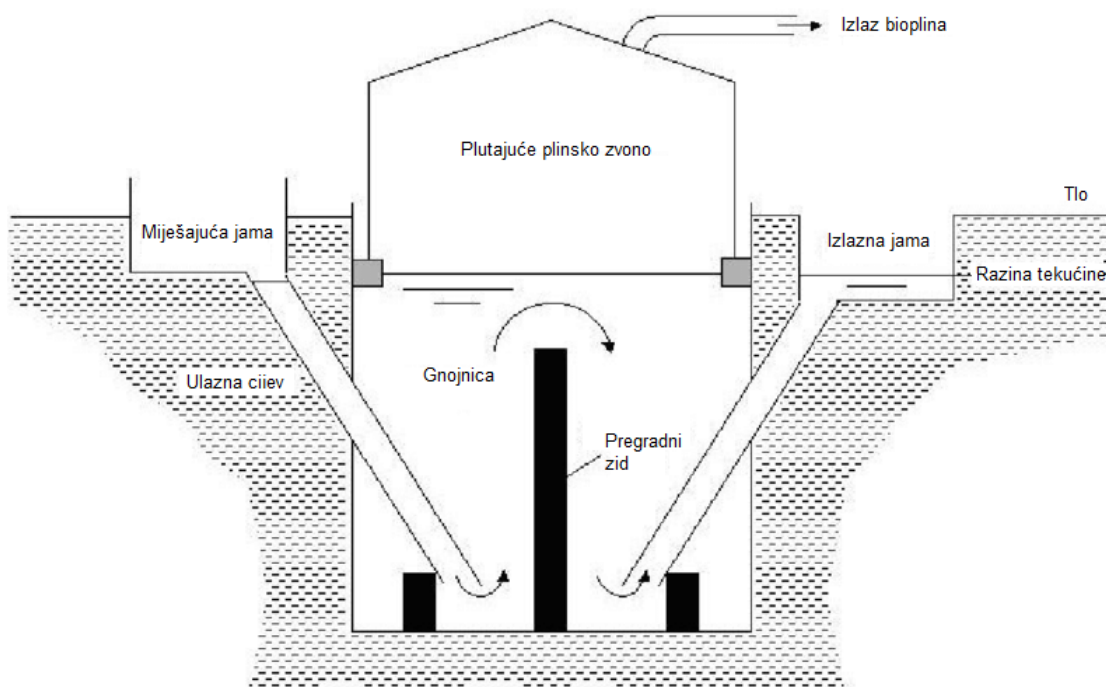
### 3.1.1. Bioplinska postrojenja za obiteljska gospodarstva

Izrada takvih postrojenja razlikuju se od države do države i od postrojenja do postrojenja, a ovisi o klimatskim uvjetima, nacionalnim specifičnostima, zakonodavnom okviru, financijskim mogućnostima i volji malog čovjeka da znanje pretvori u njemu nešto korisno. U svijetu postoje brojna obiteljska bioplinska postrojenja koja su malih snaga, ali tehnološki vrlo jednostavna. Kao supstrat koriste organski otpad iz kućanstva i poljoprivrednih gospodarstva, a proizvedeni bioplin koriste za zadovoljavanje potreba kućanstva (kuhanje, osvjetljavanje,...) Digestori takvih postrojenja su jednostavne, često domaće izvedbe, zahtijevaju minimalno upravljanje i jednostavni su za održavanje. Najčešće se nalaze pod zemljom jer tako ne zauzimaju previše prostora na površini budući da obiteljska gospodarstva obično imaju manje parcele. Kod ukopanih se digestora supstrat slijeva gravitacijski pa nema potrebe za pumpom, a prednost je i to što je na određenoj dubini temperatura konstantna pa je i lakše održavanje temperature procesa. Većinom se nalaze na područjima s toplijom klimom (Kina, Indija,...), a kako su ukopani i manjih dimenzija obično nemaju potrebe za dodatnim grijanjem tako da rade u psihrofilnoj ( $\vartheta < 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ili mezofilnoj ( $\vartheta < 42\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) temperaturnoj zoni s odgovarajućim (duljim) vremenom hidrauličke retencije.

Slika 3.1 prikazuje kineski tip bioplinskog postrojenja za obiteljska gospodarstva. Digestor ima volumen  $6 - 8\text{ m}^3$  i obično se nalazi pod zemljom. Kao supstrat se koriste otpadne vode iz kućanstva, stajski gnoj, otpad organskog podrijetla, i sl. Oni se obično jednom dnevno ubacuju u ulazni kanal. Kako je već rečeno, ti su digestori jednostavne izvedbe i nemaju miješalice, pa teži dijelovi supstrata potonu na dno. U gornjem dijelu tako ostaje tekućina te iznad nje bioplin. Tekućinu je preko izlaznog kanala potrebno ukloniti i to približno onoliko koliko se supstrata taj dan dodalo. Da ne dođe do začepeljivanja digestora, nataloženi se supstrat (sediment) mora ukloniti, i to se radi dva, tri puta godišnje. Prilikom uklanjanja sedimenta važno je da ga se ne ukloni u potpunosti, kako bi ostatak (oko jedna petina digestora) poslužio kao podloga za razvoj mikroorganizama potrebnih za nastavak procesa. Nastali se bioplin najčešće vodi do vanjskog spremnika.



*Slika 3.1 Kineski tip postrojenja [9]*



*Slika 3.2 Indijski tip postrojenja [10]*

Slika 3.2 prikazuje indijski tip bioplinskog postrojenja za obiteljska gospodarstva. Kao i kod kineskog tipa, digester je ukopan u zemlju, a razlikuju se u plutajućem bioplinskom zvonu koje služi kao spremnik bioplina. Kod većih se digestora često postavljaju pregradni zidovi. Time se sprječava nastajanje kratkog spoja u toku supstrata. Drugim riječima, produljuje se put svježeg supstrata do izlazne cijevi (veće vrijeme hidrauličke retencije) i sprječava da odmah ode u izlaznu cijev i ne razgradi se do kraja.

Razvojem tehnologija te ljudskom snalažljivošću nastala su i postrojenja koja su prikazana na slikama 3.3 i 3.4. Ona su najmanjih kapaciteta i snaga, a najčešće su direktno spojena za trošilo.



*Slika 3.3 Komercijalno kućno bioplinsko postrojenje [11]*



*Slika 3.4 Bioplinsko postrojenje domaće izrade [12]*

### 3.1.2. Bioplinska postrojenja za poljoprivredna gospodarstva

Na poljoprivrednim gospodarstvima ili farmama koje svojim kapacitetima premašuju obiteljska gospodarstva, a žele proizvoditi i vlastitu energiju, moguće je izgraditi i bioplinska postrojenja. Takvih je poljoprivrednika i farmera sve više i više jer, osim što im proizvodnja bioplina pruža nove poslovne prilike u vidu zbrinjavanja otpada, dobivaju i kvalitetniji gnoj te sudjeluju na tržištu obnovljivih izvora energije. Najčešće su dimenzionirana za jedno gospodarstvo u ovisnosti o količini nastalog otpada (supstrata) kojeg farma proizvodi. To su najčešće stajski gnoj, silaže poljoprivrednih kultura (kukuruz, uljana repica,...) te u manjoj količini supstrati bogati metanom kao otpad pri preradi ribe i sl.

U svijetu postoje različiti koncepti bioplinskih postrojenja za poljoprivredna gospodarstva, a najviše ih se nalazi u Njemačkoj, Austriji i Danskoj. Ona variraju ovisno o veličini, dizajnu i korištenoj tehnologiji, ali je princip rada isti. Kako se radi o većim količinama supstrata nije dovoljna miješajuća jama kao kod bioplinskih postrojenja za obiteljskih gospodarstva, već se supstrat prikuplja u

predspremnik. Iz njega se supstrat u određenoj količini svakodnevno prepumpava u digestor koji može biti horizontalne ili vertikalne izvedbe. Ovo su veća i ozbiljnija postrojenja pa je važno naglasiti da digestor mora biti nepropustan za plinove. Izrađuje se od betona ili čelika i ima toplinsku izolaciju. Najčešće ima i grijače kako bi se proces AD odvijao u mezofilnoj ( $\vartheta < 42^{\circ}\text{C}$ ) ili termofilnoj ( $\vartheta < 55^{\circ}\text{C}$ ) temperaturnoj zoni. Također, unutar digestora nalaze se i miješalice koje pridonose homogenizaciji supstrata. Time se smanjuje stvaranje sedimenta i plutajućih slojeva, a ujedno se i ravnomjernije raspoređuju hranjive tvari važne mikroorganizmima za proizvodnju bioplina.

Količine nastalog bioplina veće su nego kod bioplinskih postrojenja za obiteljska gospodarstva pa se bioplin koristi u druge svrhe. Najčešće se proizvode i električna i toplinska energija, a njihov omjer ovisi o godišnjem dobu te potrebama samog gospodarstva i postrojenja. Pod te potrebe spadaju grijanje i/ili osvjetljavanje farme, bioplinskog postrojenja te eventualnih pomoćnih objekata (spremište alata, strojeva, ...). Na to otpada otprilike 10 – 30 % ukupne energije, pa se višak električne energije isporučuje u mrežu dok se toplinska energija obično proizvodi sukladno projektiranoj potrošnji. Digestat nastao AD-om koristi se kao gnojivo za kulture koje dotično poljoprivredno gospodarstvo uzgaja dok se višak prodaje.

### 3.1.3. Centralizirana bioplinska postrojenja sa zajedničkom kodigestijom

U ovakvim se postrojenjima supstrat za proces AD-a prikuplja s više farmi odnosno poljoprivrednih gospodarstava raštrkanih na nekom širem području. Samo postrojenje nastoji se sagraditi na mjestu koje je podjednako udaljeno od svih proizvođača supstrata kako bi se troškovi transporta smanjili i ujednačili. Gnoj i gnojnica se na farmama sakupljaju u spremnike koji se onda traktorskim prikolicama ili cisternama odvoze do postrojenja. Postoje i postrojenja kod kojih se supstrat doprema cijevima sa susjednih gospodarstava ili su susjedna gospodarstva cijevima povezana s digestorom. Kod supstrata i dalje prednjače stajski gnoj i gnojnica te energetski odnosno poljoprivredni usjevi, a ovisno o dostupnosti koristi se i druga, već spomenuta, biomasa. Budući da se supstrat sakuplja s više različitih mjesta, ovakva su postrojenja u pravilu najvećih kapaciteta i snaga. Zbog toga (velika količina i različita mjesta sakupljanja) je potrebno obaviti sanitarni pregled supstrata radi eventualnog suzbijanja širenja patogenih bakterija, sjemena korova i osiguranja sigurne primjene digestata kao gnojiva. Sam proces AD-a odvija se u mezofilnoj ( $\vartheta < 42^{\circ}\text{C}$ ) ili termofilnoj ( $\vartheta < 55^{\circ}\text{C}$ ) temperaturnoj zoni uz odgovarajuća vremena hidrauličke retencije. Digestat se nakon procesa sakuplja u spremnicima u kojima, iako pri nižim temperaturama, još uvijek nastaje određena količina bioplina

(do 15 % ukupne količine). Tako nastali bioplin se zajedno s onim nastalim u digestoru odvodi u spremnik bioplina.

Centralna bioplinska postrojenja, osim za prikupljanje supstrata, zadužena su i za odvoz prerađenog digestata do gospodarstava gdje se koristi kao gnojivo. Zbog Zakona o gnojivima i poboljšivačima tla, koji govori o dozvoljenoj kakvoći gnoja i njegovim upravljanjem, da bi se digestat smio koristiti kao gnoj, potrebno ga je prvo analizirati i utvrditi njegov sastav odnosno količinu hranjiva. Analizom se utvrđuje količina suhe organske tvari, hlapljivih čvrstih čestica, količine natrija, fosfora, kalija, pH-vrijednost i sl. Na temelju rezultata analize propisuje se dozvoljena količina digestata za korištenje (kg digestata/ha površine), dok se ostatak prodaje kao gnoj ostalim (manjim) poljoprivrednicima koji ne sudjeluju u dobavljanju supstrata. Korištenjem digestata na ovaj način smanjuje se uporaba mineralnih i umjetnih gnojiva. Razgradnjom digestata u tlu, proizvodnja bioplina postaje dio zaokruženog ciklusa oporabe hranjivih tvari iz stajskog gnoja i organskog otpada.

Centralizirana bioplinska postrojenja sa zajedničkom kodigestijom predstavljaju integrirani sustav za zbrinjavanje organskog otpada i recikliranje hranjiva te proizvodnju energije iz obnovljivih izvora. Ovakva postrojenja imaju pozitivne učinke na okoliš, a ostvaruju i dodatan prihod za poljoprivrednike, operatere bioplinskih postrojenja i cjelokupno društvo:

- jeftino i za okoliš neškodljivo recikliranje organskog otpada i stajskog gnoja,
- proizvodnja energije iz obnovljivih izvora,
- smanjenje emisija stakleničkih plinova,
- poboljšanje sanitarnih uvjeta kroz sanitarnu obradu digestata,
- poboljšanje učinkovitosti gnojiva (digestata),
- smanjenje pojave neugodnih mirisa i insekata,
- ekonomska korist za poljoprivrednike.

Većina centraliziranih postrojenja je organizirana po principu zadruge ili dioničkog društva. Vlasnik, tj. vlasnici poduzeća su poljoprivrednici s čijih se farmi i polja prikupljaju sirovine. Zadrugu vodi upravno vijeće koje određuje smjernice za razvoj, odlučuje o zapošljavanju odgovarajućeg kadra, kao i svim pravnim i financijskim pitanjima koja se odnose na izgradnju postrojenja, opskrbu supstratom, distribuciju digestata, prodaju energije i financiranje.





*Slika 3.5 Centralno bioplinsko postrojenje u Viljevu u Osječko-baranjskoj županiji [13]*

### **3.2. Postrojenja za obradu otpadnih voda**

U otpadne vode spadaju sve vode u kojima je, zbog ispuštanja raznih nečistoća, došlo do promjene fizičkog, kemijskog ili biološkog sastava u odnosu na početni. Otpadne vode se dijele na:

- kućanske otpadne vode – nastale potrošnjom vode u kućanstvu za čišćenje, pranje, higijenu, ispiranje sanitarnih čvorova, ...,
- industrijske (tehnološke) otpadne vode – nastale potrošnjom vode u industrijama za procese prerade hrane, pića, za hlađenje alatnih dijelova, ...,
- oborinske (atmosferske) otpadne vode – nastale u obliku oborina koje su se donekle onečistile prolaskom kroz atmosferu, doticaju s krovovima kuća i ostalim površinama tla.

Prije ispuštanja u okoliš potrebno ih je pročistiti do određene kvalitete za što služe postrojenja za obradu otpadnih voda. Izdvojene se nečistoće sakupljaju u otpadne muljeve koji mogu poslužiti kao biomasa u procesu anaerobne digestije. Time se muljevi stabiliziraju te im se smanjuje konačna količina. U ovisnosti o nacionalnim propisima, u EU-u se od 30 % do 70 % otpadnih muljeva obrađuje AD-om. Postrojenja su ili opremljena s digesterima za AD ili pak muljeve otpremaju u postrojenja za kodigestiju s muljevima. Tekući se ostatak može preraditi kako bi se mogao koristiti kao gnojivo. Na

slici 3.6 prikazano je postrojenje za obradu otpadnih voda u Beču koje godišnje proizvede 78 GWh električne i 82 GWh toplinske energije iz bioplina.



*Slika 3.6 Postrojenje za pročišćavanje otpadnih voda u Beču [14]*

### **3.3. Postrojenja za obradu krutog komunalnog otpada**

Komunalni otpad je otpad koji nastaje u stambenim naseljima, a uključuje otpad iz domaćinstva, industrije i obrtništva, vrtni i tržišni otpad, razni komadni otpad, građevinski otpad, ostatke od obrade komunalnih otpadnih voda. Njegovo prikupljanje i zbrinjavanje spada u nadležnost komunalnih poduzeća. Povećanjem broja ljudi povećava se i količina komunalnog otpada. U zemljama koje nemaju razvijena komunalna poduzeća, tj. koja ne razvrstavaju otpad, on se prikuplja i odlaže na predviđena odlagališta otpada (smetlišta) ili se pak spaljuje. Takvim postupanjem se zapravo gubi energija jer se velik dio komunalnog otpada sastoji od biološki razgradivog materijala. U razvijenijim zemljama taj udio iznosi od 20 % do 50 %, dok u nerazvijenim zemljama može iznositi i do 80%. Pravilnim sortiranjem i prikupljanjem komunalnog otpada biorazgradivi dio može se upotrijebiti za proces anaerobne digestije. Poznavanjem porijekla organskog otpada određuje se metoda obrade. Otpad iz kuhinja i restorana sadrži više vlage i pogodniji je za proces AD-a, dok je drvenasti otpad, zbog lignina i celuloze, prigodniji za kompostiranje. Iskorištavanje organskog otpada za proizvodnju bioplina ima veliki potencijal jer će otpada uvijek biti. U svijetu postoje bioplinska postrojenja koja kao supstrat koriste organski dio otpada ili se pak on koristi u kodigestiji. Cilj je promijeniti uobičajeni tijek organskog komunalnog otpada, odnosno odlaganje ili spaljivanje zamijeniti recikliranjem i vraćanjem dijela hranjivih tvari u sektor poljoprivrede.

### 3.4. Industrijska postrojenja za proizvodnju bioplina

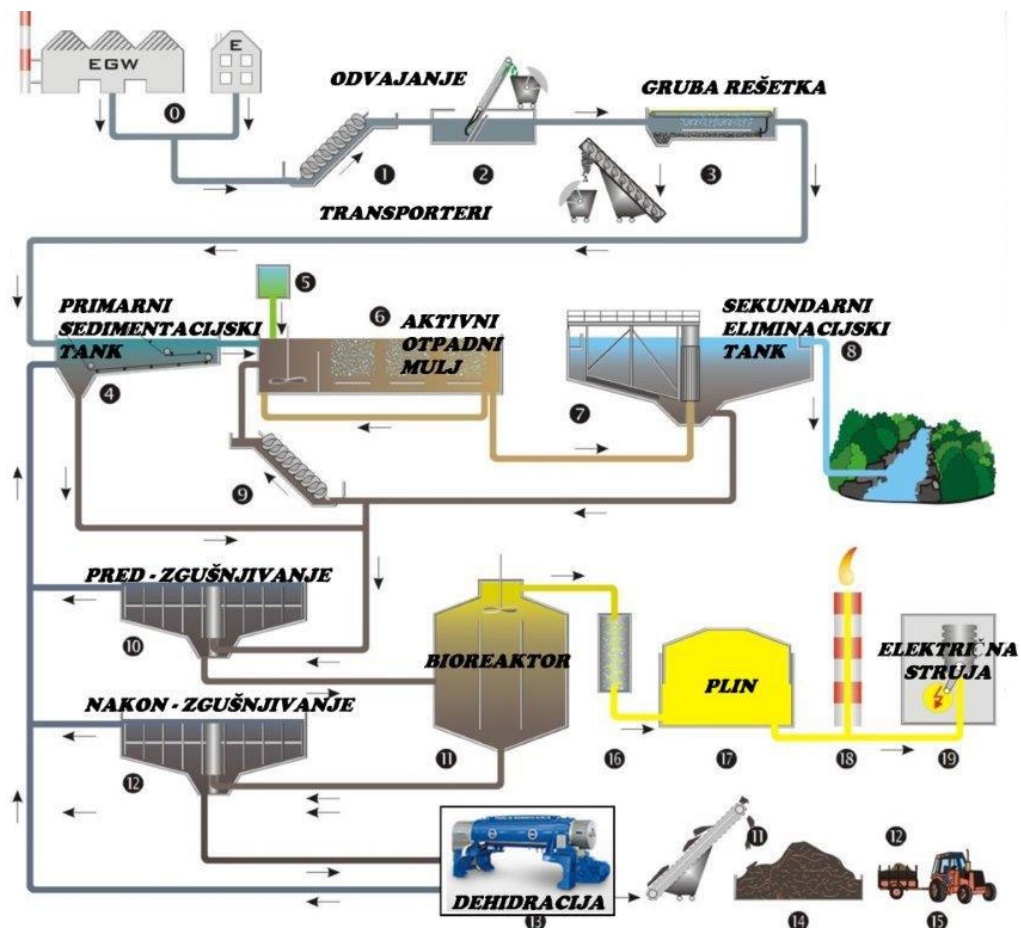
Povećanjem ljudske populacije i životnog standarda raste i industrija. Time se naravno povećavaju i količine industrijskog otpada, a on podrazumijeva otpad iz industrijskih pogona te raznih uslužnih i obrtničkih djelatnosti. Može biti kruti i tekući (industrijske otpadne vode), a organski se dio također može upotrebljavati kao biomasa za proces anaerobne digestije, odnosno za proizvodnju energije. Neke od industrija koje imaju takav otpad su:

- industrija prerade hrane npr. konzerviranje povrća, prerada mlijeka i sira, otpad iz klaonice,...
- industrija pića npr. pivovare, proizvodnja bezalkoholnih pića i sokova, destilerije, ...
- industrije za proizvodnju papira i kartona, gume, kemikalija, škroba, farmaceutski proizvoda,...

Tvornice su često izgrađene u industrijskim zonama pa je prikupljanje industrijskog otpada u neku ruku olakšano jer se i sama bioplinska postrojenja najčešće grade u njihovoj blizini. Neke od prednosti koje društvo i uključene industrije imaju od bioplinskog postrojenja su:

- smanjenje troškova odlaganja otpada jer se smanjuje količina otpada,
- dodana vrijednost ostvaruje se vraćanjem dijela hranjivih tvari u tlo,
- proizvedeni se bioplin koristi za proizvodnju energije,
- učinkovito tretiranje otpada doprinosi „zelenom“ imidžu kompanije.

Ovakvi alternativni načini zbrinjavanja otpada postaju sve češća praksa što zbog sve većih troškova zbrinjavanja otpada uobičajenim putem (odlaganje na smetlišta, spaljivanje,...), a što zbog dobiti za okoliš. Na slici 3.7 prikazana je shema procesa obrade otpadnih (industrijskih i kućanskih) voda, proizvodnja električne energije te zbrinjavanje nastalog mulja kako je to opisano u prethodnim poglavljima.



Slika 3.7 Shema procesa pročišćavanja otpadnih voda i zbrinjavanja nastalog mulja [15]

### 3.5. Proizvodnja deponijskog plina

U prethodnim se poglavljima govorilo o korištenju tek nastalog ili nedavno nastalog otpada za proces anaerobne digestije i dobivanje bioplina. Proces se može provesti i na odlagalištima na kojima se već desecima godina odlaže komunalni otpad. Bilo da su divlja ili planski izgrađena, za proces anaerobne digestije odlagališta je potrebno zatvoriti i adekvatno sanirati. Kod divljih je odlagališta potrebno izgraditi i sustav za prikupljanje i odvodnju procjednih voda te izbušiti plinske bunare za prikupljanje plina. Također, odlagališta je potrebno prekriti nepropusnim pokrovom radi ostvarivanja anaerobnih uvjeta, a smanjuje se i emisija neugodnih mirisa. Na taj način odlagalište postaje digester u kojem je proces dobivanja plina manje kontinuiran u odnosu na dobivanje plina u digesterima spomenutim u prošlim poglavljima. Razlog tome je što komunalni otpad na odlagalištima nije homogeni „supstrat“, odnosno nije razvrstan pa je moguće naći i na neorganske dijelove. To ovisi o veličini, starosti ali i kontroli bacanja smeća na određeno odlagalište. Plin proizveden na ovakav način naziva se deponijski plin i sastavom je sličan bioplinu (50 – 70% metana, 30 – 70% ugljikovog dioksida). Predstavlja jeftin izvor energije, a njegovo prikupljanje je važno za zaštitu okoliša u vidu smanjenja emisija metana i drugih plinova koji bi se ionako oslobodili na odlagalištu. Prikupljanje deponijskog plina doprinosi bržoj stabilizaciji odlagališta i stvaranju prihoda iz uporabe plina. On se najčešće koristi za proizvodnju električne energije budući da su odlagališta obično udaljena od naselja i industrijskih zona pa nema potrebe za toplinskom energijom. Na slici 3.8 prikazano je postrojenje za proizvodnju električne energije Viševac (blizu Rijeke) koje se kao odlagalište koristilo od 1964. do 2011. godine. Za to je vrijeme odloženo je oko 2 milijuna metara kubičnih otpada. Elektrana, označena crvenim krugom, s radom je započela 2015. godine, ima snagu 1,2 MW i godišnje proizvede 6 000 MWh električne energije [16].

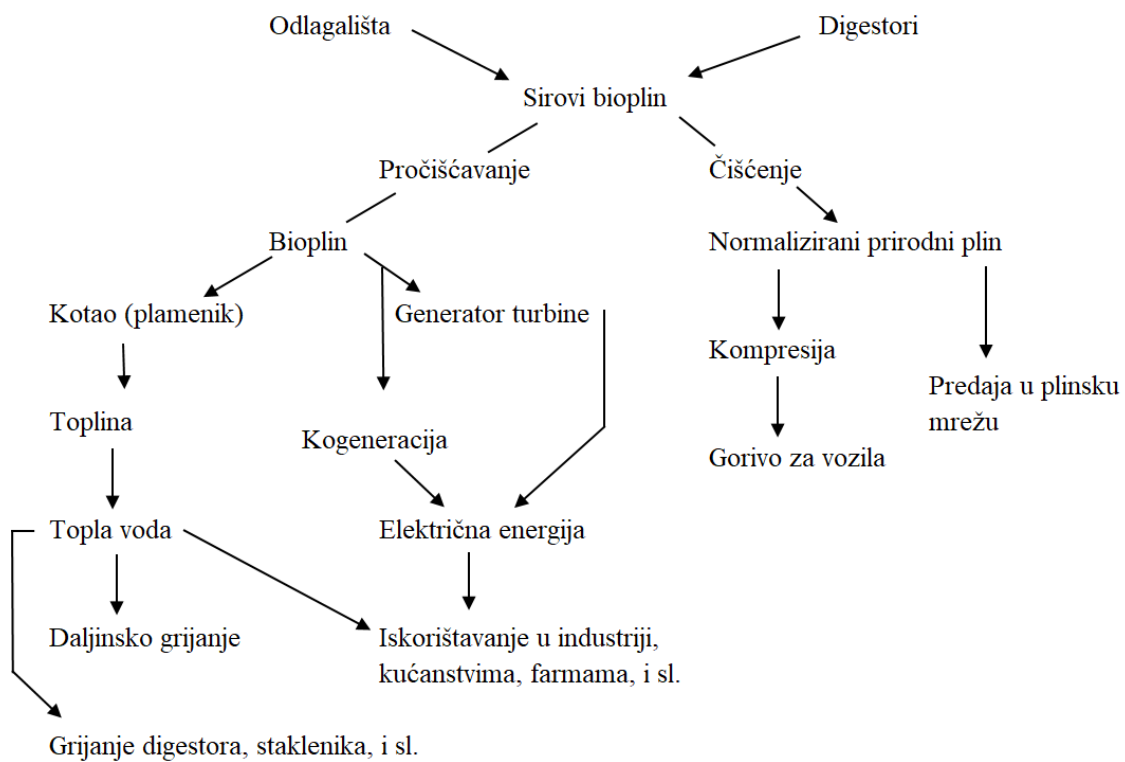


*Slika 3.8 Bivše odlagalište otpada Viševac blizu Rijeke pretvoreno u digestor deponijskog plina [17]*

Za očekivati je da će društvene prednosti korištenja tehnologija spomenutih u ovim poglavljima, kao i dobit za okoliš, nasuprot visokim troškovima zbrinjavanja otpada na druge načine (odlaganje na smetlištima, spaljivanje,...), povećati broj instaliranih bioplinskih postrojenja.

## 4. ISKORIŠTAVANJE BIOPLINA

U prošlom su poglavlju navedene različite vrste biomase i postrojenja za dobivanje bioplina. Slijede načini i postrojenja za njegovo iskorištavanje. Kao i drugi energenti, može se koristiti za različite energetske potrebe ovisno i vrsti izvora i lokalnoj potražnji za specifičnom energijom. Kao što je prikazano na slici 4.1, bioplin se može koristiti za proizvodnju toplinske energije za grijanje, za proizvodnju električne energije, za kogeneraciju tj., istovremenu proizvodnju toplinske i električne energije. Također, može ga se predavati u plinsku mrežu, a može se koristiti i za pogon vozila.



Slika 4.1 Načini iskorištavanja bioplina [3]

#### 4.1. Svojstva bioplina

Bioplin je goriva mješavina plinova čiji je prosječni sastav prikazan u tablici 4.1. Količina i sastav, a time i svojstva, nastalog bioplina ovise o vrsti supstrata, načinu proizvodnje (vrsti postrojenja), o parametrima procesa AD-a (poglavlje 2), i dr.

Tablica 4.1 Sastav bioplina [3]

Kemijski spoj	Kemijski simbol	Volumni udio, %
Metan	CH <sub>4</sub>	50-75
Ugljikov dioksid	CO <sub>2</sub>	25-45
Vodena para	H <sub>2</sub> O	2 (20°C) - 7 (40°C)
Kisik	O <sub>2</sub>	< 2
Dušik	N <sub>2</sub>	< 2
Amonijak	NH <sub>3</sub>	< 1
Vodik	H <sub>2</sub>	< 1
Sumporovodik	H <sub>2</sub> S	< 1

Za prosječni sastav bioplina prikazan u tablici 4.1 donja ogrjevna moć iznosi  $H_{d,bp} = 21,6 \text{ MJ/m}^3$ , a gustoća (50% metana)  $\rho_{bp} = 1,22 \text{ kg/m}^3$ . Na kemijskoj razini, supstrati se sastoje od bjelančevina, masti i ugljikohidrata. Tablica 4.2 prikazuje koliko se prosječno bioplina može dobiti od pojedinog sastojka, dok tablica 4.3 prikazuje koliko se prosječno bioplina može dobiti od pojedinog supstrata. Budući da je energetska vrijednost bioplina kemijski vezana u metanu, u tablicama je prikazan i udio metana u nastalom bioplinu.

Tablica 4.2 Prosječni teorijski prinos metana [3]

Supstrat	Prinos bioplina, l plina / kg suhe tvari	Volumni udio CH <sub>4</sub> , %	Volumni udio CO <sub>2</sub> , %
Bjelančevine	700	70	30
Masti	1225	67	33
Ugljikohidrati	795	50	50



Tablica 4.3 Količina bioplina i udio metana u ovisnosti o vrsti supstrata [3]

Supstrat	Prinos bioplina, m <sup>3</sup> /t svježeg supstrata	Udio CH <sub>4</sub> , %
Tekuća gnojnica (krava i goveda)	25	60
Tekuća gnojnica (svinje)	28	65
Žitarice iz destilacije s otpadnim tvarima	40	61
Gnoj goveda	45	60
Gnoj svinja	60	60
Gnoj peradi	80	60
Repica	88	53
Organski otpad	100	61
Sirak	108	54
Stočna repa	111	51
Travnata silaža	172	54
Kukuruzna silaža	202	52

#### 4.2. Izravno izgaranje i iskorištavanje bioplina za proizvodnju topline

Najjednostavniji i najrašireniji način korištenja bioplina je direktno izgaranje u kotlovima ili na kuhinjskim štednjacima. Ovakav način primjene uobičajen je za bioplin proizveden u malim digestorima obiteljskog tipa. Trošila namijenjena za korištenje prirodnog plina mogu bez velikih ili gotovo nikakvih preinaka normalno koristiti i s bioplinom. Kod ovakvog iskorištavanja, bioplin nije potrebno pročititi jer kontaminacija nečistoćama do određene razine ne predstavlja ograničenje, kao što je to slučaj kod nekih drugih primjena. No, prije upotrebe bioplin prolazi proces kondenzacije, eliminacije čestica, kompresije, hlađenja i sušenja.

### 4.3. Kogeneracija toplinske i električne energije

Kogeneracija podrazumijeva istovremenu proizvodnju dva različita oblika energije, a najčešće su to toplinska i električna. Moderna kogeneracijska postrojenja imaju stupanj djelovanja oko 90 %, pri čemu je udio proizvedene električne energije 35%, a toplinske 50% (ostatak su gubici). Električna energija proizvedena u bioplinskim postrojenjima može se koristiti za potrebe uređaja u postrojenju (pumpe, miješalice, kontrolni sustavi,...). No, u mnogim zemljama u kojima je propisana povlaštena cijena za otkup električne energije iz obnovljivih izvora tzv. „*feed in premija*“, sva se proizvedena električna energija predaje u mrežu, a energija potrebna za rad postrojenja kupuje se od distributera po nižoj cijeni. Današnja postrojenja velikih kapaciteta, a bi ostvarila energetske i ekonomske učinkovitost, moraju proizvoditi i toplinsku energiju. Oko trećina proizvedene toplinske energije potrebna je za grijanje digestora, dok se ostatak može koristiti za potrebe industrije, poljoprivrede ili općenito za grijanje raznih objekata. U tvornicama i industrijama je ta potreba donekle konstantna tijekom godine pa je i isporuka takvim potrošačima pogodnija za razliku od grijanja domaćinstava kod kojih potrošnja ovisi o godišnjem dobu.

Plinski motori i općenito uređaji koji rade na višim temperaturama, osjetljiviji su na sadržaj sumporovodika, halogenih ugljikohidrata i siloksana (organski silicijevi spojevi) koji se nalaze u nepročišćenom bioplinu zbog čega ga je prije korištenja u kogeneracijskim postrojenjima potrebno pročititi. Slijedi pregled nekih motora na (bio)plin.

#### 4.3.1. Plinski Ottovi motori

Plinski Ottov motor je motor s unutrašnjim izgaranjem koji radi po Ottovom principu, a kao gorivo koristi plin. Zahtijevaju minimalno 45% metana što znači da mogu raditi s različitim plinovitim gorivima poput prirodnog plina, naftnog plina, bioplina,... To je pogodno kod pokretanja bioplinskog postrojenja kad se toplina koristi za grijanje digestora. Toplinski stupanj djelovanja plinskih motora je od 35 % do 45 %, a onima na bioplin od 1 do 2 posto manji. Na slici 4.2 prikazan je plinski motor tvrtke GE Jenbacher.



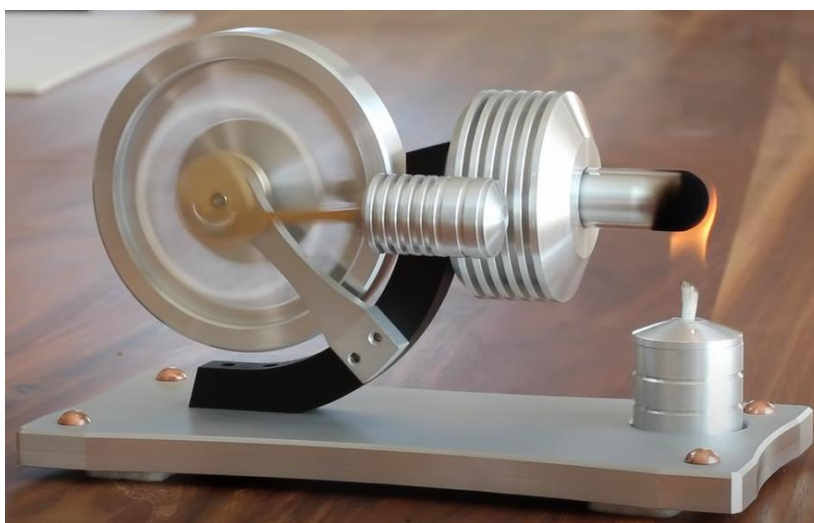
*Slika 4.2 Plinski motor [18]*

#### 4.3.2. Plinski dizelski motor s pilot paljenjem

To je također motor s unutrašnjim izgaranjem koji kao gorivo koristi i plin i dizel (engl. *Dual fuel engine*), a radi po principu dizelskog motora. Smjesa plina i zraka teže se zapali samozapaljenjem uslijed porasta temperature kompresijom za razliku od smjese dizela i zraka. Zbog toga se u točno određenom trenutku kompresije smjese plina i zraka, u cilindar uštrcava mala količina dizela (oko 1%, koja se naziva „pilot gorivo“). Zbog visoke temperature uslijed kompresije, ubrizgano pilot dizelsko gorivo će se samozapaliti, čime će se zapaliti i komprimirana smjesa plina i zraka. Za vrijeme takvog načina rada, motor je moguće prebaciti u normalni rad, samo s dizelskim gorivom, pri bilo kojem opterećenju. A, ako iz nekog razloga dođe do smanjenja ili prekida opskrbe plinom, motor će se sam automatski prebaciti. Povratak na plinsko dizelski način rada moguć je pri opterećenju i do 80%. Na taj se način smanjuje količina ispušnih dimnih plinova, dok učinkovitost motora ostaje ista.[19]

#### 4.3.3. Stirlingov motor

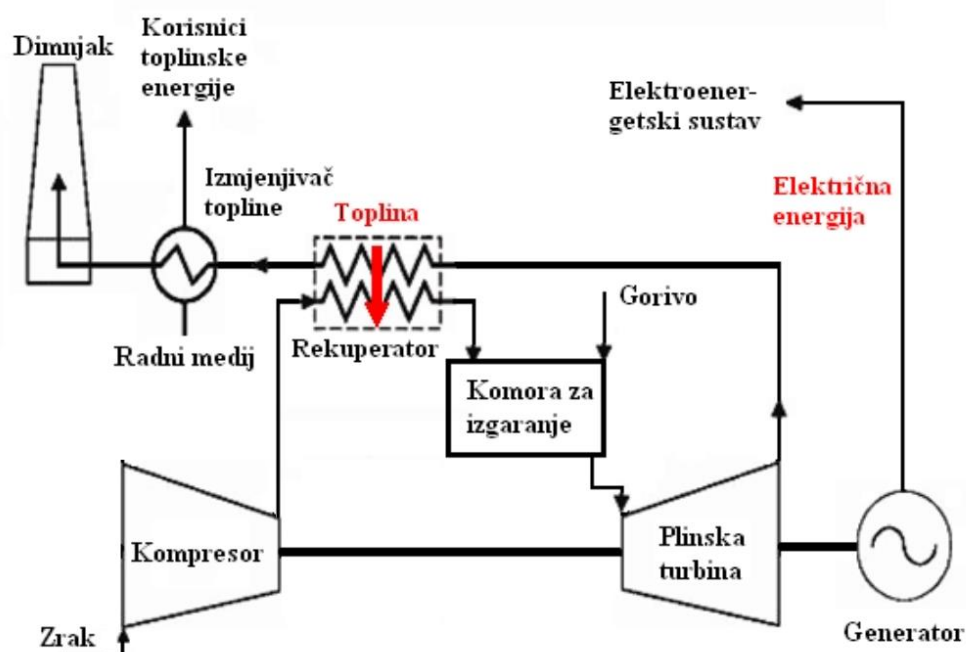
Stirlingov motor (slika 4.3) toplinu potrebnu za proces (za ostvarivanje mehaničkog rada) ne dobiva izgaranjem unutar cilindra već se ona dovodi izvana. Ima više izvedbi, a princip rada je sljedeći. Zrak u cilindru ekspandira uslijed dovođenja topline izvana, čime se klip povezan sa zamašnjakom pomiče. Dovođenje topline izvana, tj. grijanje cilindra, može se izvesti na razne načine, npr. plinskim plamenikom na bioplin. Stupanj djelovanja ovakvih motora je između 24% i 28%, a može se postići električna snaga oko 50 kW električne energije.



Slika 4.3 Stirlingov motor [20]

#### 4.3.4. Bioplinske turbine

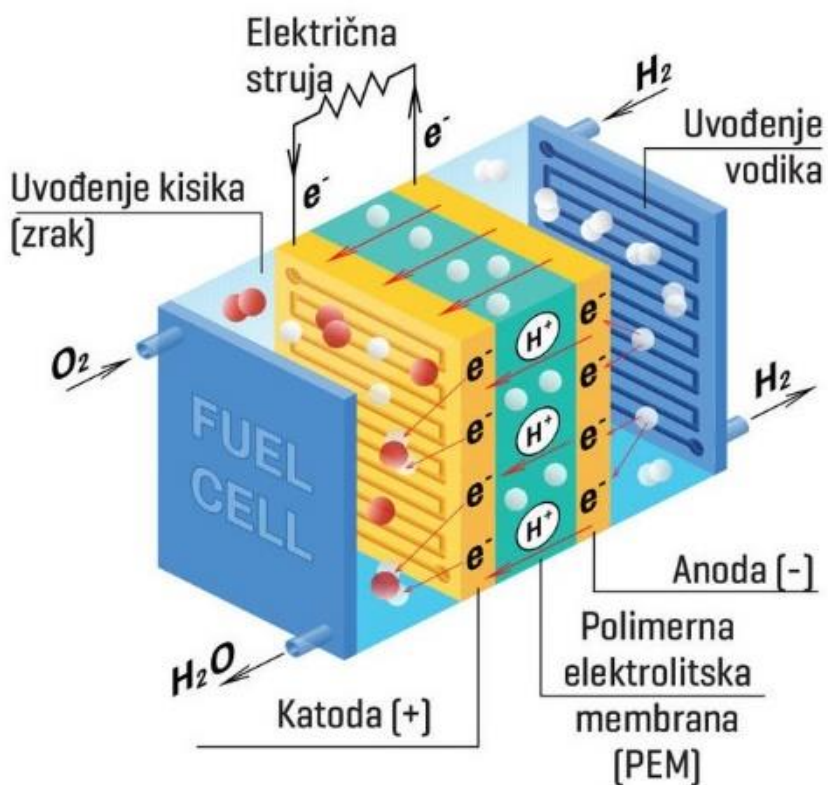
Plinsko turbinsko postrojenje se sastoji od kompresora, komore izgaranja, parne turbine te generatora električne energije. Komprimirani se zrak vodi do komore izgaranja gdje se miješa s gorivom (tekućim ili plinovitim). Nastala smjesa izgara, a vrući se dimni plinovi odvede na turbinu gdje dolazi do njihove ekspanzije i generiranja mehaničkog rada (okretanja turbine). Dio energije se odvodi za pogon kompresora dok se ostatak odvodi na generator električne energije. Nakon prolaska kroz turbinu, ispušni se plinovi mogu provesti kroz rekuperator za predgrijavanje komprimiranog zraka te kroz izmjenjivač topline za grijanje medija u nekom drugom krugu grijanja (slika 4.4). Karakteristična snaga postrojenja koje koriste bioplin je oko 200 kW. Danas su ona još uvijek komercijalno nekonkurentna. No, razvojem materijala i tehnologija, očekuje se da će se u budućnosti smanjiti investicijski troškovi čime bi se mogao povećati broj bioplinskih turbina.



Slika 4.4 Proces u plinskoj turbini [3]

#### 4.3.5. Gorivni članci

Gorivni članci su uređaji u kojima se elektrokemijskim reakcijama vrši neposredna pretvorba kemijske energije goriva u električnu energiju (istosmjernu struju), pri čemu nastaju nusprodukti voda i toplina. Rade slično kao i baterije, ali im je potreban stalan dovod goriva. Sama pretvorba kemijske energije u električnu ne zahtijeva nikakve pokretne dijelove niti je potrebno izgaranje, zbog čega je teoretska učinkovitost gorivnih članaka i do 90%, dok je stvarna između 35 i 60%. Gorivo može biti vodik (najčešće), prirodni plin, metanol pa i biopljin. Bitno je da sadrži vodik. Jedan članak sastoji se od anode (negativne elektrode), sloja elektrolita i katode (pozitivne elektrode) kako je to skicirano na slici 4.5. Na anodi se dešava oksidacija vodika, tj. atom vodika ( $H_2$ , bijele kuglice) se razdvaja na vodikov ion ( $H^+$ ) što je zapravo proton (bijela kuglica) i elektrone ( $e^-$ ). Elektrolitna membrana brani elektronima prolaz kroz nju, dok protone propušta. Zbog toga elektroni do katode moraju ići okolnim putem, čime se stvara istosmjerna struja. Na drugoj strani gorivnog članka, na katodi, dolazi do redukcije kisika ( $O_2$ , crvene kuglice). Protoni, koji su prošli kroz membranu, zajedno sa elektronima, koji su došli okolo, u prisustvu kisika iz zraka reagiraju čime nastaju voda i toplina.



Slika 4.5 Shema gorivnog članka s polimernom membranom [21]

Gorivni članci mogu se podijeliti prema vrsti elektrolita:

- gorivni članci s alkalnim elektrolitom (engl. *Alcalic Fuell Cells*, AFC)
- gorivni članci s polimernom membranom (engl. *Proton Exchange Membrane Fuell Cells*, PEMF)
- gorivni članci s fosfornom kiselinom(engl. *Phosphoric Acid Fuell Cells*, PACF)
- gorivni članci s rastaljenim karbonatima (engl. *Molten Carbonate Fuel Cells*, MCFC)
- gorivni članci s krutim oksidima (engl. *Solid Oxide Fuel Cells*, SOFC).

U tablici 4.4 navedena su svojstva pojedinih gorivnih članaka. Kao što je već rečeno, kao gorivo se koristi vodik koji se može dobiti iz metana (reformirani vodik) koji je glavni sastojak bioplina. Gorivni članci s polimernom membranom su osjetljivi na nečistoće u plinu i na sadržaj ugljikovog dioksida kojeg također ima u bioplinu. Nešto manje osjetljivi na ugljični dioksid su gorivni članci s fosfornom kiselinom, a gorivni članci s krutim oksidom nisu osjetljivi na prisutnost sumpora. Za korištenje bioplina kao gorivo u gorivnim člancima potrebno ga je prethodno pročistiti.

*Tablica 4.4 Usporedba gorivnih članaka [2]*

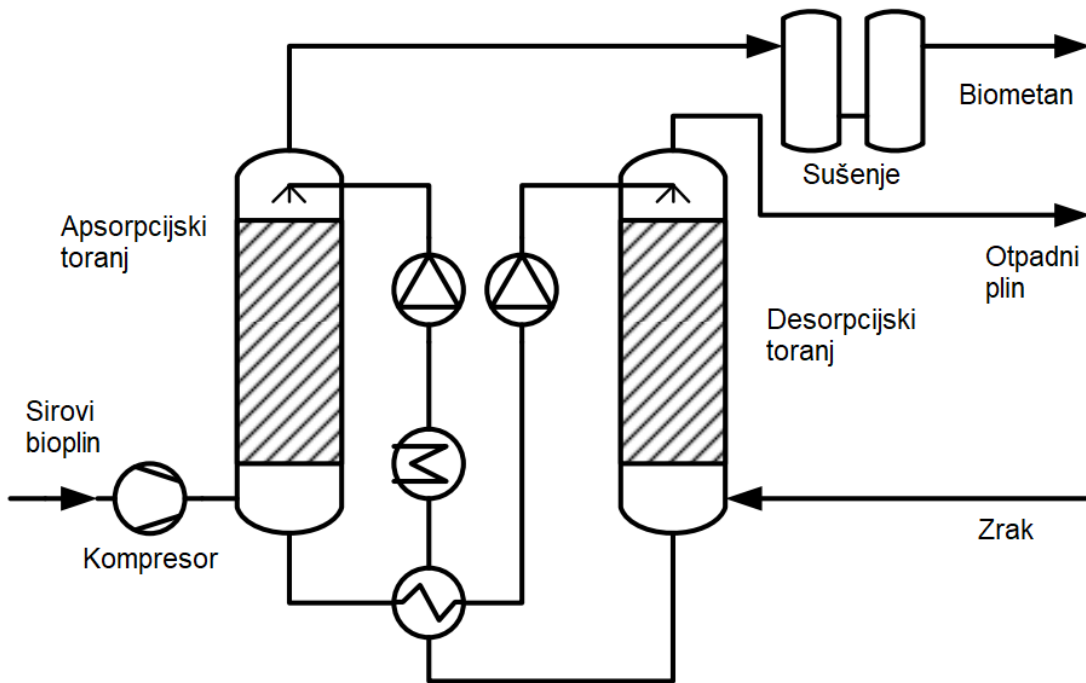
<b>Gorivni članak</b>	<b>AFC</b>	<b>PEMFC</b>	<b>PAFC</b>	<b>MCFC</b>	<b>SOFC</b>
<b><math>\theta</math>, °C</b>	100	80 - 90	200 - 250	650	800 - 1000
<b><math>\eta_{\text{els}}</math> %</b>	70	50 - 60	40	50 - 60	50 - 60
<b>Gorivo</b>	vodik	vodik (reformirani)	vodik (reformirani)	vodik (reformirani)	vodik (reformirani) i CO
<b>Pretvorba goriva</b>	-	vanjska	vanjska	vanjska i unutarnja	vanjska i unutarnja
<b>Oksidans</b>	kisik	kisik ili zrak	kisik ili zrak	kisik ili zrak i CO <sub>2</sub>	kisik ili zrak
<b>Područje primjene</b>	svemirska tehnika	vozila i kogeneracija (manjih snaga)	kogeneracija (manjih snaga)	kogeneracija (većih snaga)	kogeneracija (većih snaga)
<b>Raspon snaga</b>	1 W – 100 kW	1 W – 100 kW	10 kW – 1 MW	100 kW – 10 MW	1 kW – 10 MW

#### 4.4. Proizvodnja biometana (dorada/pročišćavanje bioplina)

Najvažniji sastojak bioplina je metan, jer je glavni nositelj ogrjevne moći bioplina i jer prevladava volumnim udjelom od 50 % do 75 %. Takav se bioplin može iskorištavati za direktno izgaranje u trošilima manjih snaga poput kuhinjskog štednjaka i sl. Postupak pročišćavanja bioplina još se naziva i dorada bioplina u biometan. Tu se ponajprije misli na uklanjanje ugljikovog dioksida, sumpora i siloksana s ciljem povećanja udjela metana. Za bioplin možemo reći da je biometan kada mu je minimalni udio metana 95 %. Ugljikov dioksid zauzima od 25 % do 45 % volumena bioplina, a kako je on produkt izgaranja, ne pridonosi ogrjevnoj moći bioplina već ju smanjuje. Sumpor se u bioplinu nalazi kao sumporovodik s udjelom manjim od 1 %. Iako izgara, tj. pridonosi ogrjevnoj moći, može uzrokovati koroziju dijelova motora ili turbina, zbog čega ga također treba ukloniti. Siloksani su organski silicijevi spojevi koji se upotrebljavaju u kozmetičkoj, prehrambenoj i automobilskoj industriji. Zbog toga ih se u većim udjelima može naći u deponijskom plinu i bioplinu nastalom u postrojenjima za obradu otpadnih voda. Izgaranjem na visokim temperaturama iz siloksana nastaju silicijev dioksid  $\text{SiO}_2$ , te općenito silikati koji stvaraju naslage na dijelovima motora i turbina čime može doći do njihovog oštećenja.

Za pročišćavanje bioplina najčešće se koriste apsorpcijski procesi (otapanje u vodi i otapanje pomoću organskih otapala), adsorpcijski procesi (adsorpcija pod tlakom) te metoda separacije kroz poliamidnu membranu. Apsorpcijski se procesi temelje na različitoj topivosti različitih sudionika plina u tekućoj otopini za pranje (engl. *scrubbing*). U tim uređajima, tornjevima za pranje („skruberima“), dolazi do kontakta između bioplina i tekućine, gdje se lakše topivi ugljikov dioksid odvodi s tekućinom na dnu, dok se pročišćeni bioplin odvodi na vrhu tornja. Kao tekućine (otapala) mogu se koristiti voda, polietilen glikol i amini. U postrojenjima s vodom (slika 4.6) komponente apsorbiranog plina fizički se vežu za vodu. Topivost ugljikovog dioksida u vodi veća je pri nižim temperaturama i većim tlakovima. Uz ugljikov dioksid, otopit će se i sumporovodik, amonijak i u puno manjoj količini, metan. Takva se voda odvodi u izmjenjivač topline u kojem se manji dio plinova (većinom ugljični dioksid i metan) opet oslobode i vode natrag na ulaz sirovog plina, dok se preostala voda odvodi u desorpcijski toranj. Tamo se u protustruji zraka oslobađa preostali ugljični dioksid, čime se voda regenerira te ju se ponovno može upotrijebiti za apsorpciju. Ovakvim vođenjem procesa, dio ugljikovog dioksida se vraća u struju sirovog bioplina, ali se u otpadni plin ispušta puno manja količina metana. Nastali je biometan potrebno osušiti zbog vode koja je ishlapila u struji bioplina u apsorpcijskom tornju.

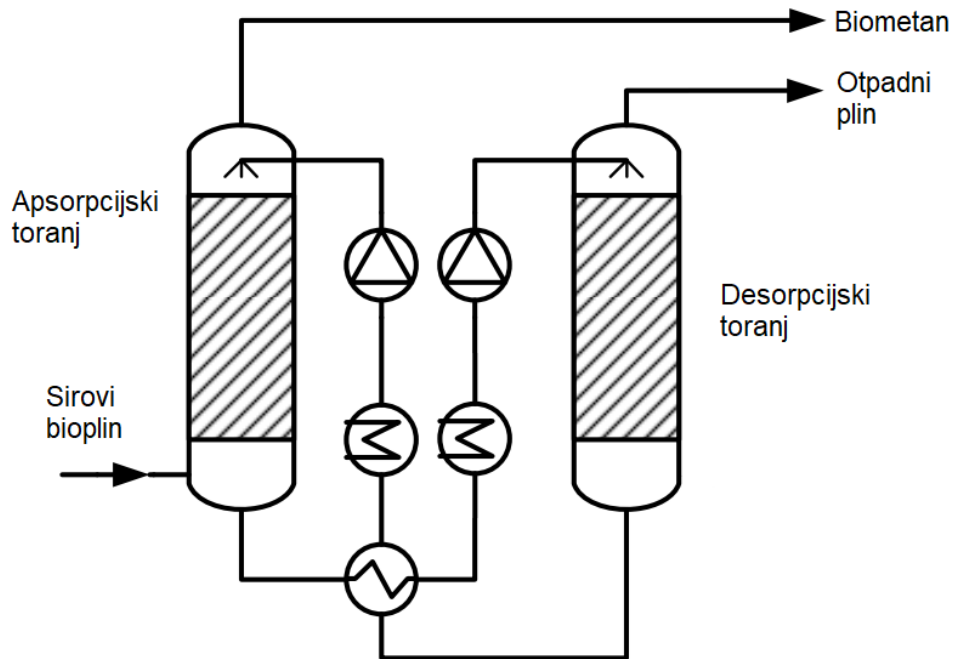




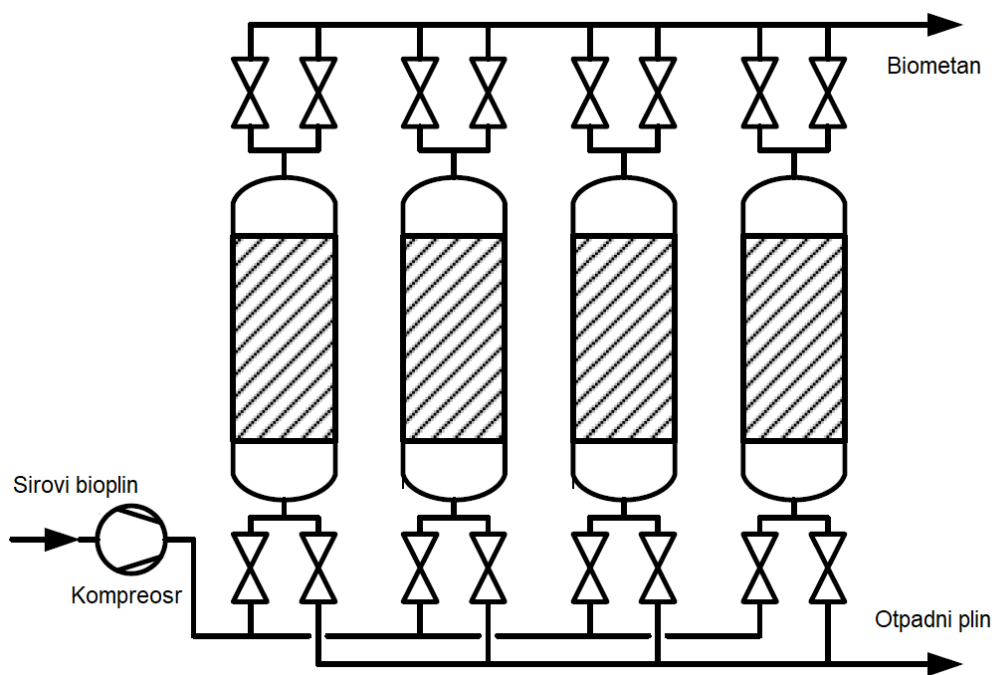
Slika 4.6 Shema postrojenja za pročišćavanje bioplina apsorpcijskim procesom s vodom kao otapalo[22]

Sličan se proces može provesti i s organskim otapalima poput polietilen glikola. Time se proces poboljšava budući da je ugljikov dioksid bolje topiv u njima nego u vodi.

U postrojenjima s aminom (slika 4.7), uz fizičku apsorpciju, dešava se i kemijska reakcija između komponenti otapala i komponenti apsorbiranog plina. Amini su derivati amonijaka ( $\text{NH}_3$ ), što znači da se jedan ili više atoma vodika zamijeni s jednom ili više alkilnih skupina. Amini apsorbeni su monoetanolamin (MEA,  $\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$ ), dietaloamin (DEA,  $\text{C}_4\text{H}_{11}\text{NO}_2$ ), metildietalonamin (MDEA,  $\text{CH}_3\text{N}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OH})_2$ ), a otapalo nastane miješanjem jednog od njih s vodom. U takvim se aminskim otapalima kemijske reakcije dešavaju s neželjenim sastojcima biometana ( $\text{CO}_2$ ), čime se oni čvršće vežu za otapalo te ostavljaju „manje mjesta“ za apsorpciju metana. Ovom se metodom bioplin najbolje pročišćava, tj. dobiva se biometan s više od 99% metana. Za otpuštanje ugljikovog dioksida u desorpcijskom tornju potrebna je visoka temperatura, oko  $160\text{ }^\circ\text{C}$ . Ovim bi se postupkom mogao ukloniti i sumporovodik, no u procesu regeneracije otapala bile bi potrebne još veće temperature, zbog čega se on obično uklanja prije. Najjednostavniji i najefikasniji način smanjenja količine sumporovodika je primjena aktivnog ugljena. On se također koristi i za uklanjanje siloksana.



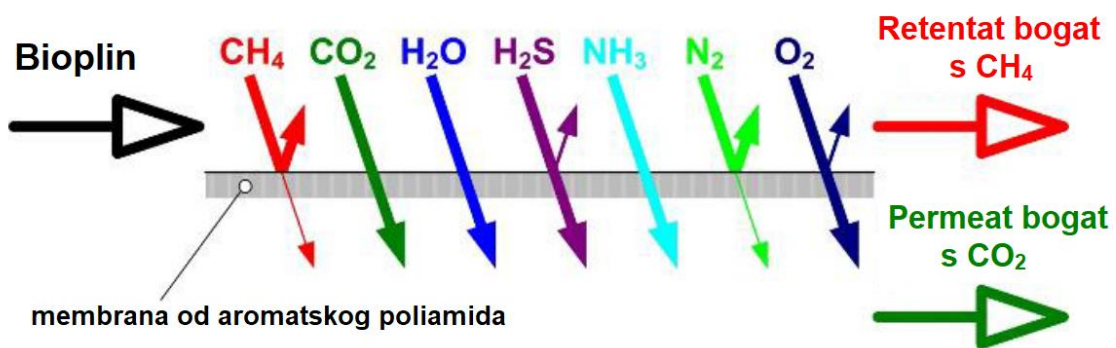
Slika 4.7 Shema postrojenja za pročišćavanje bioplina apsorpcijskim procesom s aminom kao otapalo [22]



Slika 4.8 Shema postrojenja za pročišćavanje bioplina adsorpcijskim procesom s varijacijama tlaka [22]

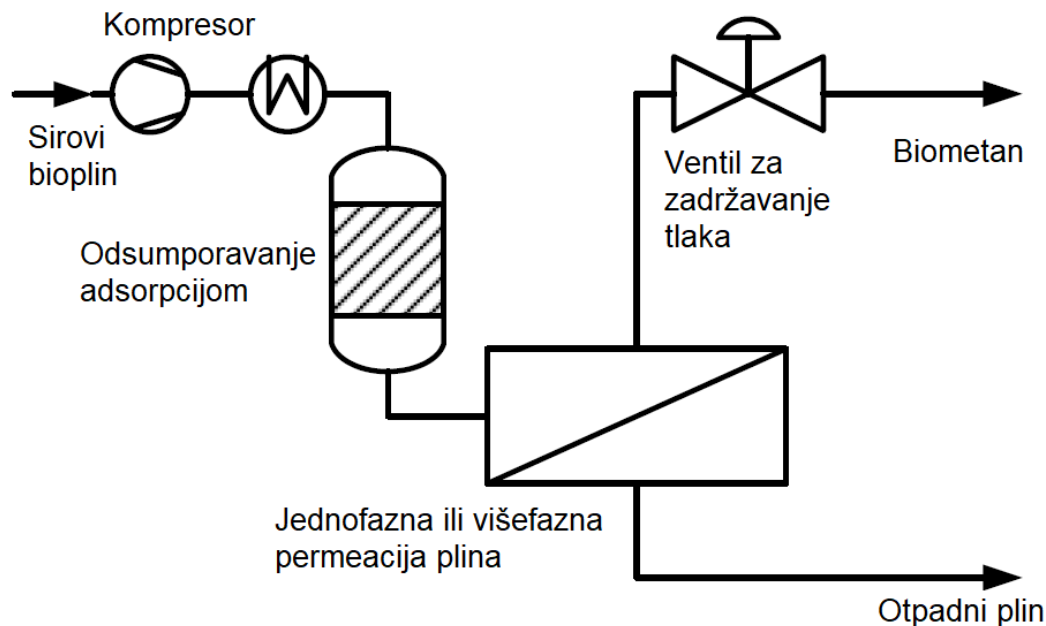
Kod adsorpcijskih procesa koriste se kruti sorbenti poput aktivnog ugljena i zeolita, a postupak se naziva adsorpcija s varijacijama tlaka (engl. *Pressure Swing Adsorption*, PSA). Aktivni ugljen je ugljik obrađen na takav način da je vrlo porozan, dok je zeolit vrsta visoko poroznog kristalnog aluminijevog silikata. Adsorpcijska svojstva proizlaze iz njihove poroznosti. Povećanjem tlaka struje bioplina ugljikov dioksid se adsorbira čime se povećava udio metana u izlaznoj struji. Zasićenjem adsorbenta potrebno ga je regenerirati što se radi postupnim smanjivanjem tlaka. Postrojenja imaju više povezanih uređaja kako bi proizvodnja bila kontinuirana (slika 4.8).

Bioplin se može pročititi i membranskom permeacijom odnosno, propuštanjem kroz membranu koja može biti od polisulfona, poliamida ili polidimetilsiloksana. Kroz nju neometano prolaze ugljikov dioksid, voda i amonijak, nešto slabije sumporovodik i kisik, a najslabije metan i dušik (slika 4.9). Retentat predstavlja onaj dio ulazne struje koji nije prošao kroz membranu, dok se onaj dio koji je prošao naziva permeat. U slučaju pročišćavanja bioplina retentat je biometan, a permeat je otpadni plin.



Slika 4.9 Princip separacije plina pomoću poliamidne membrane [23]

Membrane se najčešće nalaze u obliku šupljih vlakana, koje su spojene u membranski modul. Kroz te „cjevčice“ struji bioplin pod tlakom dok s vanjske strane vlakna prevladava atmosferski tlak. Zbog te razlike u tlakovima dolazi do strujanja plina okomito na smjer pružanja membrane tj. dolazi do separacije plinova. Na slici 4.10 prikazana je shema postrojenja s membranskom permeacijom. Nakon kompresije, bioplin se hladi radi sušenja i otklanjanja amonijaka. Zatim se bioplin opet zagrijava otpadnom toplinom iz kompresora nakon čega se otklanja sumporovodik putem adsorpcije. Iako se amonijak i sumporovodik mogu odvojiti u membrani, oni ju oštećuju, pa se obično izdvajaju prije.



Slika 4.10 Shema postrojenja za pročišćavanje bioplina membranskom permeacijom [22]

#### 4.5. Biometan kao transportno gorivo

Korištenje biometana kao pogonsko gorivo u prometu ima veliki potencijal. Termin „auti na plin“ u žargonu, najčešće podrazumijeva korištenje ukapljenog naftnog plina (UNP, engl. *Liquefied Petroleum Gas*, LPG). UNP se sastoji od propana ( $C_3H_8$ ) i butana ( $C_4H_{10}$ ), dok se biometanom smatra bioplin s minimalno 95% metana. U automobilskoj su industriji kriteriji još stroži zbog čega se traži da udio metana u biometanu bude 99%, i tad ima iste karakteristike kao i prirodni plin. Za pogon vozila u prometu može se koristiti kao ukapljeni prirodni plin (UPP, engl. *Liquefied Natural Gas*, LNG) ili kao stlačeni prirodni plin (SPP, engl. *Compressed Natural Gas*, CNG). UPP se ukapljuje na  $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ , na okolišnom tlaku, čime mu se volumen smanji oko 600 puta. SPP se komprimira na 200 – 250 bar pri okolišnoj temperaturi. U tim uvjetima metan se ponaša kao kritični fluid i zauzima manje od 1% volumena kojeg bi zauzimaao pri standardnim uvjetima.

Danas se proizvode vozila koja imaju tvornički ugrađen plin, tj. koriste UNP, UPP ili SPP za pogon. Moguća je i prenamjena već postojećih vozila koja za pogon koriste benzin ili dizel na plin ili kombinaciju plina i benzina/dizela. Češće se prenamjenjuju za korištenje UNP-a, rjeđe za korištenje SPP-a, dok se prenamjena za korištenje UPP-a ne radi. Razlog tome je što je za ukapljivanje naftnog plina dovoljna kompresija, dok se za ukapljivanje prirodnog plina mora sniziti temperatura ( $\vartheta_{\text{ukap. pp}} = -162 \text{ }^\circ\text{C}$ ), a puno je lakše i jeftinije komprimirati npr., na 2 – 8 bar, nego hladiti i održavati tako niske temperature. Također spremnici za održavanje niskih temperatura imaju više investicijske troškove i veće troškove rada i održavanja zbog čega je općenito manje takvih punionica, a samim tim i manje takvih vozila. Za prenamjenu vozila na korištenje UPP-a takvi bi se spremnici trebali ugrađivati i u vozila, naravno puno manjeg volumena, čime onda ekonomska (pa i ekološka) računica postaje upitna. No, kako ovdje govorimo o biometanu nastalom iz bioplina, a budući da se ukapljivanje koristi za ekonomičan prijevoz metana nastalog na dalekim nalazištima, zadržat ćemo se na mogućoj primjeni biometana, tj. na stlačenom prirodnom plinu. Zbog razvoja tehnologije, SPP se sve više koristiti u cestovnom prometu. Najveće uštede se ostvaruju u javnom prijevozu, taksi službama te općenito cestovnim vozilima koje prelaze velike udaljenosti. Neke prednosti korištenja SPP-a u transportu su:

- korištenje motora s unutrašnjim izgaranjem što olakšava prenamjenu postojećih vozila, edukaciju automehaničara, ...
- relativno mali trošak ugradnje, oko 2 500 € za osobni automobil,
- niži troškovi održavanja u odnosu na vozila na benzin/dizel i UNP,
- vozila na SPP su sigurnija od požara i eksplozije od onih na tekuća goriva zbog uvjeta zapaljivosti metana; temperatura samozapaljenja je  $540^\circ\text{C}$ , a koncentracija u zraku mora biti od 5 do 15 %, uz to metan je lakši od zraka, pa vrlo brzo nestaje s mjesta nesreće prilikom eventualnog propuštanja,
- značajno manje zagađenje u usporedbi s benzinskim motorom (tablica 4.5),
- veća učinkovitost zbog boljeg miješanja plinovitog goriva sa zrakom (veći udio potpunog izgaranja).

Tablica 4.5 Smanjenje emisija dimnih plinova u motoru na SPP u odnosu na benzin za istu kilometražu [24]

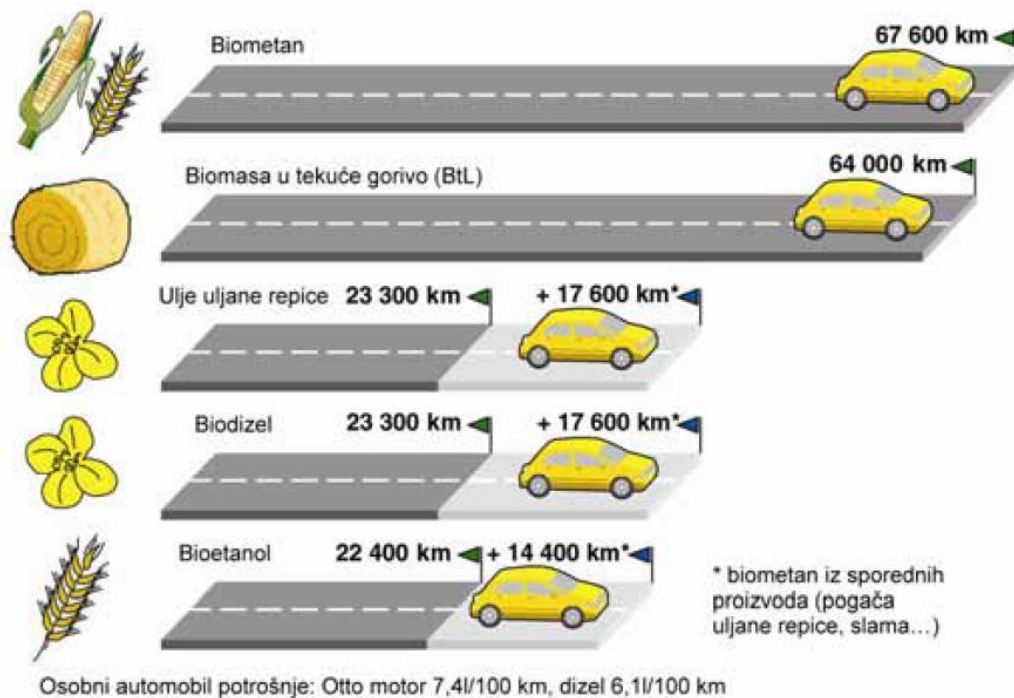
Sastojak dimnih plinova	Smanjenje emisije, %
CO <sub>2</sub>	26
CO	90 - 97
NO <sub>x</sub>	50
SO <sub>x</sub>	~ 99
Krute čestice	100

Stlačeni prirodni plin koristi se desecima godina, no kao gorivo u svjetskom prometu zauzima tek 0,4 %. Glavni razlog tako male zastupljenosti je mala gustoća energije u odnosu na druga goriva. Ista količina energije sadržana u 1 m<sup>3</sup> SPP-a nalazi se u 0,42 m<sup>3</sup> UNP-a (-58 %) te 0,25 m<sup>3</sup> benzina (-75 %). Drugim riječima, za jednaki volumen SPP-a, UNP-a i benzina, vozilo na SPP će prijeći najmanju udaljenost, što znači da će automobil trebati češće puniti, a još uvijek velik broj benzinskih postaja nije opremljen za punjenje UNP-om, a kamoli SPP-om. Nadalje, iako je cijena ugradnje relativno mala, prosječni korisnik na godišnjoj bazi ne prelazi dovoljnu udaljenost da bi ušteda na gorivu i održavanju predstavila značajan poticaj. S druge strane, povećanjem korištenja SPP-a povećati će se i slučajna istjecanja metana koji ima 25 puta veći GWP<sup>3</sup> od ugljikovog dioksida za razdoblje od 100 godina. Uz sve to, u obzir treba uzeti želje i razmišljanja potrošača što naravno, ovisi od države do države. U prosjeku ljudi nisu vični korištenju plina u prometu, što zbog neznanja, što zbog stava ali i uživanja mogućnosti benzinskih motora.

Uspoređujući biogoriva općenito, biometan ima najveći potencijal kao buduće prihvatljivo gorivo upotrebljivo u komercijalne svrhe. Slika 4.11 prikazuje usporedbu transportnih biogoriva po prijedenoj udaljenosti prilikom korištenja biogoriva proizvedenog na jednom hektaru obradivog zemljišta. Potencijal bioplina, a time i biometana je veći ako se za proces anaerobne digestije koristi organski otpad umjesto energetske usjeva.

---

<sup>3</sup> Engl. *Global Warming Potential, GWP* – Potencijal globalnog zatopljenja, broj koji pokazuje koliki je relativni utjecaj te tvari na stvaranje efekta staklenika u odnosu na utjecaj 1 kg CO<sub>2</sub>, mjera štetnosti plinova



Slika 4.11 Usporedba prijedene udaljenosti u km osobnim automobilom u ovisnosti o vrsti biogoriva proizvedenog na 1 ha [3]

#### 4.6. Distribucija biometana putem plinske mreže

Bioplin se nakon pročišćavanja može komprimirati na potrebni tlak i distribuirati putem plinske mreže. Ovisno o količini i namjeni korištenja, većina zemalja zakonski garantira proizvođačima plasman biometana u plinsku mrežu. Prednosti takve eksploatacije bioplina su povezivanje mjesta proizvodnje, koje je obično udaljeno u ruralnoj zoni s područjem veće populacije čime se ostvaruje pristup novim potrošačima. Isporuka bioplina u plinsku mrežu znači da bioplinsko postrojenje, uz postrojenje za pročišćavanje, može imati manju kogeneracijsku jedinicu jer dio bioplina šalje u mrežu. Standardima su propisani sastav i svojstva koja bioplin mora zadovoljavati kako ne bi došlo do onečišćenja plinske mreže i eventualnih problema prilikom korištenja. U većini slučajeva bioplin se lako pročisti do kvalitete plinske mreže pomoću postojećih metoda (poglavlje 4.4), no kod nekih slučajeva deponijskog plina to nije moguće radi prevelikog udjela dušika.

## 5. UPORABA DIGESTATA

Procesom anaerobne digestije, kao što je već rečeno, nastaju bioplin i digestat. Korištenje poljoprivrednih sirovina za njihovo dobivanje te vraćanje digestata kao gnojiva u okoliš zatvara se ciklus hranjivih tvar. Takva poljoprivredna praksa, uz ekonomske troškove i korist, u obzir uzima i socio-ekonomke te aspekte okoliša. Dok je korist od uporabe bioplina, na prvu, jasnija (dobivanje topline i struje), poljoprivrednici su s vremenom prepoznali poboljšanja stajskog gnoja prerađenog u digestat.

### 5.1. AD tehnologija za upravljanje krutim i tekućim stajskim gnojem

Povećanje ljudske populacije prati povećanje industrijske i poljoprivredne proizvodnje. Povećavaju se proizvodni kapaciteti već postojećih, ali se i grade nove tvornice i farme. Na nekim je farmama proizvodnja toliko porasla da gospodarstva nisu imala dovoljno obradive površine za vlastitu proizvodnju stočarske hrane, a istovremeno su imala toliko gnoja kojeg nisu imali kamo upotrijebiti. Pretjerano gnojenje ili gnojenje prejakim gnojem može dovesti do:

- zagađenja površinskih i podzemnih voda,
- oštećivanja strukture i mikrobiologije tla,
- oštećivanje specifičnih populacija vegetacije pašnjaka i formiranja „vegetacijske gnojnice“ ,
- rizik od porasta emisija metana i amonijaka,
- pojava neugodnih mirisa i insekata, od skladištenja gnoja do njegove primjene,
- rizik kontaminacije i širenja patogena.

Ovi se problemi mogu riješiti tretiranjem gnoja anaerobnom digestijom.

### 5.2. Od gnojnice do digestata i gnojiva

Procesom AD-a dolazi do biološke razgradnje organskih sastojaka na anorganske tvari i metan. U digestorima, u prosjeku stopa razgradnje goveđeg gnoja iznosi 40 %, a svinjskog 65 %. Stopa razgradnje ovisi o vrsti sirovine, vremenu hidrauličke retencije i temperaturi procesa. Zbog razgradnje organskog dijela, digestat je lakše prepumpavati i primijeniti na tlo kao gnojivo nego nedigestiranu gnojnicu. Uz to, smanjuje se i udio tvari koje stvaraju neugodne mirise (hlapljive kiseline, fenoli i njegovi derivati). Praksa pokazuje da se anaerobnom digestijom može smanjiti i do 80 % neugodnih mirisa. To podrazumijeva smanjenje intenziteta i kraće vrijeme zadržavanja mirisa, ali i „pozitivnu“ promjenu sastava mirisa. Naime, kako su se razgradili sastojci koji uzrokuju



neugodne mirise, digestat više nema karakterističan miris gnojnice, nego miris sličan amonijaku. Čak i otvorenim skladištenjem na dulje vrijeme, digestat ne pokazuje značajnije povećanje emisija neugodnih mirisa.

Anaerobna digestija služi i za sanitaciju gnoja, odnosno onesposobljavanje virusa, bakterija i parazita. Njezina učinkovitost ovisi o vremenu zadržavanja supstrata u digestoru, temperaturi procesa, tehnici miješanja i tipu digestora. Najbolja sanitacija se ostvaruje pri temperaturama od 50 °C do 55 °C (termofilna temperaturna zona) uz adekvatno miješanje i vrijeme retencije. Za osiguranje veterinarske sigurnosti recikliranja digestata kao gnojiva, europsko zakonodavstvo zahtijeva određenu sanitaciju ako je supstrat životinjskog porijekla. Ovisno o vrsti sirovine, provodi se pasterizacija ili sterilizacija pod tlakom prije unosa u digestor. Također, sanitacijom se postiže smanjenje klijavosti sjemena korova.

U svježem se stajskom gnoju nalaze masne kiseline (octena kiselina) koje mogu izazvati „opekline“ na listovima biljaka. Kako je spomenuto u 2. poglavlju, te se kiseline razgrađuju procesom anaerobne digestije, pa se korištenjem digestata uvelike smanjuje rizik od stvaranja opeklina. Uz to, sastav i homogenost digestata mu omogućuju da lakše klizne s listova biljaka za razliku od svježeg gnoja, zbog čega se smanjuje vrijeme dodira s biljkom.

Za vrijeme samog procesa anaerobne digestije dolazi do mineraliziranja organsko vezanih hranjivih tvari, poput dušika, čime postaju lako dostupni biljkama. Općenito, digestat ima niži omjer C/N u odnosu na svježi gnoj, što ga čini boljim u kratkoročnom učinku dušikove gnojidbe. Previsoki omjer C/N omogućuje mikroorganizmima zadržavanje u tlu zbog viška lako dostupnog dušika.

### **5.3. Primjena digestata kao gnojiva**

Digestat je homogena smjesa nerazgrađenog dijela supstrata koji ima bolji odnos dušika i fosfora u odnosu na sirovi gnoj. Mora imati deklarirani sastav hranjivih tvari za biljke kako bi ga poljoprivrednici mogli na ispravan način uklopiti u svoje gnojidbene planove. Korištenjem digestata na ispravan način značajno raste iskoristivost dušika, odnosno smanjuju se gubici protjecanjem i isparavanjem. Za optimalno korištenje digestata primjenjuju se isti osnovni principi gnojenja kao i kod netretiranih gnojiva:

- dovoljan kapacitet skladišta (najmanje za 6 mjeseci),
- ograničena sezona primjena gnojiva (tijekom vegetacije),
- količina gnojiva po hektaru (prema planu gnojidbe),

- tehnika primjene gnojiva (neposredna primjena i minimalni gubitak hranjivih tvari).

Još neki savjeti dobre poljoprivredne prakse za korištenje digestata kao gnojivo su:

- izbjegavati previše miješanja digestata prije primjene,
- primjenjivati samo ohlađeni digestat iz spremišta ,
- primjena na polju mora biti pomoću cijevi ili crijeva na povlačenje radi što izravnijeg ubrizgavanja u tlo (disk ubrizgivač),
- ako se primjenjuje na površini tla, obavezno je i zaoravanje u tlo,
- ovisno o usjevu, digestat bi se trebao primijeniti na početku sezone rasta ili tijekom rasta vegetacije,
- primjena kod ozimih usjeva trebala bi početi s trećinom ukupne potrebe za dušikom,
- optimalni uvjeti za primjenu digestata su kišno vrijeme, visoka vlaga i vrijeme bez vjetra.

#### **5.4. Učinci primjene digestata na tlo**

Prilikom razgradnje organske tvari za vrijeme anaerobne digestije razgrađuju se ugljikove veze, organske kiseline, tvari koji uzrokuju neugodne mirise, ... Njihovom odsutnošću u digestatu koji se upotrijebi kao gnojivo stvara se ugodnije okruženje za organizme u tlu u usporedbi s primjenom sirovog gnoja. Direktna mjerenja BPK (biološka potrošnja kisika) digestirane goveđe i svinjske gnojnice pokazala su 10 puta manju potražnju za kisikom nego u slučaju nedigestirane gnojnice. To znači da tlo na kojem se koristio digestat neće ući u anaerobnu fazu, tj. biljke i organizmi u tlu će imati dovoljno kisika iz digestata te ga neće morati crpiti iz tla. Zbog toga u tlu ostaje dovoljno kisika čime se smanjuje mogućnost nastajanja anaerobnih zona u kojima se nalazi dušik koji biljke ne mogu direktno iskoristiti. Također, korištenjem digestata povećava se sposobnost stvaranja novog tla i reprodukcija humusa kroz dostavljenu organski tvar u odnosu na netretirana gnojiva.

#### **5.5. Kondicioniranje digestata**

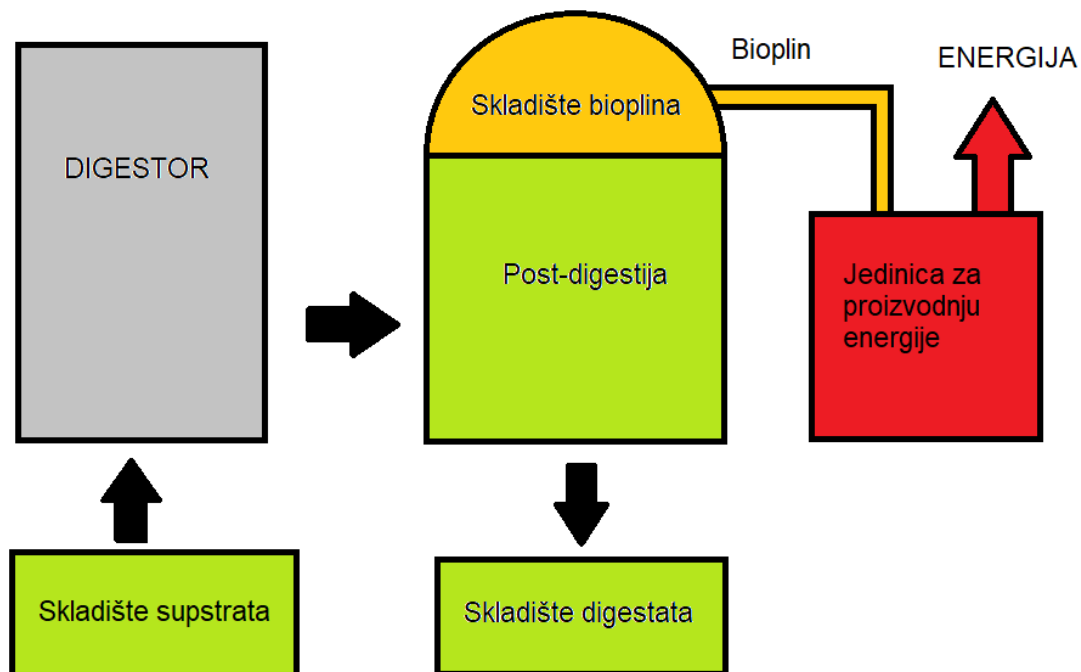
Digestat ima veliki udio tekućine, a time i veliki volumen. Kondicioniranje digestata podrazumijeva smanjenje njegovog volumena uklanjanjem vode što dovodi do povećanja koncentracije hranjivih tvari. Postupak se naročito provodi na područjima s intenzivnim stočarstvom gdje postoji višak hranjivih tvari u stajskom gnoju, a premalo zemljišta za njegovu primjenu. Zbog toga ga je potrebno transportirati na neka druga mjesta, što je naravno lakše i ekonomičnije s manjim volumenom.

Digestat se može kondicionirati djelomično i potpuno. Učinkovitost procesa anaerobne digestije sa supstratom iz poljoprivrede iznosi od 50 % do 60 %, što znači da digestat sadrži 40 % do 50 % suhe organske tvari s početka procesa koja se nalazi u obliku vlakana. Djelomično kondicioniranje razdvaja digestat na krute tvari (vlakna) i na tekući dio. Krute se tvari odvoje pomoću vijčanih separatora ili dekantora, dok tekućina ostane na dnu posude za kondicioniranje. Djelomično kondicioniranje koristi se kod digestata s većim udjelom fosfora, jer je on u obliku fosfata vezan za vlakna. Kao gnojivo se primjenjuje tekući dio u kojem je više dušika. Izdvojena su se vlakna koristila za proizvodnju komercijalnog komposta ili za grijanje u kotlovima na drva (ako je udio suhe tvari bio veći od 45 %). Danas se ona najčešće vraćaju natrag u digester čime se povećava udio suhe tvari u ulaznoj sirovini. Potpunim se kondicioniranjem digestat razdvaja na vodu, koncentrat hranjivih tvari i organska vlakna. Tako pročišćena voda može se ispustiti u okoliš, dok se hranjive tvari i vlakna puno lakše prevezu do mjesta. Takvo se kondicioniranje najčešće primjenjuje u poljoprivrednim područjima s viškom dušika.

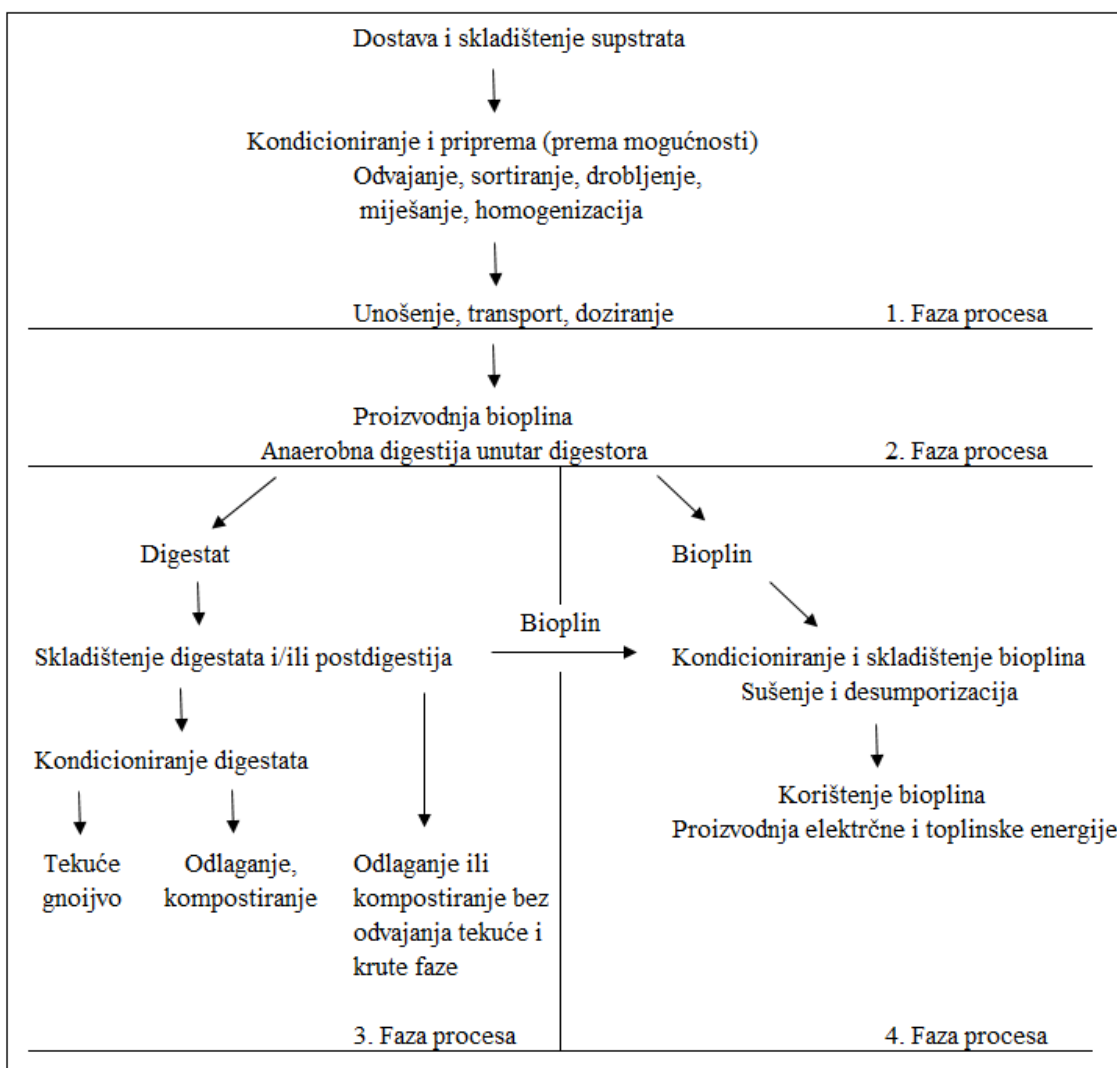
## 6. DIJELOVI BIOPLINSKOG POSTROJENJA

Bioplinska postrojenja sastoje se od nekoliko glavnih dijelova čiji izgled ovisi o vrsti i količini supstrata koji se koristi. Kako se za proces anaerobne digestije može koristiti različita biomasa, postoje različite tehnike i tehnologije za preradu pojedine sirovine, različite konstrukcije digestora odnosno različito vođenje samog procesa. Uz to, mogu se upotrijebiti i različite metode za kondicioniranje digestata, skladištenje i korištenje bioplina.

Osnovni dio bioplinskog postrojenja je digestor (naziva se još i *fermentor* te *bioplinski reaktor*). U njemu se odvija glavni proces anaerobne digestije, a kako je već spomenuto manji dio se može odvijati i izvan njega. Ostale komponente su skladište supstrata, skladište digestata, skladište bioplina te u ovisnosti o načinu iskorištavanja bioplina ili jedinica za proizvodnju energije ili mjerno-redukcijska stanica za injektiranje u plinsku mrežu. Na slici 6.1 prikazana je jedna od mogućih shema bioplinskog postrojenja.



Slika 6.1 Shema i osnovni dijelovi bioplinskog postrojenja [3]

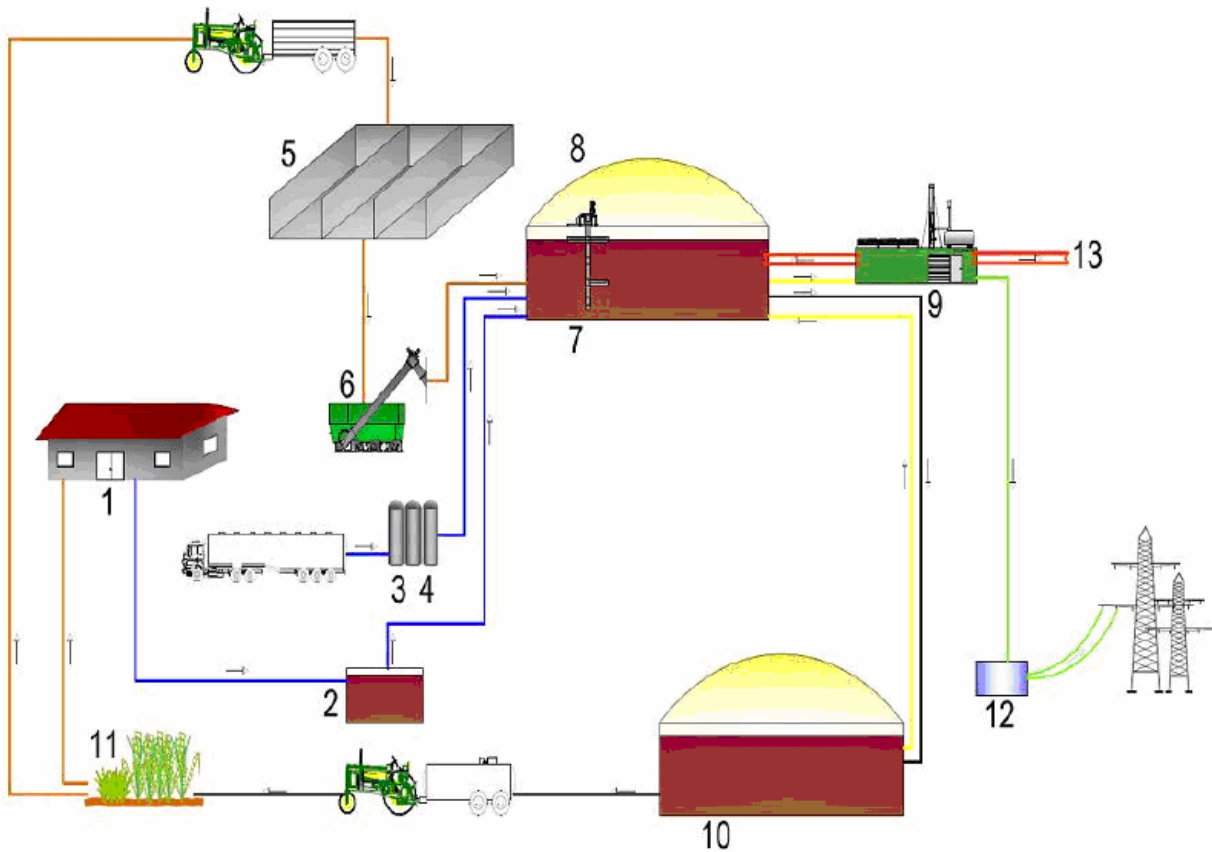


Slika 6.2 Procesne faze proizvodnje bioplina iz poljoprivredne biomase [3]

Osnovne faze procesa proizvodnje bioplina prikazane su na slici 6.2 dok slika 6.3 prikazuje njihov slikovitiji (jednostavniji) prikaz. Te faze su:

1. faza procesa (skladištenje, kondicioniranje, transport i punjenje sirovinom) uključuje spremnik za skladištenje stajskog gnoja (2), posude za sakupljanje organskog otpada (3), spremnik za sanitaciju (4), spremnik za skladištenje uz pomoć vozila tzv. *drive in* skladište (5), sustav za punjenje digestora krutom sirovinom (6),
2. faza procesa uključuje proizvodnju bioplina u digestoru (7),
3. faza procesa sadrži spremnik za skladištenje digestata (10) i primjenu digestata kao gnojiva na polju (11),

4. faza procesa (skladištenje bioplina, kondicioniranje i korištenje) odvija se u spremniku za skladištenje bioplina (8) i kogeneracijskoj jedinici (9).



- |  |   |
|--|---|
| 1 objekti za uzgoj životinja                       | 8 spremnik za bioplina  |
| 2 spremišta za tekući gnoj                         | 9 kogeneracijska jedinica                                       |
| 3 kontejneri za sakupljanje biootpada (kosupstrat) | 10 skladište za digestat  |
| 4 spremnik za sanitaciju                           | 11 poljoprivredne površine                                      |
| 5 spremnici za silažu na otvorenom                 | 12 transformacijska stanica/predaja električne energije u mrežu |
| 6 sustav za unošenje krute sirovine                | 13 korištenje toplinske energije                                |
| 7 digestor (bioplinski reaktor)                    |   |

Slika 6.3 Shema bioplinskog postrojenja na poljoprivrednom imanju [3]

Sve te faze ovise jedna o drugoj, a za kontinuirani rad procesa važno je da se odvijaju istovremeno. Ako se u digestor ne stavi svježi supstrat, bakterije mogu ostati bez hrane što može dovesti do zaustavljanja procesa AD-a. Pražnjenje spremnika supstrata omogućuje spremanje novog, a isto vrijedi i za spremnik digestata. Proizvodnja energije korištenjem bioplina oslobađa mjesto za tek nastali bioplina, a proizvedena se toplinska energija koristi za održavanje potrebne temperature u digestoru.

Skice rasporeda dijelova postrojenja ne moraju nužno odgovarati stvarnom rasporedu. Općenito, elementi bioplinskog postrojenja nastoje se postaviti tako da se gubici energije prilikom transporta svedu na minimum. Tu se misli na snage pumpi, pužnih transportera i sl. ali i na pogonsko gorivo radnih strojeva koji na mjestu postrojenja služe za manipulaciju sirovinom. Količina sirovine određuje kapacitet skladišta i kogeneracijskog postrojenja kao i veličinu samog digestora. Kvaliteta sirovine (porijeklo, struktura, udio suhe tvari, ...) određuje procesnu tehnologiju.

### **6.1. Prihvatna jedinica**

Nabava sirovine i njezin transport važan su dio procesa proizvodnje bioplina. Ona mora biti odgovarajuće kvalitete i u određenim količinama. To najčešće nije problem jer su operateri bioplinskog postrojenja ujedno i proizvođači te sirovine. No, ako se za kodigestiju koriste i sirovine sa drugih farmi ili industrija potrebna je kontrola kvalitete sirovine. Općenito, kontrola obuhvaća vizualni pregled te bilježenje podataka o volumenu i masi, datumu dostave i dostavljaču, vrsti i porijeklu sirovine.

### **6.2. Skladištenje sirovine**

Za kontinuirani rad postrojenja potrebna je i kontinuirana opskrba, što kod nekih vrsta supstrata može biti problem. Količina gnoja ovisi i o vrsti životinja koje se uzgajaju i naravno o veličini farme (broju grla/kljunova), dok učestalost generiranja gnoja uglavnom ovisi o vrsti životinje. Na farmama za uzgoj pilića (engl. *broilers*) gnoj je moguće dobiti tek nakon završetka ciklusa (oko 42 dana). Energetske je usjeve moguće ubrati jednom godišnje i to u kratkom vremenskom razdoblju. Kako bi kompenzirali nekontinuiranu nabavu supstrata, sirovine je potrebno skladištiti. Ovisno o vrsti sirovine, skladišta se dijele na bunker silose te na spremnike (posude, tankove) za skladištenje tekuće sirovine. Dimenzioniranje njihovih kapaciteta ovisi o količini sirovine namijenjenoj za skladištenje, intervalima dostave i dnevnom unosu u digestor.

#### **6.2.1. Bunker silosi**

Koriste se za skladištenje energetskih usjeva (npr. kukuruza), a kako se oni beru jednom godišnje, bunker silosi su obično dimenzionirani da mogu skladištiti sirovinu na dulje od jedne godine. Usjevi namijenjeni za skladištenje, bilo za hranu bilo za proizvodnju energije, nazivaju se silaža. Skladištenje omogućava fermentacijskim bakterijama proizvodnju hlapljivih masnih kiselina (acetat, propionat, laktat, butirat) čime se silaža konzervira. Budući da su bakterije za proces fermentacije upotrijebile dio silaže, ona ima manju energetska vrijednost od friške, no takva može puno dulje stajati

bez da dalje propada. Također, silažu je potrebno zgnječiti odnosno sabiti kako bi se istisnuo zrak i prekriti nepropusnim najlonom kako bi se spriječili aerobni procesi i silaža zaštitila od nepovoljnih vremenskih uvjeta. Za sabijanje se koriste traktori kako je to prikazano na slici 6.4. Bunker silos je jednostavna konstrukcija (armirano betonska ograda), no valja imati na umu da se tijekom fermentacije ispušta tekućina koja može zagađati okoliš u vidu eutrofikacije (povećani rast algi) zbog većeg udjela hranjivih tvari, a može sadržavati i nitratnu kiselinu  $\text{HNO}_3$  (korozivna). Zbog toga je potrebno napraviti adekvatni sustav odvodnje.



*Slika 6.4 Bunker silos [25]*



### 6.2.2. Spremnici (posude, tankovi) za skladištenje tekuće sirovine

Zbog agregatnog stanja sirovine, ovi spremnici moraju bit nepropusni, a moraju se i moći čvrsto zatvoriti zbog emisija neugodnih mirisa. U njih se skladišti tekući stajski gnoj koji se može prepumpavati u digestor. Također se grade od armiranog betona, no s kapacitetom skladištenja do nekoliko dana. Često se u njih ubacuju kruti kosupstrati (energetski usjevi) tako da su opremljeni miješalicama i alatima za usitnjavanje. Ubacuje se toliko da smjesa nakon homogenizacije usitnjavanjem i miješanjem još uvijek bude pogodna za pumpanje. Miješanjem se također sprečava začepijavanje, sedimentacija i stvaranje plutajućih slojeva. Ako se ubacuje sirovina industrijskog porijekla, potrebno je provesti odgovarajuće mjere sanitacije. Zbog taloga koji s vremenom ipak nastaje i nemoguće ga je izbjeći, spremnike je potrebno potpuno očistiti.

### 6.3. Kondicioniranje sirovine

Kondicioniranje sirovine podrazumijeva njezinu pripremu prije unosa u digestor. Time se poboljšava razgradnja i prinos bioplina te općenito optimizira proces. Kondicioniranje sirovine obuhvaća sortiranje i razdvajanje, sanitaciju, usitnjavanje te miješanje i homogenizaciju. Sortiranje i razdvajanje potrebno je radi izdvajanja nečistoća koje se prilikom proizvodnje ili prikupljanja mogu naći zajedno sa sirovinom. Silaža je jedna od najčišćih sirovina jer sortiranje i razdvajanje obavi kombajn ili neki drugi radni stoj prije skladištenja. Stajski gnoj i kućanski otpad mogu sadržavati nečistoće poput kamenčića ili drugih fizičkih onečišćenja. Njih je najlakše izdvojiti sedimentacijom u spremnicima za skladištenje. Kod kućanskog se i ugostiteljskog otpada mogu naći onečišćenja poput dijelova metalne, plastične, staklene ili drvene ambalaže koji se ne mogu razgraditi, a mogu oštetiti pumpe, začepiti cijevi i digestor. Izdvajaju se putom sustava odvojenog prikupljanja otpada ili pak mehaničkom, magnetskom ili ručnom metodom. Postupak sanitacije sirovine provodi se zagrijavanjem u odvojenim čeličnim nehrđajućim spremnicima koji su spojeni sa sustavom punjenja digestora. Postoje norme koje propisuju temperaturu, tlak i minimalno vrijeme zadržavanja sirovine kako bi se ona adekvatno sprovela. Budući da se sanitacija mora provesti prije ubacivanja sirovine u digestor, a kako iz spremnika za sanitaciju izlazi s višom temperaturom nego je potrebna u procesu AD-a, takva se sirovina može provesti kroz izmjenjivač topline kojim se predgrijava sirovina koju nije potrebno sanitirati. Usitnjavanjem sirovine povećava se njezina površina čime se anaerobnim bakterijama olakšava pristup hrani. Time se smanjuje vrijeme hidraulične retencije i općenito ubrzava proces. Miješanje supstrata omogućuje sjedinjavanje različite sirovine u homogeniziranu smjesu. Važno je da smjesa ima relativno visok udio vode kako bi se mogla pumpom prebaciti u digestor.

Kako je već rečeno, miješanje se najčešće odvija u spremnicima za skladištenje ili pred-digestorima, a potrebna razina vode postiže se dodavanjem tekućeg stajskog gnoja, digestata, tehnološke vode ili čak vode iz vodotoka. Korištenje digestata za miješanje smanjuje potrošnju čiste vode, no u supstrat dovodi već razgrađeni dio supstrata prepun hranjivih tvari (za biljke, ne bakterije) i soli koji mogu narušiti stabilnost procesa. Zbog toga se digestat dodaje u manjim količinama i obično kod kraćih procesa. Stabilnost procesa može narušiti i voda iz procesa čišćenja, jer sadrži određen udio dezinfekcijskih sredstava. Korištenje čiste vode nastoji se svesti na minimum zbog relativno velike cijene. Općenito, homogenost supstrata važna je za stabilnost procesa AD-a zbog toga što promjena teksture supstrata zahtijeva određeno vrijeme da se mikroorganizmi prilagode novim uvjetima što rezultira manjom proizvodnjom bioplina.

#### **6.4. Sustav punjenja**

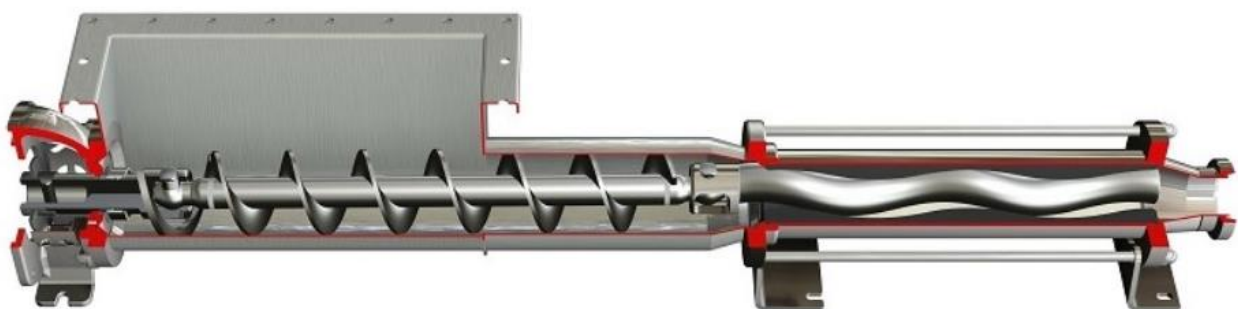
Sustav punjenja obuhvaća strojeve, uređaje i radnje kojima se supstrat iz spremišta dovodi u digestor. Način punjenja digestora ovisi o vrsti supstrata i njegovoj mogućnosti pumpanja. Supstrati pogodni za pumpanje su gnojnica, tekući organski otpad (plutajući muljevi, otpad pri preradi mlijeka i mliječnih proizvoda, ribljeg ulja, ...). Vlaknasti materijali, trava, kukuruzna silaža, gnoj s visokim udjelom slame te općenito supstrati koji se ne mogu pumpom prebaciti u digestor, unose se putem posebnih punilica koje zbog svoje konstrukcijske izvedbe smanjuju količinu zraka koja se zajedno sa krutim supstratom unese. Idealno bi bilo kada bi se supstrat u digestor dovodio kontinuirano, no to bi zahtijevalo da sustav punjenja radi konstantno. U praksi se supstrat najčešće dovodi nekoliko puta dnevno kako bi se uštedjela energija, a stabilnost procesa ostala nenarušena. Odabir sustava punjenja ovisi o vrsti i kvaliteti supstrata te o njegovoj mogućnosti pumpanja i potrebnim intervalima pumpanja.

##### **6.4.1. Transport tekuće sirovine**

Za prijenos tekućeg supstrata od spremnika do digestora koriste se pumpe. Postoje centrifugalne (slika 6.5) i volumetrijske (slika 6.6), a koriste se obje, ovisno o gustoći supstrata, udjelu suhe tvari, veličini čestica i sl. Centrifugalne pumpe mogu biti i potopne zbog čega su prikladnije za pumpanje supstrata homogenijeg sastava s manjom gustoćom. Volumetrijske pumpe koriste se za pumpanje gušćeg tekućeg supstrata s većim udjelom suhe tvari zbog čega se često opremaju s rezačima i odvajачima.



*Slika 6.5 Centrifugalna pumpa za tekući gnoj [26]*



*Slika 6.6 Ekscentrično vijčasta (volumetrijska) pumpa [27]*

#### 6.4.2. Transport krute sirovine

Kruta sirovina (kukuruzna silaža, stajski gnoj s velikim udjelom slame, trava, ...) uskladištena je u bunker silosima odkud ju treba prebaciti u sustav punjenja digestora. Za to najčešće služe traktori s ugrađenim utovarivačem ili posebni teleskopski utovarivači kakav je prikazan je na slici 6.7.



*Slika 6.7 Teleskopski utovarivač silaže [28]*

Takvi strojevi sirovinu ubacuju u spremnik (kontejner) koji je direktno vezan za digestor pomoću pužnog transportera (slika 6.8). Također u kontejneru se nalaze podni strugači i šipke za guranje koji usmjeravaju supstrat prema pužnom transporteru koji se nalazi s donje strane kontejnera. Stavljanje supstrata u kontejner odozgo te uzimanje supstrata iz kontejnera odozdo smanjuje količinu unesenog zraka u digestor na minimum. Ubacivanjem supstrata u digestor ispod površinske razine digestata sprječava se ispuštanje plina tijekom punjenja. Kontejneri imaju puno manji volumen od bunker silosa zbog čega ga je potrebno napuniti svakih nekoliko dana (ovisno o veličini kontejnera, protoku supstrata kroz digestor, ...), no pomoću tog sustava moguće je preciznije dozirati količinu supstrata u digestor.



*Slika 6.8 Pužni transporter [29]*

### **6.5. Armatura i cjevovodi**

Armatura i cjevovodi korišteni u bioplinskim postrojenjima moraju biti otporni na koroziju i bilo kakvo drugo kemijsko djelovanje s materijalom koji prenose (biomasa i bioplin). Materijali koji dolaze u obzir su PVC (polivinil klorid), PEHD (polietilen visoke gustoće), čelik i nehrđajući čelik. Svi dijelovi moraju biti postavljeni na pristupačno mjesto te zaštićeni od smrzavanja. Prilikom dimenzioniranja cjevovoda valja imati na umu da to nisu čiste tekućine, zbog čega lakše može doći do začepljenja i/ili oštećenja. Cijevi je potrebno postaviti na način da ne dođe do povrata tekućine npr. iz digestora u spremnik, ali i da ih je moguće potpuno isprazniti. Kod plinovoda također treba predvidjeti određeni nagib i ventile zbog stvaranja kondenzata.

### **6.6. Sustav grijanja digestora**

Konstantna temperatura procesa važna je za stabilan rad bioplinskog postrojenja. Kako se kroz godinu mijenja vanjska temperatura, da bi se u digestoru održala konstantna temperatura, potrebno ga je zagrijavati. Male promjene u temperaturi mogu usporiti proces dok ga velike mogu u potpunosti zaustaviti. Općenito, promjena temperature može biti uzrokovana:

- dodavanjem nove sirovine,
- stvaranjem temperaturnih slojeva ili temperaturnih zona radi nedovoljne izolacije, neučinkovitog ili neprimjerenog dimenzioniranja sustava ili neučinkovitog miješanja,
- nepravilnim pozicioniranjem grijaćih tijela,
- ekstremnim vanjskim temperaturama tijekom ljeta i zime,
- kvarom električnih vodova.

Kako bi se temperatura zadržala konstantnom ili bar njezina promjena minimalnom, uz grijanje, digestor mora biti toplinski izoliran. Grijanje se najčešće izvodi preko cijevi (slika 6.9) koje su smještene po unutarnjem obodu digestora, a kroz njih prolazi topla voda. Za zagrijavanje tople vode može se koristiti toplina proizvedena u kogeneracijskoj jedinici ili se dio proizvedenog plina troši u plinskom kotlu za zagrijavanje vode. Supstrat se može zagrijavati i prije ulaska u digestor, što je i bolja opcija jer se time smanjuju promijene temperature u digestoru. U praksi se najčešće zagrijavanje provodi i prije i u digestoru.



*Slika 6.9 Grijaće cijevi u digestoru [30]*

## 6.7. Digestor

Digestor (koriste se još i pojmovi fermentor i bioplinski reaktor) središnji je i najvažniji dio bioplinskog postrojenja jer se baš u njemu odvija proces anaerobne digestije tj. proizvodi bioplin. To je zrakonepropusni spremnik koji može biti napravljen od betona, čelika, cigle ili plastike te mora imati sustav za punjenje supstrata, sustav za izlaz bioplina te sustav za izlaz digestata. Izrađuju se u obliku silosa, rovova, bazena ili laguna, a mogu biti smješteni ispod ili iznad površine tla. Veličina bioplinskog postrojenja definirana je veličinom digestora, a kreću se od nekoliko metara kubnih (kućni digestori) do nekoliko tisuća metara kubnih (komercijalna postrojenja s više digestora).

Vrsta i konstrukcija digestora određuje se prema udjelu vode, tj. suhe tvari u supstratu. Prema udjelu vode proces anaerobne digestije se može podijeliti na *mokru* i na *suhu digestiju*. Za mokru se digestiju najčešće koriste gnojnice, mulj otpadnih voda iz kanalizacije i obično je udio suhe tvari manji do 15 %. Takav je supstrat, ali i digestat, kako je već rečeno, lako pumpom transportirati do i iz digestora, odnosno proces se može odvijati kontinuirano. Zbog toga se za mokru digestiju koristi digestor kontinuiranog tipa. Za suhu se digestiju koriste kruti dijelovi kućanskog otpada, stajskog gnoja s visokim udjelom slame, kruti organski dijelovi komunalnog otpada, zelene rezidbe i trave nastale pri održavanju krajolika ili energetski usjevi (svježi ili silirani). Općenito, kada je udio suhe tvari između 20 % i 40 %. Takav je supstrat lakše transportirati radnim strojevima poput bagera ili utovarivača, zbog čega se, ako nema miješanja s tekućim kosupstratom, za suhu digestiju koristi digestor obročnog tipa. Kako se mikrobiološki procesi uvijek odvijaju u fluidnom mediju, stroge granice između mokre i suhe digestije vrijede samo u teorijskom smislu.

### 6.7.1. Digestor obročnog tipa

Naziva se obročni jer se puni supstratom u jednom „obroku“, tj. ima jednokratno punjenje. Po završetku procesa anaerobne digestije, digestat se u potpunosti uklanja te je nakon čišćenja digestor spreman za novi obrok. tj. ciklus. Zbog toga se bioplin ne dobiva kontinuirano, no takav je digestor najlakše izgraditi. Najčešće se koristi za suhu digestiju koja za supstrat koristi krute dijelove kućanskog otpada, stajski gnoj s visokim udjelom slame, krute organske dijelove komunalnog otpada, zelene rezidbe i trave nastale pri održavanju krajolika te energetske usjeve (svježe ili silirane). Količina sirovine koju takvi digestori mogu razgraditi kreće se od 2 000 do 50 000 tona godišnje. Kako se nova sirovina uvijek stavlja u prazan digestor, za brže pokretanje procesa anaerobne digestije organska se tvar cijepi (inokulira) digestatom. To „cijepljenje“ vrši se prskanjem supstrata tekućinom koja se ocijedi iz digestata nastalog u prošlom ciklusu.

U digestorima obročnog tipa, odnosno kod suhe digestije, supstrat nije potrebno miješati. Održavanje potrebne temperature odvija se preko podnog grijanja ili izmjenjivača topline. U odnosu na digestore kontinuiranog tipa imaju niže troškove procesa. Obročni se digestori mogu upotrijebiti i za kombinaciju suhe i mokre digestije, ali tad moraju imati bolji sustav odvodnje.

#### 6.7.2. Digestor kontinuiranog tipa

U digestor ovog tipa svježi se supstrat dovodi kontinuirano te se najčešće ista količina digestata odvodi također kontinuirano. To se postiže pumpama koje se svakodnevno uključuju i isključuju ili guranjem svježeg supstrata koji onda izgura razgrađeni digestat. Na taj se način ostvaruje kontinuirana i predvidljiva proizvodnja bioplina i digestata. S obzirom na položaj, kontinuirani se digestori mogu podijeliti na: vertikalne i horizontalne.

##### Vertikalni digestori

U većini bioplinskih postrojenja digestori su vertikalnog tipa. Grade se od čelika ili armiranog betona i kružnog su oblika. Imaju stožasto dno da bi se lakše ispraznio nastali talog. Moraju biti zračno nepropusni, grijani, toplinski izolirani i opremljeni miješalicama (slika 6.10) i pumpama. Krov može biti od istog materijala kao i plašt valjka, a bioplin se tad prikuplja u poseban vanjski spremnik. Ako se umjesto krovne konstrukcije stavi zrakonepropusna membrana, zbog svoje fleksibilnosti ona ujedno služi i kao spremnik bioplina (slika 6.11).



*Slika 6.10 Miješalice supstrata [31]*





*Slika 6.11 Vertikalni digestor s membranskim spremnikom bioplina [32]*

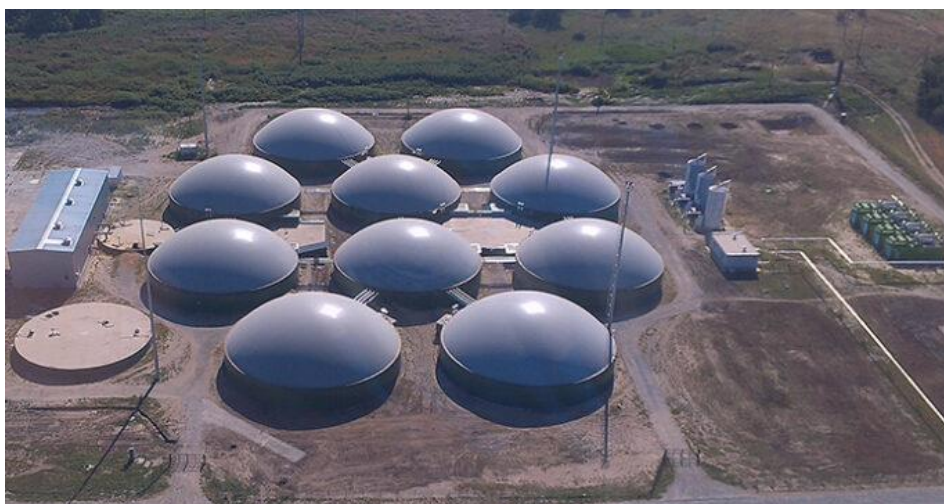


*Slika 6.12 Horizontalni digestor [33]*

## Horizontalni digestori

Horizontalni se digestori također grade od betona ili čelika te također imaju cilindrični oblik. Za razliku od vertikalnih digestora, koji se obično grade ili montiraju na mjestu bioplinskog postrojenja, čelični se horizontalni digestori (slika 6.12) češće gotovi dopremaju na željeno mjesto. Time je ograničen njihov volumen (50 – 150 m<sup>3</sup>) pa se koriste kod manjih ili kao preddigestor kod većih bioplinskih postrojenja. Horizontalni digestori većih dimenzija obično se grade od betona i tada mogu imati volumen i do 1 000 m<sup>3</sup>.

Kod velikih se bioplinskih postrojenja gradi više digestora kako je to prikazano na slici 6.13.



*Slika 6.13 Bioplinsko postrojenje s više digestora [34]*

## 6.8. Spremište za bioplin

Proizvodnja bioplina u digestoru nastoji se održati konstantnom, no ona varira između nekih vrijednosti. Isto tako ni potrošnja nije konstantna. Ljeti, kad nema tolike potrebe za grijanjem, proizvedeni se bioplin može iskoristiti za proizvodnju električne energije, no i plinski motor ili plinska turbina imaju svoja ograničenja. Zbog toga, ali i nekih nepredvidivih situacija, bioplin je potrebno skladištiti. Kako je već spomenuto, bioplin se može skladištiti pri vrhu digestora, ako ga se prekrije posebnom membranom ili u vanjskim, od digestora odvojenim, spremištima (bio)plina. Pravilno dimenzioniranje i odabir sustava za skladištenje bioplina pridonosi učinkovitosti i pouzdanosti cjelokupnog postrojenja u vidu kompenzacije varijacija u proizvodnji i potrošnji. Osim plinonepropusnosti, takva spremišta moraju biti i otporna na UV zračenje te općenito na vremenske

uvjete. Moraju moći izdržati i veće tlakove ako eventualno dođe do nekih manjih problema s opskrbom ili sl. Za veće probleme ili jednostavno preveliku proizvodnju, spremišta moraju biti opremljena bakljom za spaljivanje u slučaju nužde. Metan ima 25 puta štetniji utjecaj na ozonski omotač i globalno zatopljenje od ugljikovog dioksida, zbog čega ga je u takvim situacijama bolje spaliti „u prazno“ nego samo ispustiti. Za minimalni kapacitet spremišta najčešće se uzima četvrtina dnevno proizvedene količine, a obično se grade takva da mogu skladištiti proizvodnju do jednog ili dva dana. Spremnici za bioplin dijele se na niskotlačne te na srednje i visokotlačne. Niskotlačni spremnici su membranski spremnici i imaju raspon tlaka od 0,05 do 0,5 bara. Mogu se postaviti na vrh digestora ili pored njega (slika 6.14). Srednje i visokotlačni spremnici podrazumijevaju čelične tlačne posude u koje se bioplin komprimira na tlak od 5 bar do 250 bara. Kod njih valja uzeti u obzir potrošnju električne energije za pogon kompresora zbog čega se oni najčešće primjenjuju kod većih postrojenja.



*Slika 6.14 Vanjski membranski spremnik bioplina [35]*

## 6.9. Spremište digestata

Digestat predstavlja supstrat koji se do neke (veće) mjere razgradio, zbog čega ga se ispumpava iz digestora u spremište koje se nalazi u blizini digestora. Ta spremišta mogu biti privremena ili dugotrajna. Kod privremenih, obično manjeg volumena, digestat je potrebno svakih par dana odvesti do dugotrajnijih spremišta koja se onda obično nalaze u blizini polja na kojima će se koristiti kao gnojivo. Ispumpavanjem digestata iz digestora ne prestaje nužno proces anaerobne digestije te još uvijek dolazi do oslobađanja bioplina, amonijaka i sl. Spremišta digestata mogu biti otvorenog ili zatvorenog tipa. Spremište zatvorenog tipa podrazumijeva da ima krov, a najčešće je to membrana (kako i na digestoru) u koju se onda prikuplja bioplin nastao iz digestata. Praksa pokazuje da, od ukupno proizvedene količine bioplina, čak 20% nastaje u skladištima digestata. Otvorena, nepokrivena, skladišta, nazivaju se još i lagune (slika 6.15), moraju imati plutajući sloj koji prekriva površinu digestata i time uvelike umanjuje emisije bioplina i amonijaka.



*Slika 6.15 Otvoreni spremnici digestata, lagune [36]*

## 7. KONCEPT BIOPLINSKOG POSTROJENJA

U prošlim su poglavljima više-manje opisane osnovne činjenice o bioplinu te načinima njegove proizvodnje i potrošnje te općenito o radu jednog bioplinskog postrojenja. U nastavku slijedi razrada teme ovog rada, odnosno idejni projekt bioplinskog postrojenja.

Kao što je već rečeno, u Zlatar Bistrici postoji 15 farmi pilića čiji bi se gnoj iskoristio kao supstrat za dobivanje bioplina. Kako se iz takvog gnoja, i gnoja općenito, dobiva relativno malo bioplina, on se najčešće miješa s energetskim, odnosno poljoprivrednim usjevima. Budući da se uzgajivači dotičnih koka bave i poljoprivredom, i to uzgojem žitarica, kao kosupstrat u procesu anaerobne digestije koristiti će se oklasje (drvenasta sredina kukuruznog klipa, slika 7.1), ljuske („lisnati“ dijelovi koji omataju sam klip kukuruza), listovi i stabljike kukuruza.



*Slika 7.1 Oklasje [37]*

Oklasje kao na slici 7.1 danas je sve teže nabaviti jer već i manja poljoprivredna gospodarstva kukuruz beru u zrnu. Na taj se način prije dolazi do gotovog proizvoda (zrna kukuruza), koji je naravno u tom obliku i lakše osušiti. U Zlatar Bistrici postoje domaćinstva koja još uvijek kukuruz beru u klip (bilo strojno, bio na ruke), no to je uglavnom za zadovoljavanje vlastitih potreba te su te količine oklasja neusporedivo male u odnosu na potrebe postrojenja. Slika 7.2 prikazuje postupak runjenja kukuruza na tradicionalan način.



*Slika 7.2 Runjenje kukuruza iz spremišta [38]*

Kod većih gospodarstava, na većim površinama, kukuruz se bere u zrnju pomoću kombajna kako je to prikazano na slici 7.3. Ono što nas zanima, tj. što bi poslužilo kao supstrat, je ono što kombajn izbacuje odnosno ostavlja iza sebe (slika 7.4).



*Slika 7.3 Berba kukuruza u zrnju pomoću kombajna [39]*



*Slika 7.4 Polje nakon berbe kukuruza u zrnu [40]*

Slika 7.4 prikazuje polje nakon berbe kukuruza u zrnu. Kao što je već rečeno, danas to poljoprivrednici uglavnom preoru što im posluži kao prirodno gnojivo. U svrhu rada, zamišljeno je da bi se na kombajn spojila prikolica u koju bi se prikupljali svi ostaci te po završetku berbe (ili punjenja prikolice) odvozili u bunker silose na mjestu bioplinskog postrojenja. Budući da se kukuruz (biljka) bere radi kukuruza (zrna), a ne radi tih ostataka, točnih podataka o udjelu suhe tvari, gustoći, i sl. nema. Kada se u literaturi govori o kukuruznoj silaži uglavnom se misli na silažu cijele biljke. Iako bi takav supstrat bio bolji za proizvodnju bioplina, pravilno silirana predstavlja izvrstan obrok za stoku. U razgovoru s farmerima i djelatnicima Poljoprivredne savjetodavne službe te raznih članaka na internetu i forumima, procijenio sam podatke potrebne za proračun.

Ideja ovog rada bila je osmisлити kogeneracijsko postrojenje s plinskim motorom s unutrašnjim izgaranjem koji bi mogao zadovoljavati potrebe naselja za toplinskom i električnom energijom. Za to je trebalo odrediti ili procijeniti godišnju potrošnju toplinske i električne energije na području općine. Iz HEP-a sam dobio podatke za razdoblje od 2015. do 2020. godine u kojem prosjek potrošnje električne energije iznosi 2 414 842 kWh. Moguća količina bioplina (točni podaci slijede u nastavku), odnosno ekvivalent električne energije, ispod su prosjeka potrošnje zbog čega se ideja iznesena iznad odbacuje. Procjena potrošnje toplinske energije za općinu nije ni rađena.

Da bi takvo bioplinsko postrojenje uopće moglo prodavati energiju u mrežu, po zakonu (*Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji*, NN 138/2021; 15.12.2021.) [1] mora biti upisano u *Registar obnovljivih izvora energije i kogeneracije te povlaštenih proizvođača*. Da bi vlasnik tog postrojenja stekao status *povlaštenog proizvođača električne energije*, projekt mora prijaviti (i naravno, proći) na *Javnom natječaju za dodjelu tržišne premije i zajamčene otkupne cijene za poticanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije 1/2020* [41], odnosno na nekom sljedećem. Prema tom natječaju, definirana su postrojenja koja se mogu prijaviti na (izdvojena su samo bioplinska postrojenja):

- javni natječaj za poticanje zajamčenom otkupnom cijenom:
  - ...
  - f.2. Elektrane na bioplin instalirane snage veće od 50 kW do uključujući 500 kW
- javni natječaj za dodjelu tržišne premije:
  - ...
  - f.3. Elektrane na bioplin instalirane snage veće od 500 kW do uključujući 2 MW

Naše bi postrojenje spadalo pod f.2.



## 7.1. Količina sirovine i bioplina

Za sirovinu, kao što je već rečeno, koristiti će se gnoj s obližnjih farmi te ostaci od branja kukuruza u zrnu s okolnih polja. Veličina farme može se izraziti površinom, no češće se govori o broju grla, odnosno u našem slučaju broju kljunova (kapacitet farme). Dozvoljeni broj kljunova na određenu površinu farme mogu se naći u *Pravilniku o određivanju minimalnih pravila za zaštitu pilića koji se uzgajaju za proizvodnju mesa* (NN 97/2008; 7.9.2008.), te se farme u Zlatar Bistrici kreću se od 4 000 do 40 000 kljunova. Farme moraju poštivati *Pravilnik o uvjetima kojima moraju udovoljavati farme i uvjetima za zaštitu životinja na farmama* (NN 136/2005; 16.11.2005.) te ih je većina modernije opremljena što podrazumijeva bolju izolaciju, visok stupanj automatizacije (hranjenje, ventilacija, grijanje,...) i sl.

Anketiranjem farmera dobio sam informacije o cjelokupnom procesu uzgoja pilića, od utovara do klanja i pripreme farme za novi ciklus. U farmi, pilići provedu oko 42 dana nakon čega slijedi pauza tj. čišćenje (iznošenje gnoja), dezinficiranje, prozračivanje i priprema farme za novi ciklus. Ta pauza traje od 2 do 3 tjedna tako da godišnje jedna farma može imati od 5 do 6 ciklusa. Tijekom jednog ciklusa maksimalni kapacitet farme najčešće se smanji za nekoliko kljunova koji se zbog nekih (ne zaraznih) bolesti ili oštećenja moraju ukloniti od ostatka ili čak usmrtniti. Zbroj kapaciteta svih 15 farmi, odnosno ukupan broj pilića iznosi  $n = 332\ 000$ . Podaci o količini gnoja dosta variraju od farme do farme. Razlog toga je što farmeri evidenciju vode u mjernoj jedinici „prikolica“ tj. znaju kolika je nosivost ili volumen prikolice s kojom izvoze gnoj te znaju koliko su prikolica iznesli po ciklusu. To naravno ovisi i o tome koliko stelje pojedini farmer rasprostire po podu, je li zimski ili ljetni ciklus, ... Procijenjeno je da se po jednom ciklusu iz tih 15 farmi može dobiti  $m_{g1c} = 420$  t gnoja. Ako uzmemo 5 ciklusa godišnje, to ispada  $m_g = 2\ 100$  t gnoja godišnje.

Za izračun količine bioplina iz određene količine i vrste supstrata koriste se razni bioplinski kalkulatori kojih ima u raznim oblicima poput zasebnih softvera, mobilnih aplikacija i sl. Ja sam odabrao kalkulator koji se nalazi na internetskoj stranici tvrtke *PlanET Biogas Global* [42]. To je njemačka tvrtka koja je, kako kažu, „bioplinski pionir“ od 1998. godine, a specijalizirali su se za projektiranje, izgradnju i održavanje bioplinskih postrojenja. Podaci potrebni za izračun količine bioplina su vrsta supstrata, unos supstrata u t/god te udio suhe tvari u %. U kalkulator se može unijeti samo jedan supstrat, a kako se predviđa korištenje pilećeg gnoja i ostataka branja kukuruza u zrnu, količine bioplina izračunati će se zasebno te zbrojiti.

Za izračun količine bioplina iz pilećeg gnoja, kao supstrat odabrano je „broilers“ budući da se uzgajaju pilići za tovljenje odnosno za proizvodnju mesa (a ne odrasle kokoši, kokoši nesilice i sl.). Također, podrazumijeva se da se koristi njihov gnoj, a ne same jedinke. Jedno je gospodarstvo obavilo i kemijsku analizu gnoja (slika 7.5) iz koje sam za proračun iskoristio podatak o udjelu suhe tvari ( $ST_g = 52,24\%$ ).

Tablica 1. Rezultati kemijske analize

Analitički broj: ██████████				
Oznaka uzorka: Pileći gnoj				
VRSTA KEMIJSKE ANALIZE	jedinica	Vrijednost utvrđena analizom	METODA	
Suha tvar (S.T.) - 105°C	%	52,24	gravimetrija	
H <sub>2</sub> O	%	47,76		
Žareni ostatak (550°C)	%	24,06	žarenje u mufalnoj peći	
Ugljik (C)	%	42,53	bikromatna metoda	
Organska tvar	%	73,53	izračun	
pH u H <sub>2</sub> O		8,80	elektrometrija (1:2 vol.)	
E.C. (10 %)	mS/cm	6,73	elektrometrija (10%-tni eluat)	
N	u prirodnom uzorku	%	2,29	Kjeldahl metoda (modificirana)
	ukupan na ST	%	4,38	Kjeldahl metoda (modificirana)
	ostali oblici (105°C)	%	2,95	Kjeldahl metoda (modificirana)
	NH <sub>3</sub> -N	%	1,434	Kjeldahl metoda (modificirana)
Ukupni P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	4,60	zlatotopka	
Ukupni K <sub>2</sub> O	%	4,74	zlatotopka	
Ukupni Ca	%	1,76	zlatotopka	
Ukupni Mg	%	0,56	zlatotopka	
Fe – ukupan na ST	mg/kg	898,0	zlatotopka	
Mn – ukupan na ST	mg/kg	305,4	zlatotopka	
<b>TEŠKI METALI* (ukupni na ST)</b>				
Cu	mg/kg	112,42	zlatotopka	
Zn	mg/kg	78,41	zlatotopka	
Cd	mg/kg	0,487	zlatotopka	
Pb	mg/kg	0,984	zlatotopka	
Ni	mg/kg	7,72	zlatotopka	
Cr	mg/kg	6,46	zlatotopka	
Hg	mg/kg	<0,01	zlatotopka	

\*Maximalno dozvoljene koncentracije propisane Pravilnikom o zaštiti poljoprivrednog zemljišta od onečišćenja (NN 009/14)

Slika 7.5 Kemijska analiza gnoja

Prema navedenom kalkulatoru, iz 2 100 t/god pilećeg gnoja, s udjelom suhe tvari od 52 %, moguće je dobiti  $V_{\text{bpgg}} = 393\ 120\ \text{m}^3$  bioplina.

Za izračun količine bioplina iz ostataka od branja kukuruza u zrnju, u bioplinskom je kalkulatoru potrebno odabrati „corn“. Izračun količine bioplina, kako je već navedeno, zbog ograničenja kalkulatora mora se izvršiti posebno za svaki kosupstrat, no u stvarnosti se oni miješaju. Omjer miješanja zadan je u *Javnom natječaju za dodjelu tržišne premije i zajamčene otkupne cijene za poticanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije 1/2020* [41]. Za grupu f.2. nije definiran omjer miješanja, tako da se oklasje može dodavati u količini koja je dostupna, pazeći

pritom na kriterije natječaja i na eventualni utjecaj na proces anaerobne digestije. Kako je cilj ovog rada iskoristiti gnoj, čije su količine koliko toliko poznate, nisam istraživao dostupne količine ostataka od branja kukuruza u zrnu, već sam se poslužio kriterijem miješanja za grupu f.3. koji glasi: „...da udio tekućeg i krutog gnoja neće biti manji od 70 % masenog udjela u supstratu na godišnjoj razini u proizvodnom postrojenju sa zatvorenom spremnikom digestata...“. To znači da ako na godišnjoj razini farme proizvedu  $m_g = 2\ 100$  t gnoja (70 %) količina ostataka mora biti 30 %, tj.  $m_o = 900$  t/god. Konačno, iz 900 t/god ostataka od branja kukuruza u zrnu, s udjelom suhe tvari od  $ST_o = 95\%$ , moguće je dobiti  $V_{bpo} = 628\ 425$  m<sup>3</sup> bioplina.

Ukupna količina bioplina koja bi se mogla proizvesti iznosi:

$$V_{bp} = V_{bppg} + V_{bpo} = 393\ 120 + 628\ 425 = 1\ 021\ 545 \text{ m}^3/\text{god}$$

Donja ogrjevna moć bioplina iznosi  $H_{d,bp} = 21,6$  MJ/m<sup>3</sup> = 6 kWh/m<sup>3</sup> [2], znači da se godišnje može dobiti:

$$P = V_{bp} \cdot H_{d,bp} = 1\ 021\ 545 \cdot 6 = 6\ 129\ 270 \text{ kWh/god}$$

Ako pretpostavimo da postrojenje radi 345 dana godišnje, dobiva se:

$$P = 6\ 129\ 270 \frac{\text{kWh}}{345 \cdot 24} = 740 \text{ kW}$$

## 7.2. Količina i sastav supstrata

Supstrat predstavlja onu količinu sirovine koja se unosi u digestor (u suštini su to iste stvari). Količine sirovine navedene su u prošlom poglavlju, a u ovom će se izračunati količine koje se unose u digestor. U tablici su prikazane fizikalne veličine supstrata potrebne za daljnje proračune.

Tablica 7.1 Podaci o supstratima

	<i>m</i> , t/god	<i>x</i>	<i>ST</i> , %	<i>ρ</i> , kg/m <sup>3</sup>
<b>Pileći gnoj</b>	2100	0,7	52	300
<b>Ostaci</b>	900	0,3	95	400
<b>Ukupno</b>	3000	1	-	-

Ukupna masa sirovine iznosi:

$$m_{\text{uk}} = m_{\text{g}} + m_{\text{o}} = 2\,100 + 900 = 3\,000 \text{ t/god}$$

Pretpostavljeno je da će postrojenje raditi 345 dana u godini iz čega se dobiva količina koju je dnevno potrebno unijeti u digestor, odnosno količina sirovine:

$$m_s = 3\,000 \frac{\text{t}}{345} = 8,7 \text{ t/dan}$$

Da bi se izračunao volumen, potrebna nam je gustoća:

$$\rho_s = x_{\text{pg}} \cdot \rho_{\text{pg}} + x_{\text{og}} \cdot \rho_{\text{og}}, \quad \text{kg/m}^3 \quad (7.1)$$

gdje je:

$\rho_s$  – gustoća supstrata, kg/m<sup>3</sup>

$x_{\text{pg}} = 0,7$  – maseni udio pilećeg gnoja u supstratu

$\rho_{\text{pg}} = 300 \text{ kg/m}^3$ , gustoća pilećeg gnoja,

$x_{\text{og}} = 0,3$  – maseni udio ostataka od branja kukuruza u zrnu u supstratu

$\rho_{\text{og}} = 400 \text{ kg/m}^3$ , gustoća ostataka od branja kukuruza u zrnu

Iako se maseni udjeli u kriteriju miješanja odnose na godišnju razinu, preuzet ćemo ih i za dnevne količine.

$$\rho_s = 0,7 \cdot 300 + 0,3 \cdot 400 = 330 \text{ kg/m}^3$$

Volumen koji je dnevno potrebno unijeti u digestor je:

$$V_s = \frac{m_s}{\rho_s} = \frac{8\,700}{330} = 26,36 \text{ m}^3/\text{dan}$$

Budući da se pileći gnoj dobiva nakon svakog ciklusa, tj. 5 – 6 puta godišnje, a ostaci od branja kukuruza u zrnju nakon branja tj. jednom godišnje te da vrijeme hidrauličke retencije (zadržavanja supstrata u digestoru) iznosi oko 40 dana, bilo da imamo digestor obročnog ili kontinuiranog tipa, sirovine je potrebno skladištiti.

#### 7.2.1. Dimenzioniranje spremnika za ostatke od branja kukuruza u zrnju

Spremnik ostataka od branja mora biti dimenzioniran da može uskladištiti jednogodišnju potrebnu količinu za ostacima, odnosno  $m_o = 900$  t. Procijenjena gustoća ostataka je  $\rho_o = 400 \text{ kg/m}^3$ . Iz toga, potrebni volumen spremnika ostataka od branja kukuruza u zrnju iznosi:

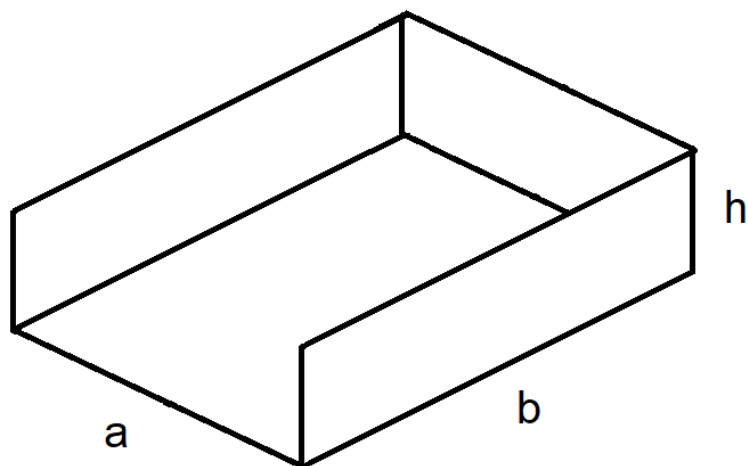
$$V_{\text{pso}} = \frac{m_o}{\rho_o} = \frac{900\,000}{400} = 2\,250 \text{ m}^3$$

Predviđaju se tri otvorena, armirano betonska spremnika u obliku kvadra (slika 7.6) sa slijedećim dimenzijama:

- širina,  $a = 10$  m
- duljina,  $b = 30$  m
- visina,  $h = 3$  m

$$V_{\text{so}} = a \cdot b \cdot h = 10 \cdot 30 \cdot 3 = 900 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{so,uk}} = 3 \cdot V_{\text{so}} = 3 \cdot 900 = 2\,700 \text{ m}^3 > 2\,250 \text{ m}^3$$



*Slika 7.6 Skica bunker silosa za ostatke od branja kukuruza u zrnu*

Nakon dovoza ostataka do bunkera, sirovinu je potrebno postepeno dobro sabiti radnim strojevima (traktorima) kako bi se istisnuo sav zrak i time omogućilo dulje čuvanje. Nakon što se spremnik napuni potrebno ga je prekriti nepropusnim najlonom kako bi se zaštitili od nepovoljnih vremenskih uvjeta. Unutar spremnika potrebno je izraditi kanale za odvod tekućine koja se može pojaviti prilikom sabijanja.

#### 7.2.2. Dimenzioniranje spremnika za gnoj

Kako je gotovo nemoguće odrediti faktor istovremenosti odvijanja ciklusa na farmama koje još i k tome ne proizvode jednaku količinu gnoja, veličina spremnika dimenzionirana je za dvostruku količinu gnoja koja bi nastala kad bi sve farme završile s ciklusom u isto vrijeme. Procijenjeno je da je ukupna količina gnoja sa svih farmi jednaka  $m_{g1c} = 420$  t, što znači da u spremnik treba stati  $m_{g2c} = 840$  t gnoja. Uz podatak da gustoća gnoja iznosi  $\rho_g = 300$  kg/m<sup>3</sup>, potrebni volumen spremnika iznosi:

$$V_{ppg} = \frac{m_{g2c}}{\rho_g} = \frac{840\,000}{300} = 2\,800 \text{ m}^3$$

Odlučeno je da će se izgraditi 3 spremnika istih dimenzija kao i spremnik za ostatke od branja kukuruza u zrnu ( $a \times b \times h = 10 \times 30 \times 3$  m) ukupnog volumena  $V_{o,uk} = 2\,700$  m<sup>3</sup> ( $3 \cdot 900$ ). To ispada 100 m<sup>3</sup> manje od gore navedene količine, no kako je ona predimenzionirana tih 100 m<sup>3</sup> ne igra neku ulogu. U stvarnosti bi se trebalo točno odrediti početak ciklusa svake pojedine farme, odnosno napraviti raspored kako bi se u spremniku uvijek osigurala dovoljna količina gnoja za pokrivanje potreba digestora do kraja sljedećeg ciklusa nekih od farmi.

### 7.3. Dimenzioniranje digestora

Za određivanje volumena digestora prema formuli navedenoj u poglavlju 2.4 potrebno je poznavati VHR i dnevnu količinu unesenog supstrata. Odabire se mezofilna temperaturna zona, a prema tablici 2.1, temperatura procesa  $\vartheta_p = 40 \text{ }^\circ\text{C}$  i VHR = 40 dana. U bioplinskom priručniku [3] piše da se za pileći izmet, trave, kukuruznu silažu ili gnojiva s visokim udjelom slame obično koriste horizontalni kontinuirani digestori. Kako je navedeno u poglavlju 6.7, kontinuirane digestore karakterizira mokra digestija, što pak podrazumijeva da supstrat, odnosno u našem slučaju digestat, mora biti pogodan za pumpanje. Da bi se digestat mogao pumpati (ali i supstrat kretati kroz digestor), prema [3], udio suhe tvari mora biti manji od 15 %.

U smjesi supstrata definiranoj kao 70 % pilećeg gnoja i 30 % ostataka od branja kukuruza u zrnu, udio suhe tvari je:

$$ST_S = x_{pg} \cdot ST_{pg} + x_o \cdot ST_o = 0,7 \cdot 0,54 + 0,3 \cdot 0,95 = 0,663$$

$$ST_S = 66 \% > 15\% \Rightarrow \text{dodavanje vode}$$

Kako je udio suhe tvari veći od graničnog, potrebno je dodati vodu. Količina potrebne vode za razrjeđivanje supstrata računa se prema:

$$m_{uk} \cdot ST_{uk} = m_S \cdot ST_S + m_V \cdot ST_V \quad (7.2)$$

gdje je:

$m_{uk} = m_S + m_V$  – ukupna masa smjese supstrata i vode, t/god

$ST_{uk} = 15\%$  – udio suhe tvari u smjesi supstrata i vode,

$m_S = 3\,000$  t/god – masa supstrata

$ST_S = 66\%$  – udio suhe tvari u supstratu

$m_V$  – masa vode, t/god

$ST_V = 0$  – udio suhe tvari u vodi

Iz jednadžbe (7.2) dobiva se potrebna količina vode:

$$m_V = \frac{m_S}{ST_{uk}} \cdot (ST_S - ST_{uk}) = \frac{3\,000}{0,15} \cdot (0,66 - 0,15) = 10\,200 \text{ t/god.}$$

Dnevna potrebna količina vode iznosi:

$$m_v = 10\,200 \cdot \frac{t}{345} = 29,6 \text{ t/dan.}$$

Uz gustoću vode od  $\rho_v = 1\,000 \text{ kg/m}^3$ , volumen vode koji je dnevno potrebno unijeti u digestor je:

$$V_v = \frac{m_v}{\rho_v} = \frac{29\,600}{1\,000} = 29,6 \text{ m}^3.$$

Prema tome potrebni volumen digestora jednak je:

$$VHR = \frac{V_D}{V_{uk}} = \frac{V_D}{V_S + V_v} \Rightarrow V_D = VHR \cdot V_S = 40 \cdot (26,36 + 29,6) = 2\,238,4 \text{ m}^3$$

Odabrana su 4 digestora sljedećih dimenzija (slika 7.7):

- širina,  $b = 5 \text{ m}$
- visina,  $h = 5 \text{ m}$
- duljina,  $L = 24 \text{ m}$

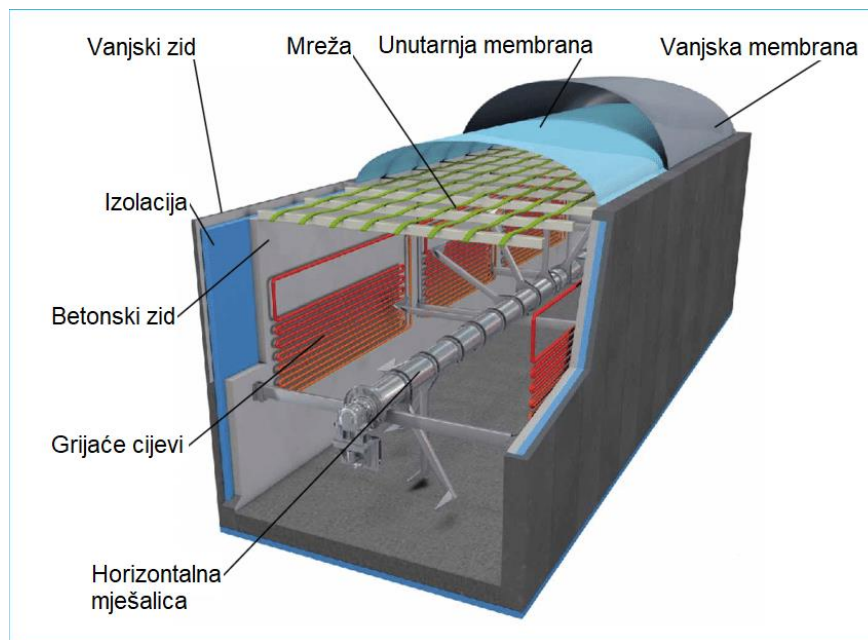
Volumen jednog takvog digestora iznosi:

$$V_{1D} = b \cdot h \cdot L = 5 \cdot 5 \cdot 24 = 600 \text{ m}^3.$$

Volumen sva 4 digestora iznosi:

$$V_{4D} = 4 \cdot V_{1D} = 4 \cdot 600 = 2\,400 \text{ m}^3 > 2\,238 \text{ m}^3.$$





Slika 7.7 Presjek horizontalnog digestora [43]

#### 7.4. Dimenzioniranje predspremnika

Predspremnik se najčešće dimenzionira za dvodnevnu količinu supstrata (bez vode, ona se dodaje direktno u digestor):

$$V_{PS,uk} = 2 \cdot V_S = 2 \cdot 26,36 = 52,72 \text{ m}^3.$$

Budući da su odabrana 4 ista digestora koji rade paralelno, odabrat će se i 4 predspremnika. U svaki se digestor tada unosi četvrtina dnevno potrebne količine supstrata, odnosno  $V_{1/4S} = 6,59 \text{ m}^3$ . Da bi svaki predspremnik imao dvodnevnu zalihu supstrata, mora imati minimalni volumen od:

$$V_{1PS} = 2 \cdot \frac{V_S}{4} = 2 \cdot \frac{26,36}{4} = 2 \cdot 6,59 = 13,18 \text{ m}^3$$

Odabrane dimenzije predspremnika su:

promjer,  $d = 3 \text{ m}$

visina,  $h = 2 \text{ m}$ .

Konačni volumen jednog predspremnika iznosi:

$$V_{1PS} = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot h = \frac{3^2 \cdot \pi}{4} \cdot 2 = 14,14 \text{ m}^3 > 13,18 \text{ m}^3.$$

Za ubacivanje supstrata u predspremnik koristiti će se utovarivači. Za ubacivanje supstrata iz predspremnika u digestor koristit će se pužni transporter. Ispod predspremnika valja dodati krnji stožac čiji se širi otvor montira na dno predspremnika, a uži otvor da odgovara usipnom košu pužnog transportera.

### 7.5. Toplina potrebna za održavanje temperature procesa

U mezofilnoj temperaturnoj zoni, prema tablici 2.1, raspon temperatura procesa je od 32 °C do 40 °C, a vrijeme zadržavanja supstrata u digestoru (VHR) od 30 do 40 dana. Kao što je već navedeno, odabrano je:

$\vartheta_p = 40$  °C, temperatura procesa, temperatura na koju je potrebno zagrijati i održavati supstrat

$VHR = 40$  dana.

#### 7.5.1. Toplina potrebna za zagrijavanje supstrata

Toplina koju je svaki dan potrebno dovesti supstratu jednaka je:

$$Q = m_S \cdot c_S \cdot (\vartheta_p - \vartheta_S) + m_V \cdot c_V \cdot (\vartheta_p - \vartheta_V), \quad \text{kJ} \quad (7.3)$$

gdje je:

$m_S = 8,7$  t/dan = 8 700 kg/dan, masa supstrata

$c_S$  – specifični toplinski kapacitet supstrata, kJ/(kgK)

$\vartheta_S = 0$  °C, pretpostavljena temperatura supstrata u zimskom periodu,

$m_V = 29,6$  t/dan = 29 600 kg/dan, masa vode

$c_V = 4,187$  kJ/(kgK), specifični toplinski kapacitet vode, kJ/(kgK)

$\vartheta_V = 15$  °C, pretpostavljena temperatura vode koja se stavlja u digestor

Specifični toplinski kapacitet supstrata računa se prema:

$$c_S = x_{pg} \cdot c_{pg} + x_o \cdot c_o, \quad \text{kJ/kgK} \quad (7.4)$$

gdje je:

$x_{pg} = 0,7$  – maseni udio pilećeg gnoja u supstratu

$c_{pg} = 1,760$  kJ/(kgK), pretpostavljeni specifični toplinski kapacitet

$x_o = 0,3$  – maseni udio ostataka od branja kukuruza u zrnu u supstratu

$c_o = 2,900 \text{ kJ}/(\text{kgK})$ , pretpostavljeni specifični toplinski kapacitet ostataka od branja kukuruza u zrnu

$$c_s = 0,7 \cdot 1,760 + 0,3 \cdot 2,900 = 2,102 \text{ kJ}/(\text{kgK}).$$

Potrebna toplina tada iznosi:

$$Q = 8\,700 \cdot 2,102 \cdot (40 - 0) + 29\,600 \cdot 4,187 \cdot (40 - 15) = 3\,829\,876 \text{ kJ}$$

Ako pretpostavimo da će se digestor puniti cijeli dan u razmaku od sat vremena, potrebna snaga za zagrijavanje supstrata je:

$$\phi_{gs} = \frac{Q}{n \cdot 3600} = \frac{3\,829\,876}{24 \cdot 3\,600} = 44,3 \text{ kW}$$

### 7.5.2. Toplinski gubici digestora

Pretpostavljeno je da digestor toplinu s okolišem izmjenjuje preko bočnih strana te preko tla, tj. zanemaruje se prijelaz topline sa supstrata na okolni zrak kroz strop digestora budući da se tamo nalazi određena količina bioplina. Također, zanemaruje se utjecaj miješalice. Digestor je kvadar dimenzija  $b \times h \times L = 5 \times 5 \times 24 \text{ m}$  ispunjen supstratom temperature  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Vanjska projektna temperatura za Zlatar Bisticu iznosi  $\vartheta_{ok} = -10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Toplinski gubici jednog digestora su:

$$\phi_{g1d} = A_{zid} \cdot U_{zid} \cdot (\vartheta_p - \vartheta_{ok}) + A_{pod} \cdot U_{pod} \cdot (\vartheta_p - \vartheta_{ok}), \text{ W} \quad (7.5)$$

gdje je:

$A_{zid}$  – površina zidova digestora,  $\text{m}^2$

$U_{zid} = 0,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  – koeficijent prolaza topline za zid

$\vartheta_p = \vartheta_s = 40 \text{ }^\circ\text{C}$  – temperatura procesa, tj. supstrata

$A_{pod}$  – površina poda digestora,  $\text{m}^2$

$U_{pod} = 0,4 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  – koeficijent prolaza topline za pod

$$\phi_{g1d} = (2 \cdot 5 \cdot 5 + 2 \cdot 5 \cdot 24) \cdot 0,3 \cdot (40 - (-10)) + 5 \cdot 24 \cdot 0,4 \cdot (40 - (-10)) = 6\,750 \text{ W}$$

Toplinski gubici za 4 digestora iznose:

$$\phi_{g4d} = 4 \cdot \phi_{g1d} = 4 \cdot 6\,750 = 27\,000 \text{ W} = 27 \text{ kW}.$$

Minimalna toplinska snaga potrebna za zagrijavanje supstrata i održavanje temperatura procesa u digestoru jednaka je:

$$\phi = \phi_{gs} + \phi_{g4d} = 44,3 + 27 = 71,3 \text{ kW}.$$

## 7.6. Dimenzioniranje spremnika digestata

Spremnici digestata najčešće se dimenzioniraju za polugodišnju količinu digestata. Volumen supstrata koji je na godišnjoj razini potrebno unijeti u digestor je:

$$V_S = \frac{m_S}{\rho_S} = \frac{3\,000\,000}{330} = 9\,091 \text{ m}^3.$$

Volumen vode koji je na godišnjoj razini potrebno unijeti u digestor je:

$$V_V = \frac{m_V}{\rho_V} = \frac{10\,200\,000}{1\,000} = 10\,200 \text{ m}^3.$$

Ukupni volumen vode i supstrata koji je na godišnjoj razini potrebno unijeti u digestor je:

$$V_{uk} = V_S + V_V = 9\,091 + 10\,200 = 19\,291 \text{ m}^3.$$

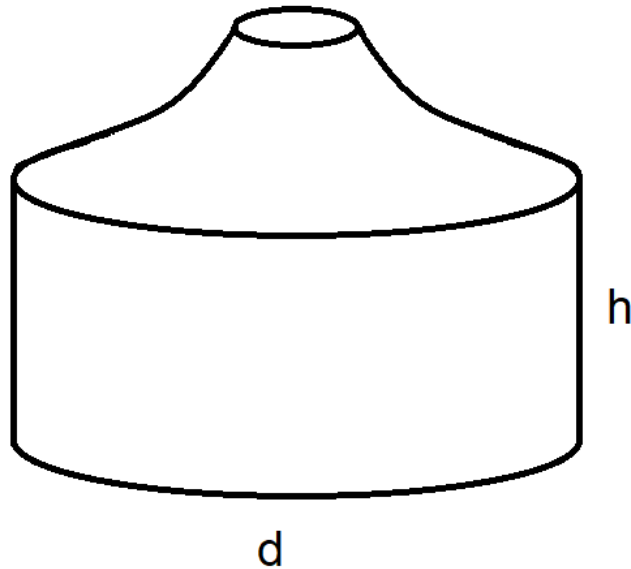
Volumen spremnika digestata tada iznosi:

$$V_{sd} = \frac{V_{uk}}{2} = \frac{19\,291}{2} = 9\,645,5 \text{ m}^3.$$

U uvjetu miješanja navedeno je da taj omjer vrijedi za zatvoreni spremnik. Odabiru se 4 spremnika digestata (slika 7.8) sa sljedećim dimenzijama:

promjer,  $d = 25 \text{ m}$

visina,  $h = 6 \text{ m}$



*Slika 7.8 Skica spremnika digestata s membranom*

Volumen jednog spremnika digestata iznosi:

$$V_{1sd} = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot h = \frac{25^2 \cdot \pi}{4} \cdot 6 = 2\,945 \text{ m}^3.$$

Volumen sva 4 spremnika iznosi:

$$V_{4sd} = 4 \cdot V_{1sd} = 4 \cdot 2\,945 = 11\,780 \text{ m}^3 > 9\,645,5 \text{ m}^3.$$

Za izbacivanje digestata iz digestora u spremnik digestata koristit će se pumpa.

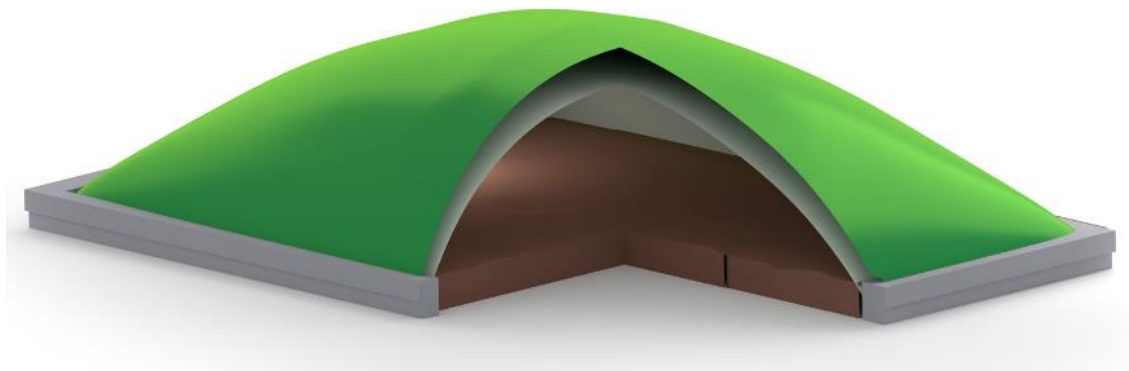
### **7.7. Volumen spremnika bioplina**

Digestor i spremnik digestata su prekriveni plinonepropusnom membranom izrađenom od PVC-a, čime prostor iznad supstrata (slika 7.9) i digestata (slika 7.11) služi za skupljanje, ali i skladištenje bioplina. Uz pretpostavku da se membrana iznad digestora napuhne i njen obod predstavlja dio kružnice te da se izdigne 1,5 m iznad supstrata (slika 7.10), volumen bioplina koji bi se tamo mogao uskladištiti je:

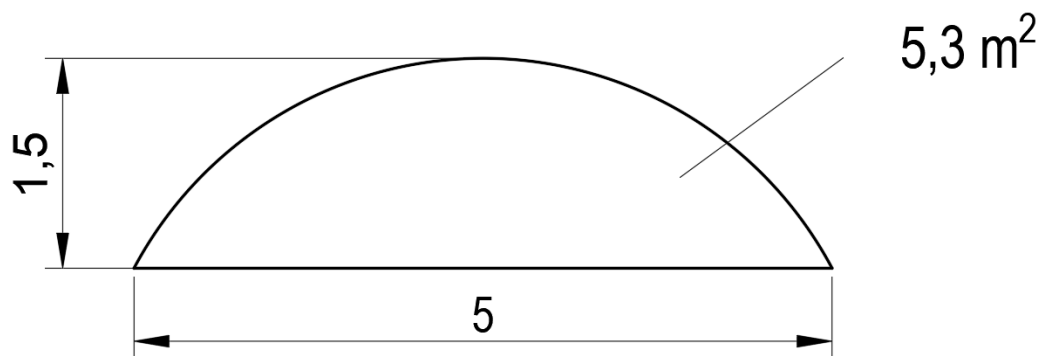
$$V_{sb1d} = B \cdot L = 5,3 \cdot 24 = 127 \text{ m}^3.$$

Volumen bioplina koji bi se mogao uskladištiti u sva 4 digestora je:

$$V_{sb4d} = 4 \cdot V_{sb1d} = 4 \cdot 127 = 508 \text{ m}^3.$$



Slika 7.9 Skica membrane na digestoru [44]



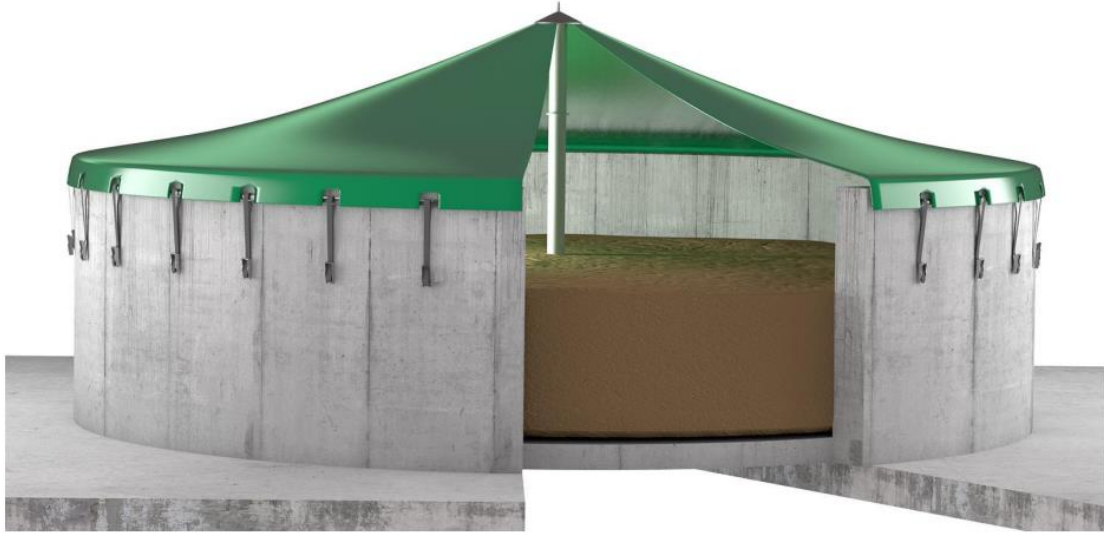
Slika 7.10 Skica presjeka membrane na digestoru

Uz pretpostavku da membrana iznad spremnika digestata ima oblik krnjeg stošca, tj. da su u presjeku bočne stranice ravne linije te da je izdignuta 6 m (slika 7.12), volumen bioplina koji bi se tamo mogao skladištiti je:

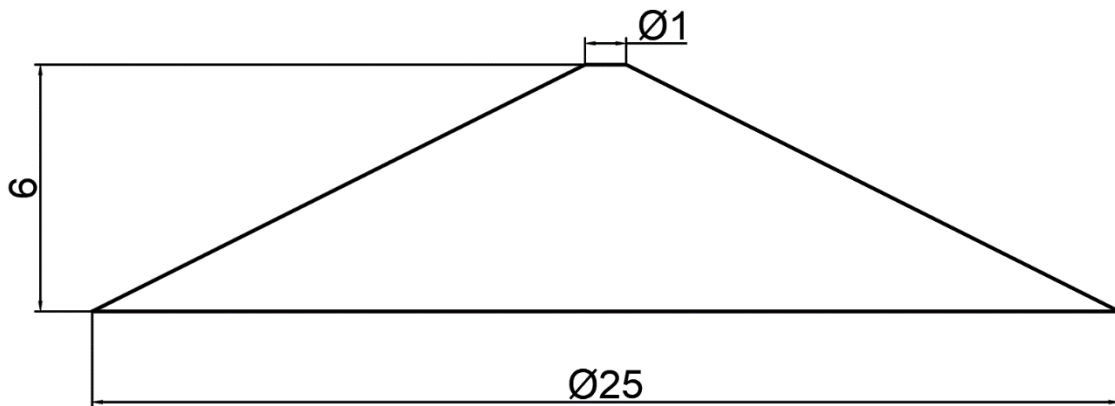
$$V_{sb1sd} = \frac{1}{3} \cdot B_{ks} \cdot (h_{ks} + h_s) - \frac{1}{3} \cdot B_s \cdot h_s = \frac{1}{3} \cdot \frac{25^2 \cdot \pi}{4} \cdot 6,2 - \frac{1}{3} \cdot \frac{1^2 \cdot \pi}{4} \cdot 0,2 = 1\,014 \text{ m}^3$$

Volumen bioplina koji bi se mogao uskladištiti u sva 4 spremnika digestata je:

$$V_{sb4sd} = 4 \cdot V_{sb1sd} = 4 \cdot 1\,014 = 4\,056 \text{ m}^3.$$



Slika 7.11 Skica spremnika digestata [44]



Slika 7.12 Skica presjeka membrane na spremniku digestata

Ukupni volumen bioplina koji bi se mogao uskladištiti iznad supstrata u digestoru i iznad digestata u spremniku digestata iznosi:

$$V_{sb,uk} = V_{sb4d} + V_{sb4sd} = 508 + 4\,056 = 4\,564 \text{ m}^3.$$

Kako je izračunato iz bioplinskog kalkulatora, godišnja količina bioplina iznosi  $V_{bp} = 1\,021\,545 \text{ m}^3$ , odnosno ako postrojenje radi 345 dana u godini, dnevna količina bioplina koja se može dobiti je:

$$V_{bp} = 1\,021\,545 \cdot \frac{\text{m}^3}{345 \text{ dana}} = 2\,961 \text{ m}^3.$$

Konačno, ukupni volumen spremnika bioplina ima kapacitet da uskladišti količinu bioplina koja se proizvede u:

$$\frac{V_{sb}}{V_{bp}} = \frac{4564}{2961} = 1,54 \text{ dana.}$$

## 7.8. Odabir motor generatora

U poglavlju 7.1 izračunata je količina bioplina  $V_{bp} = 1\,021\,545 \text{ m}^3$  koja bi se godišnje mogla proizvesti. Uz podatak o donjoj ogrjevnoj moći bioplina  $H_{d,bp} = 21,6 \text{ MJ/m}^3 = 6 \text{ kWh/m}^3$  [2] i pretpostavku da bioplinsko postrojenje radi 345 dana u godini, dobiva se snaga od  $P = 740 \text{ kW}$ . Odabran je *SUEZ's Jenbacher Gas Engines J208*. Njegove karakteristike su prikazane u tablici 7.2.

Tablica 7.2 Karakteristike motor generatora [45]

Tehnički podaci		
Raspored cilindara	-	linijski
Promjer cilindra	mm	135
Stapaj	mm	145
Volumen cilindra	l	2,08
Brzina vrtnje	o/min	1500
Vrsta motora	-	J208
Broj cilindara	-	8
Vrsta goriva	-	bioplin
Emisija NO <sub>x</sub>	mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	< 500
Izvedba	-	kontejnerska
Dimenzije kontejnera (d×š×v)	m	12,2×2,4×2,6
Masa	kg	6300
Izlazna snaga i korisnost		
$P_{el}$	kW	248
$\eta_{el}$	%	38,9
$P_t$	kW	307
$\eta_{el}$	%	48,2
$\eta_{uk}$	%	87,1

Da bi se u motor generatoru s električnom učinkovitošću  $\eta_{el} = 38,9 \%$  mogla generirati električna snaga  $P_{el} = 248 \text{ kW}$ , snaga koju je potrebno dovesti u motor je:



$$P_{el} = P \cdot \eta_{el} \Rightarrow P = \frac{P_{el}}{\eta_{el}} = \frac{248}{0,389} = 637,5 \text{ kW} < P = 740 \text{ kW},$$

odnosno manje od ukupno moguće snage bioplina.

Potrošnja goriva je:

$$B = \frac{P}{H_{d,bp}} = \frac{637,5}{21600} = 0,0295 \text{ m}^3/\text{s} = 106 \text{ m}^3/\text{h}$$

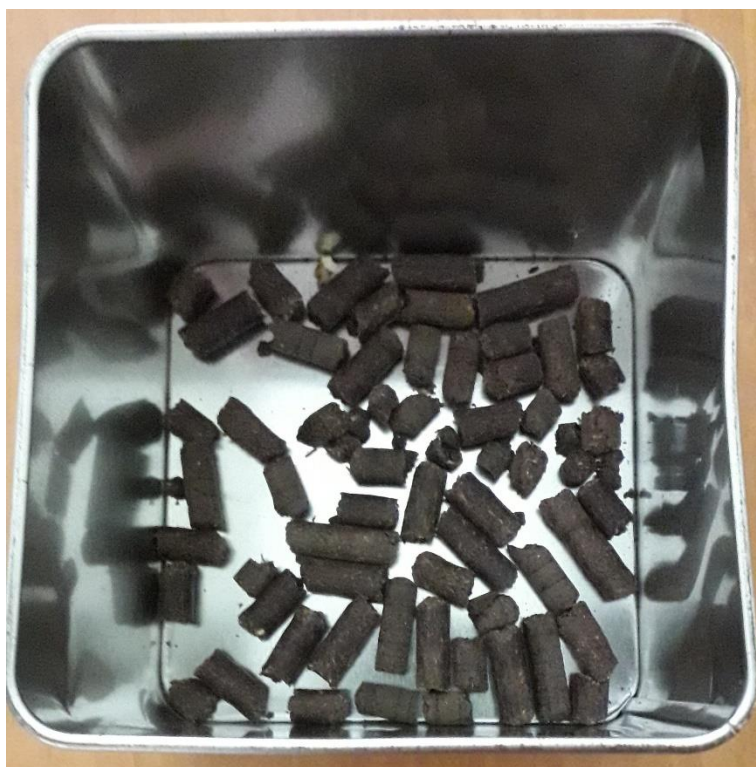
$$B = 2\,544 \text{ m}^3/\text{dan} < V_{bp} = 2\,961 \text{ m}^3/\text{dan},$$

odnosno manje od dnevno proizvedene količine bioplina.

Budući da je ukupna snaga grijalica u jednoj farmi ( $\Phi_{gr} = 400 \text{ kW}$ ) veća od topline koja se dobiva kogeneracijom ( $P_t = 307 \text{ kW}$ ), iskoristit će se samo topline potrebna za grijanje digestora i supstrata ( $\Phi = 71,3 \text{ kW}$ ), dok će se višak topline ( $235 \text{ kW}$ ) preko rashladnog tornja odvesti u okoliš.

U prilogu 1 prikazan je tlocrt parcele i dispozicija dijelova bioplinskog postrojenja.

Prilikom prikupljanja informacija o količinama gnoja, saznao sam da jedna farma peletira gnoj. Na taj se način poboljšava učinkovitost gnoja jer se sušenjem i komprimiranjem ukloni višak vlage dok hranjive tvari ostaju. Također, u tom ga je obliku (slika 7.13) puno lakše pobacati po polju. Od dobivenih uzoraka na fakultetu, u Laboratoriju za toplinska mjerenja, odredili smo ogrjevnu moć takvih peleta (slika 7.14) koja iznosi  $H_{d,ppg} = 15,76 \text{ MJ/kg}$ . Ta je vrijednost približna konvencionalnom gorivu poput crnogoričnog drva ( $H_{d,cd} = 16,3 \text{ MJ/kg}$ )[2] pa se postavlja pitanje može li se iskoristiti za dobivanje topline. U principu da, no izgaranjem peleta od gnoja stvara se više pepela te su veće emisije štetnih plinova u odnosu na drvene pelete. Nadalje, izgaranjem takvih peleta, ne iskorištava se puni potencijal gnoja. Naime, anaerobnom digestijom gnoja može se dobiti bioplin čija je donja ogrjevna moć veća od tih peleta ( $H_{d,bp} = 21,6 \text{ MJ/kg}$ )[2]. Također, izgaranjem se „bacaju u vjetar“ hranjive tvari koje bi, da se gnoj ili digestat, bace na polje, biljke mogle iskoristiti.



*Slika 7.13 Peleti od pilečeg gnoja*



*Slika 7.14 Priprema peleta za određivanje ogrjevne moći*

## 8. EKONOMSKA ANALIZA

U ovom će se poglavlju provesti ekonomska analiza, tj. analiza profitabilnosti bioplinskog postrojenja opisanog u prošlim poglavljima. Budući da je ovo idejni projekt neke stvari nisam zasebno dimenzionirao ni odabrao, no uzeo sam ih kod ekonomske analize u obzir.

### Investicijski troškovi

U tablici 8.1 prikazani su investicijski troškovi koji su procijenjeni pomoću podataka koje sam uspio pronaći na internetu, pomoću radova drugih studenata te pokojim upitom ljudi odgovornih za svoju struku.

*Tablica 8.1 Procjena investicijskih troškova bioplinskog postrojenja*

<b>Investicija</b>	<b>Jedinična cijena, kn</b>	<b>Količina</b>	<b>Ukupno, kn</b>
<b>Spremnik za sirovinu</b>	482.500,00	6	2.895.000,00
<b>Digestor</b>	608.400,00	4	2.433.600,00
<b>Predspremnik</b>	45.000,00	4	180.000,00
<b>Spremnik digestata</b>	821.584,56	4	3.286.338,25
<b>Prilazne ceste, manipulativni prostor, priprema terena, asfaltiranje</b>	300.000,00	1	300.000,00
<b>Membrana za bioplin</b>	-	-	760.000,00
<b>Pužni transporter</b>	5.500,00	4	22.000,00
<b>Pumpa za vodu</b>	7.500,00	4	30.000,00
<b>Pumpa za digestat</b>	10.000,00	4	40.000,00
<b>Radni stroj, utovarivač</b>	1.000.000,00	1	1.000.000,00
<b>Motor generator</b>	3.000.000,00	1	3.000.000,00
<b>Sustav grijanja digestora</b>	50.000,00	4	200.000,00
<b>Mjerni instrumenti, regulacija</b>	500.000,00	1	500.000,00
<b>Projektiranje, dozvole, priključak na mrežu</b>	2.000.000,00	1	2.000.000,00
		<b>Σ</b>	<b>16.646.938,25</b>

Ukupni investicijski troškovi iznose  $I_{uk} = 16\ 646\ 938,25$  kn.

### **Troškovi održavanja**

Za procjenu troškova održavanja obično se uzima 3% od investicijskih troškova, tj.:

$$T_o = 0,03 \cdot I_{uk} = 0,03 \cdot 16\,646\,938,25 = 499\,408,15 \text{ kn/god}$$

### **Troškovi pogona**

Troškovi pogona podrazumijevaju nabavu i dobavu sirovine za pogon postrojenja. Budući da se 5 farmi nalazi u istoj ulici, postrojenje je smješteno kraj njih tako da je dovoz gnoja računat samo za 10 farmi. U prilogu 2 i 3 nalaze se karte općine s ucrtanim položajima farmi i bioplinskog postrojenja. Uz trenutnu cijenu plavog dizela  $c_{pd} = 9,45 \text{ kn/l}$  [46] dobiva se da su troškovi dobave pilećeg gnoja za 10 farmi na godišnjoj razini  $T_{pg} = 2\,000 \text{ kn}$ . Procjena troškova dobave ostataka od branja kukuruza u zrnju rađena je s pretpostavkom da cijena branja samog kukuruza nema utjecaja jer, kako je već navedeno, ostaci bi se prikupljali u prikolicu spojenu na kombajn kojem je glavni cilj pobrati kukuruz. Stoga je cijena dobave ostataka od branja kukuruza u zrnju procijenjena na  $T_o = 5\,000 \text{ kn}$ . Ukupni troškovi pogona tada iznose  $T_p = 7\,000 \text{ kn}$ .

### **Troškovi električne energije**

Za procjenu troškova električne energije bioplinskog postrojenja uzima se da postrojenje troši 15% od ukupne izlazne snage postrojenja, odnosno:

$$P_{el,bp} = 0,15 \cdot P_{p,el} = 0,15 \cdot 248 = 37,2 \text{ kW.}$$

Prema HEP-ovoj kategorizaciji potrošača takvo bi bioplinsko postrojenje spadalo u kategoriju „Poduzetništvo“, naponska razina „Niski napon“ te tarifni model „Crveni“. U tom tarifnom modelu cijena električne energije visoke tarife iznosi  $c_{VT} = 2,24 \text{ kn/kWh}$  [47]. Kako je već navedeno, pretpostavlja se da bi postrojenje radilo 345 dana u godini čime se dobiva:

$$E_{el,bp} = 37,2 \cdot 345 \cdot 24 = 308\,016 \text{ kWh.}$$

Tada troškovi električne energije bioplinskog postrojenja iznose:

$$T_{el,bp} = E_{el,bp} \cdot c_{VT} = 308\,016 \cdot 2,24 = 689\,955,84 \text{ kn.}$$

## Zarada od prodaje električne energije

Cijena po kojoj se prodaje električna energija proizvedena u takvom bioplinskom postrojenju definirana je u *Javnom natječaju za dodjelu tržišne premije i zajamčene otkupne cijene za poticanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije 1/2020* [40], prema kojem maksimalna referentna vrijednost zajamčene otkupne cijene za skupinu f.2. (elektrane na bioplin instalirane snage veće od 50 kW do uključivo 500 kW) iznosi  $c_{RV} = 1\ 130\ \text{kn/MWh} = 1,13\ \text{kn/kWh}$ . Postrojenje snage 248 kW koje radi 345 dana u godini proizvede:

$$E_{el} = 248 \cdot 345 \cdot 24 = 2\ 053\ 440\ \text{kWh.}$$

Zarada od prodaje te energije iznosi:

$$Z_{el} = E_{el} \cdot c_{RV} = 2\ 053\ 440 \cdot 1,13 = 2\ 320\ 387,20\ \text{kn.}$$

## Bruto zarada postrojenja

Bruto zarada postrojenja računa se kao:

$$\begin{aligned} Z_{\text{god,bruto}} &= Z_{el} - T_{el,bp} - T_p - T_o & (8.1) \\ Z_{\text{god,bruto}} &= 2\ 320\ 387,20 - 689\ 955,84 - 7\ 000 - 499\ 408,15 = \\ Z_{\text{god,bruto}} &= 1\ 124\ 023,21\ \text{kn.} \end{aligned}$$

## Godišnja neto zarada

Godišnja neto zarada računa se kao godišnja bruto zarada umanjena za vrijednost poreza na dobit koji iznosi 10 % [48].

$$\begin{aligned} Z_{\text{god,neto}} &= Z_{\text{god,bruto}} - 0,1 \cdot Z_{\text{god,bruto}} = 1\ 124\ 023,21 - 0,1 \cdot 1\ 124\ 023,21 = \\ Z_{\text{god,neto}} &= 1\ 011\ 620,89\ \text{kn.} \end{aligned}$$

Sljedeći izrazi služe za ocjenu isplativosti ulaganja [49, 50].

### **Jednostavni period povrata**

To je vrijeme koje je potrebno da se budućim novčanim primicima (zaradom) pokrije početno uloženi iznos, odnosno:

$$JPP = \frac{I_{uk}}{Z_{god,neto}} = \frac{16\,646\,938,25}{1\,011\,620,89} = 16,46 \text{ god.}$$

### **Indeks profitabilnosti**

Indeks profitabilnosti predstavlja odnos sadašnje vrijednosti neto novčanih tokova i investicijskih troškova, odnosno:

$$IP = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{Z_{god,neto}}{(1+k)^t}}{I_{uk}} \quad (8.2)$$

gdje je:

$T = 12$  godina, ekonomski životni vijek projekta,

$k = 6\%$ , obračunska kamatna stopa [51]

Projekt je prihvatljiv ako je indeks profitabilnosti veći od 1.

$$IP = \frac{\sum_{t=1}^{12} \frac{1\,011\,620,89}{(1+0,06)^t}}{16\,646\,938,28} = 0,51$$

### **Neto sadašnja vrijednost**

Neto sadašnja vrijednost definira se kao razlika između sadašnje vrijednosti novčanih primitaka i sadašnje vrijednosti novčanih izdataka:

$$NSV = \sum_{t=1}^T \frac{Z_{god,neto}}{(1+k)^t} - I_{uk}, \text{ kn}$$

Projekt je prihvatljiv ako je neto sadašnja vrijednost veća od nule.

$$NSV = \sum_{t=1}^{12} \frac{1\ 011\ 620,89}{(1 + 0,06)^t} - 16\ 646\ 938,28 = -8\ 165\ 666,57 \text{ kn}$$

Budući da je *indeks profitabilnosti* manji od 1 te da je *neto sadašnja vrijednost* negativna, projekt nije isplativ. Valjda ponoviti kako je ovo idejni projekt te su troškovi procijenjeni.

Prema smjernicama o odabiru lokacije postrojenja [3], da se lokacija treba nalaziti na prikladnoj udaljenosti od naselja kako bi se izbjegli neugodni mirisi, nije predviđeno iskorištavanje viška topline. Procijenjeno je da je taj višak topline (235 kW) premali da bi se isplatila izgradnja sustava daljinskog grijanja. Umjesto toga mogla bi se izgraditi sušara za drvenu sječku, kukuruz, ... no to nije uzeto u obzir ovim radom.

### 8.1. Analiza osjetljivosti

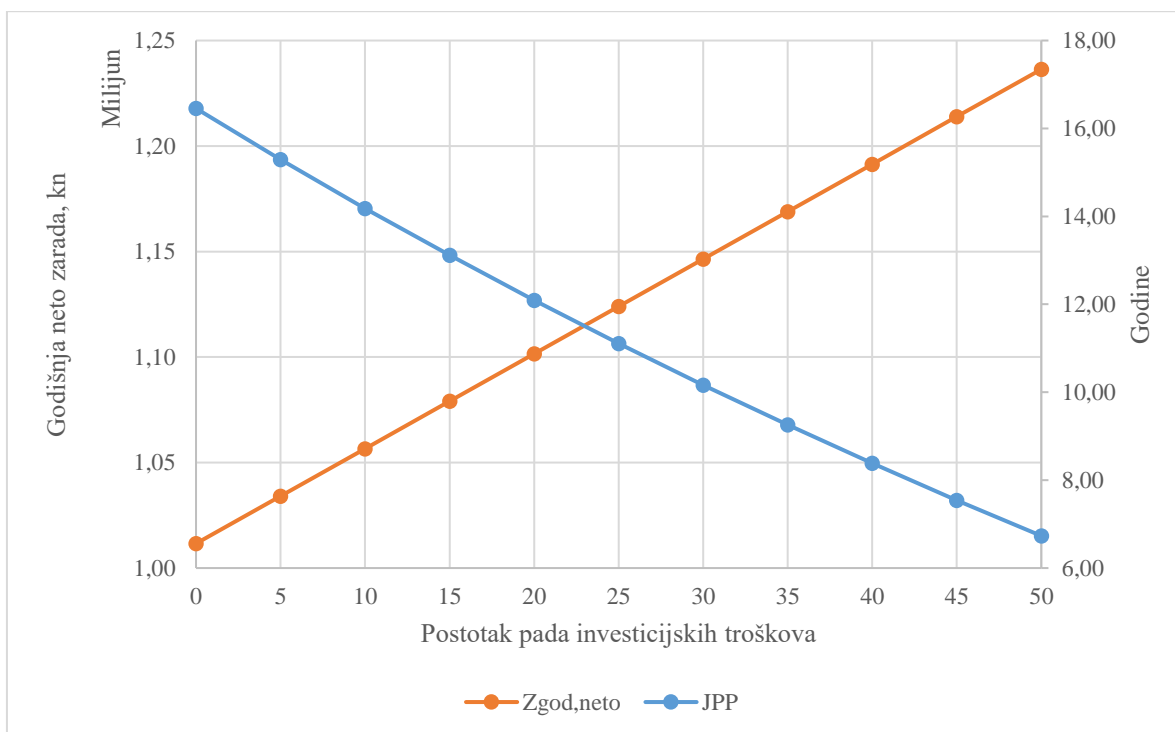
Analizirat će se slučajevi pada cijene investicijskih troškova, porasta referentne vrijednosti cijene otkupa električne energije te nekoliko kombinacija, s ciljem utvrđivanja minimalno potrebnih promjena da bi indeks profitabilnosti bio veći od 1 i neto sadašnja vrijednosti pozitivan, odnosno da bi projekt mogli smatrati koliko toliko isplativim. Ostale vrijednosti ostat će nepromijenjene.

#### 8.1.1. Pad investicijskih troškova

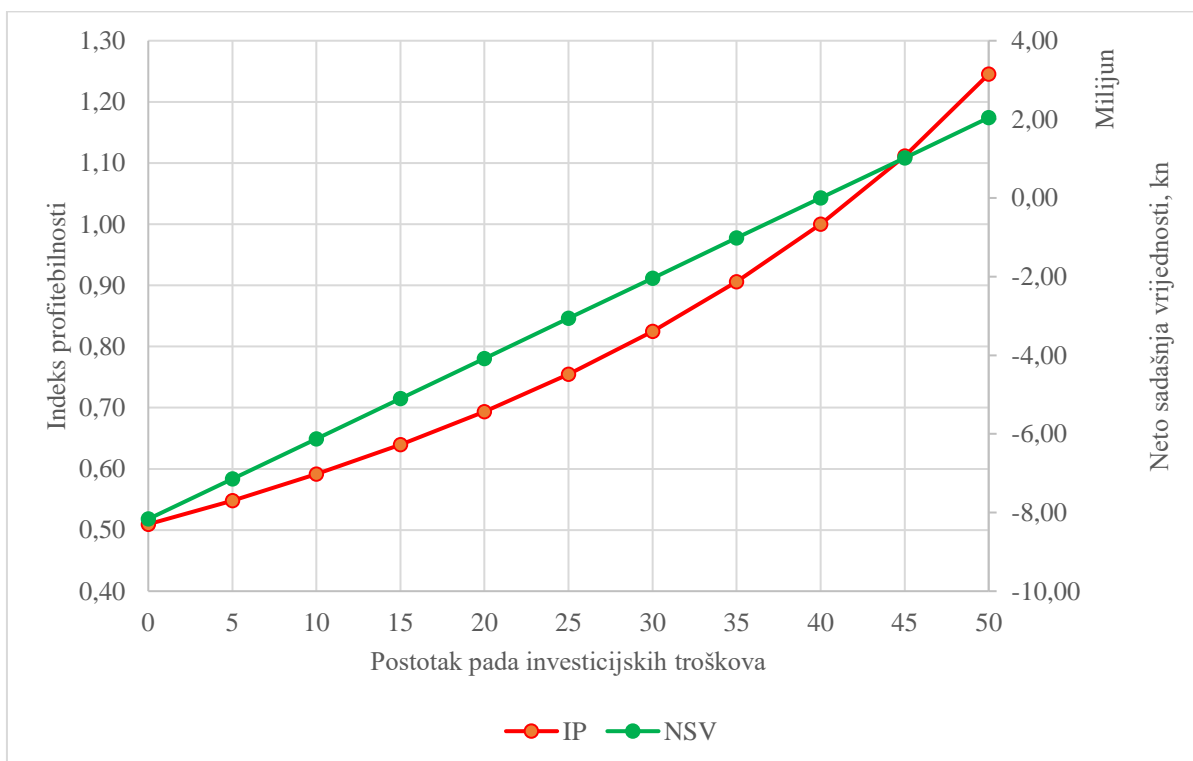
U tablici 8.2 prikazan je pad investicijskih troškova za određeni postotak te odgovarajuće vrijednosti godišnje neto zarade, jednostavnog perioda povrata, indeksa profitabilnosti te neto sadašnje vrijednosti.

Tablica 8.2 Analizu osjetljivosti na pad investicijskih troškova

%	<i>I<sub>uk</sub></i> , kn	<i>Z<sub>god,neto</sub></i> , kn	<i>JPP</i> , god	<i>IP</i>	<i>NSV</i> , kn
<b>0</b>	16 646 938,25	1 011 620,89	16,46	0,51	-8 165 666,57
<b>5</b>	15 814 591,34	1 034 094,26	15,29	0,55	-7 144 906,46
<b>10</b>	14 982 244,43	1 056 567,62	14,18	0,59	-6 124 146,35
<b>15</b>	14 149 897,51	1 079 040,99	13,11	0,64	-5 103 386,24
<b>20</b>	13 317 550,60	1 101 514,36	12,09	0,69	-4 082 626,13
<b>25</b>	12 485 203,69	1 123 987,72	11,11	0,75	-3 061 866,02
<b>30</b>	11 652 856,78	1 146 461,09	10,16	0,82	-2 041 105,90
<b>35</b>	10 820 509,86	1 168 934,46	9,26	0,91	-1 020 345,79
<b>40</b>	9 988 162,95	1 191 407,82	8,38	1,00	414,32
<b>45</b>	9 155 816,04	1 213 881,19	7,54	1,11	1 021 174,43
<b>50</b>	8 323 469,13	1 236 354,56	6,73	1,25	2 041 934,54



Slika 8.1 Ovisnost  $Z_{god,neto}$  i JPP-a o padu investicijskih troškova



Slika 8.2 Ovisnost IP-a i NSV-a o padu investicijskih troškova



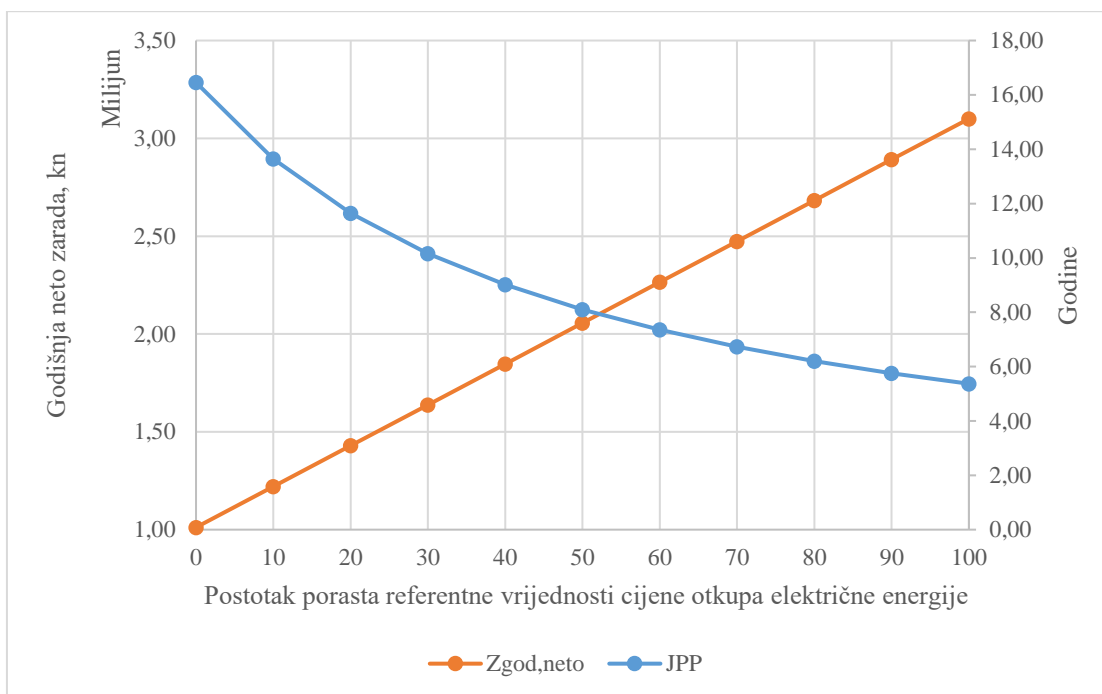
Iz dijagrama na slikama 8.1 i 8.2 vidimo kako se smanjenjem investicijskih troškova povećavaju godišnja neto zarada, indeks profitabilnosti i neto sadašnja vrijednost, a smanjuje jednostavni period povrata. Prema tim podacima, investicijski bi troškovi trebali pasti za minimalno 40 %, odnosno na 9 988 162,95 kn, da bi uopće mogli razmišljati o isplativosti projekta.

#### 8.1.2. Porast referentne vrijednosti cijene otkupa električne energije

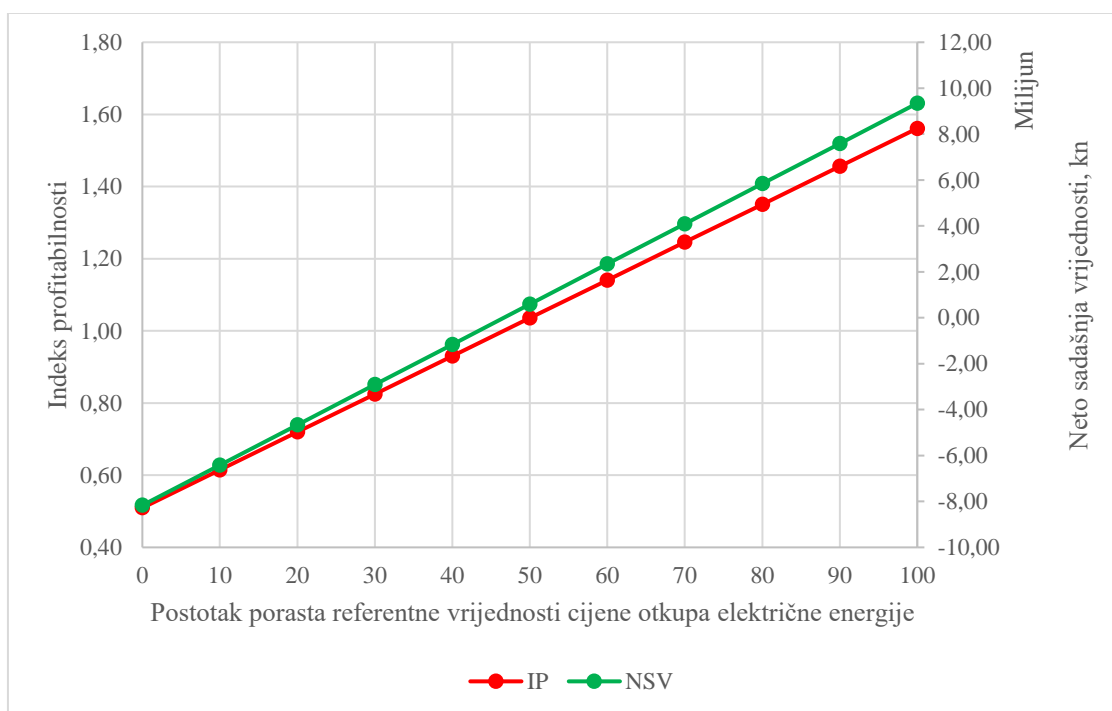
U tablici 8.3 prikazan je porast referentne vrijednosti otkupne cijene električne energije za određeni postotak te odgovarajuće vrijednosti godišnje neto zarade, jednostavnog perioda povrata, indeksa profitabilnosti te neto sadašnje vrijednosti.

*Tablica 8.3 Analiza osjetljivosti na porast referentne vrijednosti otkupne cijene električne energije*

<b>%</b>	<b>CRV, kn</b>	<b>Z<sub>god,neto</sub>, kn</b>	<b>JPP, god</b>	<b>IP</b>	<b>NSV, kn</b>
0	1,13	1 011 620,89	16,46	0,51	-8 165 666,57
10	1,24	1 220 455,74	13,64	0,62	-6 414 827,80
20	1,36	1 429 290,59	11,65	0,72	-4 663 989,02
30	1,47	1 638 125,44	10,16	0,83	-2 913 150,25
40	1,58	1 846 960,28	9,01	0,93	-1 162 311,47
50	1,70	2 055 795,13	8,10	1,04	588 527,30
60	1,81	2 264 629,98	7,35	1,14	2 339 366,08
70	1,92	2 473 464,83	6,73	1,25	4 090 204,85
80	2,03	2 682 299,68	6,21	1,35	5 841 043,63
90	2,15	2 891 134,52	5,76	1,46	7 591 882,40
100	2,26	3 099 969,37	5,37	1,56	9 342 721,18



Slika 8.3 Ovisnost  $Z_{god,neto}$  i JPP-a o porastu referentne vrijednosti otkupne cijene električne energije



Slika 8.4 Ovisnost IP-a i NSV-a o porastu referentne vrijednosti otkupne cijene električne energije

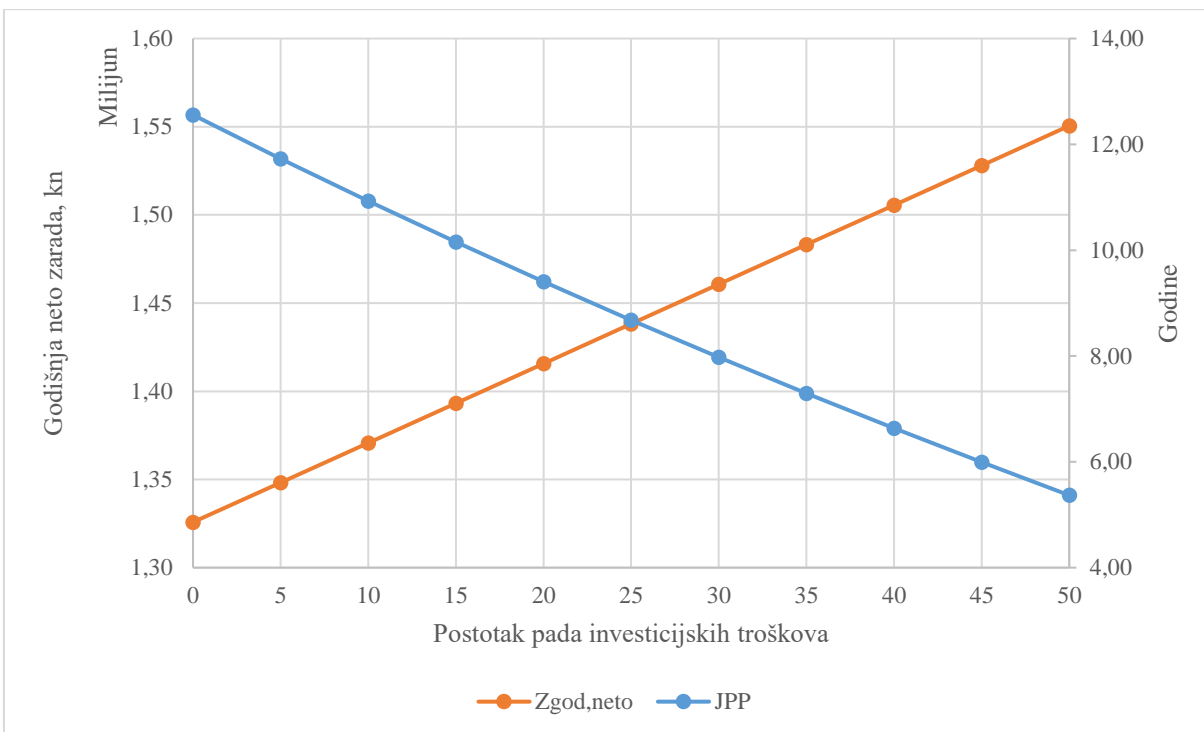
Iz dijagrama na slikama 8.3 i 8.4 vidimo kako se povećanjem referentne vrijednosti cijene otkupa električne energije povećavaju godišnja neto zarada, indeks profitabilnosti i neto sadašnja vrijednost, a smanjuje jednostavni period povrata. Prema tim podacima, referentna vrijednost cijene otkupa električne energije trebala bi porasti za oko 50 %, odnosno na  $c_{RV} = 1,7$  kn/kWh da bi uopće mogli razmišljati o isplativosti projekta.

### 8.1.3. Pad investicijskih troškova uz $c_{RV} = 1,3$ kn/kWh

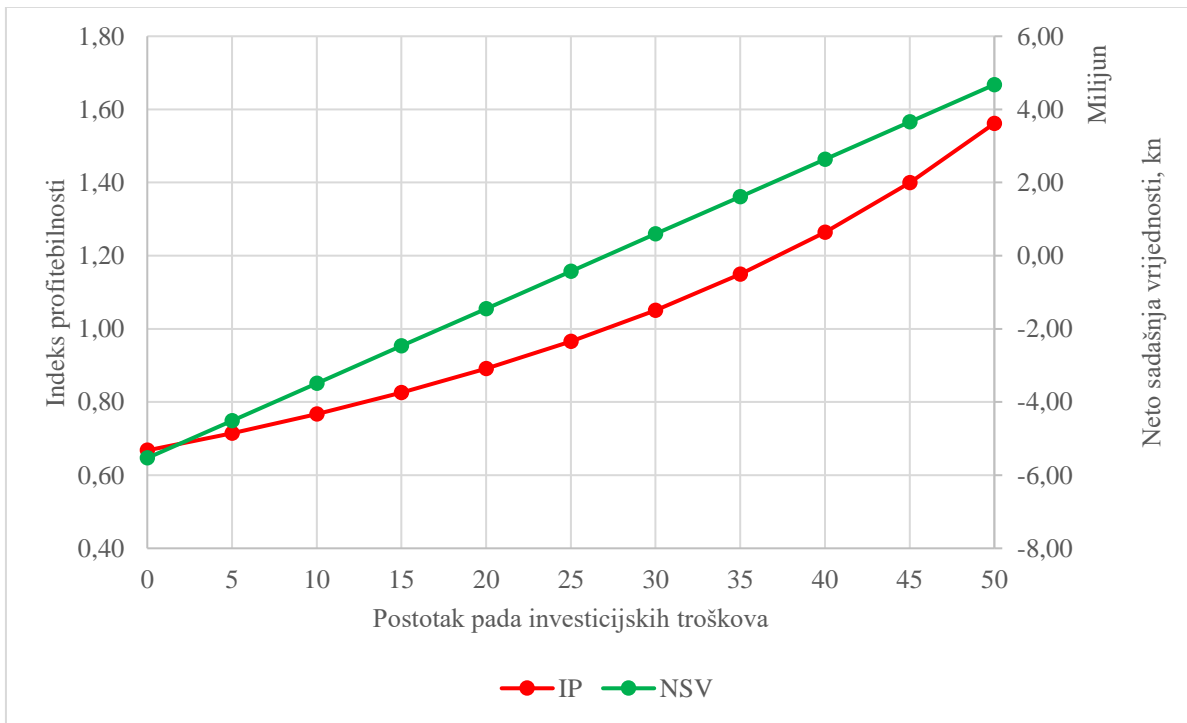
U tablici 8.4 prikazan je pad investicijskih troškova za određeni postotak te odgovarajuće vrijednosti godišnje neto zarade, jednostavnog perioda povrata, indeksa profitabilnosti te neto sadašnje vrijednosti uz referentnu vrijednost cijene otkupa električne energije od  $c_{RV} = 1,3$  kn/kWh.

*Tablica 8.4 Analiza osjetljivosti na pad investicijskih troškova uz  $c_{RV} = 1,3$  kn/kWh*

<b>%</b>	<b><math>I_{uk}</math>, kn</b>	<b><math>Z_{god,neto}</math>, kn</b>	<b><math>JPP</math>, god</b>	<b><math>IP</math></b>	<b><math>NSV</math>, kn</b>
0	16 646 938,25	1 011 620,89	16,46	0,51	-8 165 666,57
5	15 814 591,34	1 348 270,58	11,73	0,71	-4 510 901,22
10	14 982 244,43	1 370 743,94	10,93	0,77	-3 490 141,11
15	14 149 897,51	1 393 217,31	10,16	0,83	-2 469 381,00
20	13 317 550,60	1 415 690,68	9,41	0,89	-1 448 620,89
25	12 485 203,69	1 438 164,04	8,68	0,97	-427 860,78
30	11 652 856,78	1 460 637,41	7,98	1,05	592 899,33
35	10 820 509,86	1 483 110,78	7,30	1,15	1 613 659,44
40	9 988 162,95	1 505 584,14	6,63	1,26	2 634 419,55
45	9 155 816,038	1 528 057,51	5,99	1,40	3 655 179,67
50	8 323 469,125	1 550 530,88	5,37	1,56	4 675 939,78



Slika 8.5 Ovisnost  $Z_{god,neto}$  i JPP-a o padu investicijskih troškova uz  $c_{RV} = 1,3 \text{ kn/kWh}$



Slika 8.6 Ovisnost IP-a i NSV-a o padu investicijskih troškova uz  $c_{RV} = 1,3 \text{ kn/kWh}$

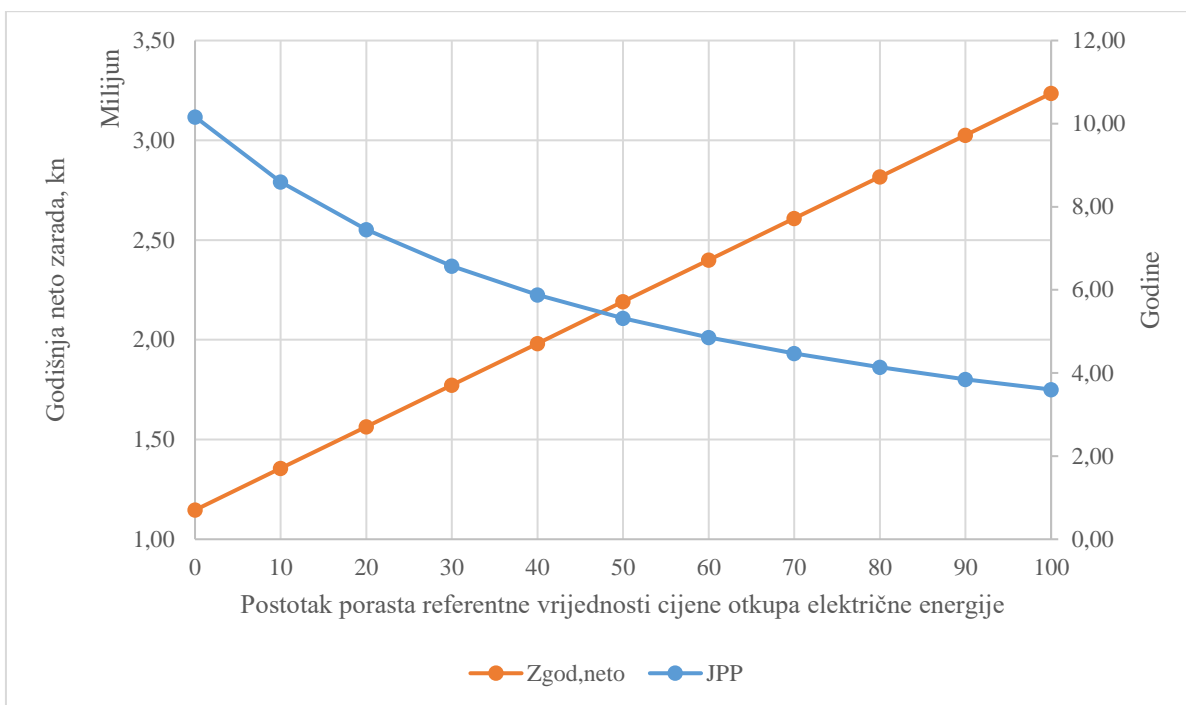
Iz dijagrama na slikama 8.5 i 8.6 vidimo kako se uz  $c_{RV} = 1,3$  kn/kWh i smanjenjem investicijskih troškova povećavaju godišnja neto zarada, indeks profitabilnosti i neto sadašnja vrijednost, a smanjuje jednostavni period povrata. Prema tim podacima, zbog povećanja referentne vrijednosti cijene otkupa električne energije na  $c_{RV} = 1,3$  kn/kWh, investicijski bi troškovi trebali pasti za minimalno 30 %, odnosno na 11 652 856,78, da bi uopće mogli razmišljati o isplativosti projekta. U odnosu na rezultate od iz poglavlja 8.1.1 to je manje za 10 %.

#### 8.1.4. Porast referentne vrijednosti cijene otkupa električne energije uz 30 posto niže investicijske troškove

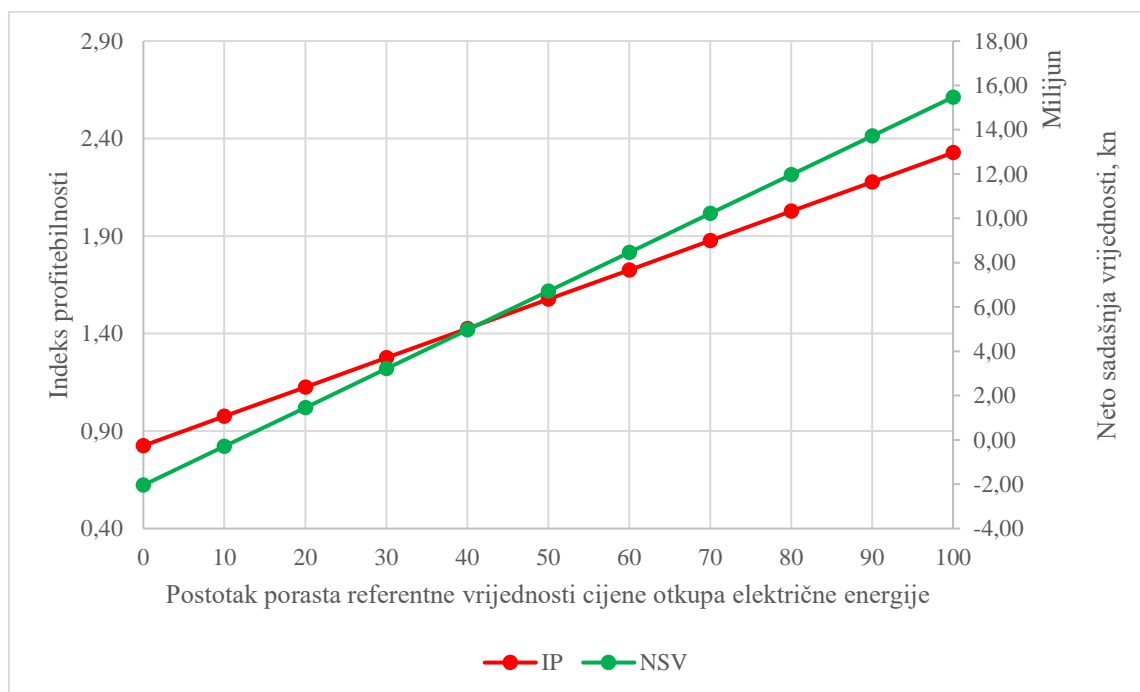
U tablici 8.5 prikazan je porast referentne vrijednosti otkupne cijene električne energije za određeni postotak te odgovarajuće vrijednosti godišnje neto zarade, jednostavnog perioda povrata, indeksa profitabilnosti te neto sadašnje vrijednosti uz investicijske troškove manje za 30 %, odnosno  $I_{uk} = 11\ 652\ 856,78$  kn.

*Tablica 8.5 Analiza osjetljivosti na porast referentne vrijednosti otkupne cijene električne energije uz 30% manje investicijske troškove*

<b>%</b>	<b><math>c_{RV}</math>, kn/kWh</b>	<b><math>Z_{god,neto}</math>, kn</b>	<b><math>JPP</math>, god</b>	<b><math>IP</math></b>	<b><math>NSV</math>, kn</b>
0	1,13	1 146 461	10,16	0,82	-2 041 105,90
10	1,24	1 355 296	8,60	0,98	-2 902 67,13
20	1,36	1 564 131	7,45	1,13	1 460 571,65
30	1,47	1 772 966	6,57	1,28	3 211 410,42
40	1,58	1 981 800	5,88	1,43	4 962 249,20
50	1,70	2 190 635	5,32	1,58	6 713 087,97
60	1,81	2 399 470	4,86	1,73	8 463 926,75
70	1,92	2 608 305	4,47	1,88	10 214 765,52
80	2,03	2 817 140	4,14	2,03	11 965 604,30
90	2,15	3 025 975	3,85	2,18	13 716 443,07
100	2,26	3 234 810	3,60	2,33	15 467 281,85



Slika 8.7 Ovisnost  $Z_{god,neto}$  i JPP-a o porastu referentne vrijednosti otkupne cijene električne energije uz 30 % manje investicijske troškove



Slika 8.8 Ovisnost IP-a i NSV-a o porastu referentne vrijednosti otkupne cijene električne energije uz 30 % manje investicijske troškove

Iz dijagrama na slikama 8.7 i 8.8 vidimo kako se uz 30 % manje investicijske troškove povećanjem referentne vrijednosti cijene otkupa električne energije povećavaju godišnja neto zarada, indeks profitabilnosti i neto sadašnja vrijednost, a smanjuje jednostavni period povrata. Prema tim podacima, zbog 30 % manjih investicijskih troškova, referentna vrijednost cijene otkupa električne energije trebala bi porasti za oko 20 %, odnosno na  $c_{RV} = 1,36 \text{ kn/kWh}$  da bi uopće mogli razmišljati o isplativosti projekta. U odnosu na rezultate u poglavlju 8.1.2 to je manje za 30 %.

U prethodnim je analizama pokazano da se s manjim investicijskim troškovima te većim referentnim vrijednostima cijene otkupa električne energije ili njihovim kombinacijama, može ostvariti indeks profitabilnosti veći od 1 i pozitivna neto sadašnja vrijednost. No, kao što je već rečeno, ovo je idejni projekt i valja imati na umu da su troškovi procijenjeni ta da može doći i do povećanja cijene električne energije koje postrojenje troši, odnosno do povećanje troškova, što ovdje nije analizirano. Također nije rađena analiza osjetljivosti na povećanje troškova pogona (nabave sirovina) budući da su relativno mali u odnosu na ostale troškove.

## 9. ZAKLJUČAK

U svijetu u kojem potreba za energijom neprestano raste važno je osigurati kontinuiranu opskrbu. Tradicionalni načini dobivanja električne energije (termoelektrane) i toplinske energije, iskorištavaju fosilna goriva čija je količina ograničena i svakim se danom smanjuje. Da se i ne smanjuje, izgaranjem fosilnih goriva ispuštaju se dimni plinovi koji negativno utječu na atmosferu i klimatske promjene. Zato je vrlo važno podizati svijest o obnovljivim, ekološki prihvatljivijim izvodima energije koji minimalno zagađuju okoliš i težiti ka njihovoj što većoj implementaciji u svakodnevni život. Obnovljiv izvor energije koji se koristi u ovom radu je biomasa odnosno bioplin. Biomasa podrazumijeva biorazgradiv dio proizvoda, otpada i ostataka biološkog podrijetla iz poljoprivrede, uključujući tvari biljnog i životinjskog podrijetla, iz šumarstva i s njima povezanih proizvodnih djelatnosti, uključujući ribarstvo i akvakulturu, te biorazgradiv dio otpada, uključujući industrijski i komunalni otpad biološkog podrijetla. Bioplin je goriva mješavina plinova ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ , ...) koji nastaju prilikom truljenja organske tvari (biomase) bez prisustva kisika. Taj, biokemijski proces razgradnje kompleksnih organskih spojeva bez prisustva kisika naziva se anaerobna digestija. Uz bioplin, iz procesa anaerobne digestije nastaje i digestat (nerazgrađeni ostaci supstrata) koji predstavlja izvrsno gnojivo za poljoprivredu.

Cilj ovog rada bio je napraviti idejni projekt bioplinskog postrojenja koje za svoj pogon koristi pileći gnoj s obližnjih farmi te ostatke od branja kukuruza u zrnu s obližnjih polja. Farmeri trenutno gnoj koriste za gnojenje poljoprivrednih usjeva, no anaerobnom digestijom tog gnoja mogli bi dobiti električnu i toplinsku energiju te bolje gnojivo. Prema uvjetima natječaja *Javni natječaj za dodjelu tržišne premije i zajamčene otkupne cijene za poticanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije 1/2020* [40] omjer miješanja gnoja i ostataka od branja kukuruza u zrnu je 70:30. Moguća količina gnoja na godišnjoj razini sa svih 15 farmi iznosi  $m_g = 2\ 100$  t, a iz omjera natječaja, maksimalna količina ostatak od branja kukuruza u zrnu je  $m_o = 900$  t godišnje. Iz bioplinskog kalkulatora dobiva se godišnja količina bioplina od  $V_{bp} = 1\ 021\ 545$  m<sup>3</sup>. Zamišljeno je da se izgradi 6 spremnika za sirovinu, 3 za gnoj, 3 za ostatke od branja kukuruza u zrnu, 4 predspremnika, 4 digestora, 1 motor generator i 4 spremnika za digestat. Odabrani motor generator je električne snage 248 kW, te generiranu električnu energiju šalje u mrežu, i 307 kW otpadne topline, od kojih se 72 kW iskorištava za grijanje digestora dok se ostatak odvodi preko rashladnog tornja u okoliš. Postrojenje je smješteno u ulici u kojoj se nalazi 5 farmi.



Kako je ovo idejni projekt, investicijski troškovi su procijenjeni, a ekonomska analiza je pokazala da projekt nije isplativ. To je bilo i za očekivati budući da u Hrvatskoj nema postrojenja takvih kapaciteta (ima puno većih). Analizom osjetljivosti pokazalo se da, uz pad investicijskih troškova i povećanjem referentne vrijednosti cijene otkupa električne energije od nekoliko desetaka posto, projekt može postati isplativ. Prema tome, glavni razlozi neisplativosti projekta su visoki investicijski troškovi te val poskupljenja koji nas prati zadnjih par godina, sigurno ne ide tome u prilog. Drugi razlog neisplativosti projekta je niska otkupna cijena električne energije. Na online konferenciji „*Energija u poljoprivredi – kako do obnovljivih izvora*“ [52, 53] održanoj 9.6.2022. preko ZOOM platforme, poljoprivrednik i predsjednik Hrvatske udruge proizvođača bioplina, Marijan Cenger, kao odgovor na pitanje o čemu bi svaki poljoprivrednik trebao razmišljati kada je riječ o obnovljivim izvorima energije rekao je da bi trebao razmišljati o povezivanju energetike i poljoprivrede jer u ovim energetske krizama dugoročna opstojnost poljoprivrednika je upitna. Nadovezujući se na probleme s iskorištavanjem bioplina izjavio je: *„Zapeli smo u administraciji, u nepovezivanju poljoprivrede i energetike, nerazumijevanju između ministarstava, vođenju politike, jedni energetike drugi poljoprivrede, i tu po mojem iskustvu vođenja udruge 4 godine leži najveći problem, a imamo, možemo i znamo pronaći vrlo brzo i vrlo konkretna i kvalitetna rješenja.“* Kasnije, osvrćući se na pitanje što koči poljoprivrednike da se okrenu obnovljivim izvorima energije ponovio je administraciju te nadodao: *„Danas nitko ne može biti motiviran graditi bioplinsko postrojenje, i oni koji su potpisali ugovore s HROTE-om prošle godine danas ih otkazuju i pod cijenom od 600 do 700 tisuća kuna izgubljenih sredstava zbog toga što naša cijena struje nije rasla osim nekih dva i nešto posto tako da smo mi i dalje na cijeni od 160 €, dok su vam inputi, ne govoreći o žitaricama koji se ipak jedan dio koristi u bioplinskim postrojenjima, nego sami stajnjak koji je lošim politikama Ministarstva poljoprivrede u dijelu poticanja izvoza stajnjaka direktno na polje dalo cijenu tom proizvodu 500 kn za tonu, a nama je gornja granica ulaza po trenutnoj cijeni električne energije od 1,3 kn iznosi 250 kn.“* Ukratko, Ministarstvo ne povećava cijenu otkupa električne energije adekvatno povećanju cijene sirovina i sve vezano za njihovu dobavu, štoviše, fiksirana je. Kazao je kako je stanje alarmantno i da se već na nekim većim bioplinskim postrojenjima gase prvi motori te predlaže donošenje zakonske uredbe od strane vlade da se dozvoli rekalkulacija cijena koja će uzeti u obzir rast cijene inputa da bi u konačnici bili održivi.

Iako je ova analiza pokazala da ovakav projekt nije isplativ, u svijetu postoje bioplinska postrojenja sličnih kapaciteta. Njihova isplativost i održivost naravno ovise od gospodarskoj situaciji, ali i želji i sposobnosti svake pojedine države da prepozna značaj koji takva postrojenja mogu

pridonijeti. U energetskej tranziciji ka „*carbon free society*“, prirodni plin ima veliku ulogu jer je od fosilnih goriva on ekološki najpovoljniji. Korištenjem anaerobne digestije „nalazišta“ bioplina, postaju pristupačnija i, pridržavajući se uvjeta obnovljivosti biomase, na neki način neiscrpna. Klimatske promjene, energetska i ekonomska kriza uzorkovane iskorištavanjem fosilnih goriva prisiljavaju nas kao društvo da se okrenemo obnovljivim izvorima energije, kružnom gospodarstvu i sve to s ciljem održivog razvoja. Energija ne može nestati, no njezinim rasipanjem radi ljudske gluposti pokazujemo kakvi smo „gospodari“. Svjedočimo kako zbog političkih prepucavanja produbljujemo te krize i ovisnost o uvoznim energentima, najčešće fosilnim gorivima. Važnost ovakvih postrojenja leži u okretanju domaćoj proizvodnji, povezivanju lokalnih gospodarstava i ostalih dijelova društva te stvaranju energetske neovisnosti nekog područja.

## LITERATURA

- [1]. Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji, NN 138/21
- [2]. Đurđević, D., Wolf I., materijali s predavanja s kolegija „Obnovljivi izvori energije“, <https://moodle.srce.hr/2020-2021/course/view.php?id=74160>, ožujak 2022.
- [3]. Al Seadi T. i dr.: „Priručnik za bioplin“, Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, 2009.
- [4]. <https://eucbeniki.sio.si/nit4/1315/bioplina.jpg>, ožujak 2022.
- [5]. <https://www.odraz.hr/nase-teme/odrzivi-razvoj/odrzivi-razvoj/>, srpanj 2022.
- [6]. <https://www.worldbiogasassociation.org/global-potential-of-biogas/>, lipanj 2022.
- [7]. <https://www.irena.org/bioenergy>, lipanj 2022.
- [8]. E. Korres, N. i dr.: „Bioenergy Production by Anaerobic digestion using agricultural biomass and organic wastes“, Routledge, SAD i Kanada, 2013.
- [9]. <https://www.researchgate.net/profile/Samir-Khanal/publication/274028972/figure/fig2/AS:329763962015744@1455633263013/Fixed-dome-Chinese-type-digester-adopted-from-Gunnerson-and-Stuckey-66.png>, ožujak 2022.
- [10]. <https://www.researchgate.net/profile/Khondokar-Rahman/publication/299394844/figure/fig12/AS:781763014045696@1563398235000/Indian-floating-cover-anaerobic-digestion-plants-Gunnerson-and-Stuckey-1986.png>, ožujak 2022.
- [11]. [https://sc04.alicdn.com/kf/HTB1mV\\_MQFXXXblXpXXq6xXFXXE.jpg](https://sc04.alicdn.com/kf/HTB1mV_MQFXXXblXpXXq6xXFXXE.jpg), ožujak 2022.
- [12]. <https://cms.lowimpact.org/wp-content/uploads/biogas-digester.jpg>, ožujak 2022.
- [13]. [https://www.bioen.eco/wp-content/uploads/2021/06/dji\\_0042.jpg](https://www.bioen.eco/wp-content/uploads/2021/06/dji_0042.jpg), ožujak 2022.
- [14]. <https://www.ekovjesnik.hr/poster/1569424146.0631.jpg>, ožujak 2022.
- [15]. <https://com-ing.hr/wp-content/uploads/2019/04/Flowsheet2.jpg>, ožujak 2022.
- [16]. <https://www.rijeka.hr/obilazak-postrojenja-proizvodnju-elektricne-energije-iz-odlagalisnog-plina-2/>, ožujak 2022.
- [17]. <https://www.menea.hr/wp-content/uploads/2017/03/Vi%C5%A1evac.jpg>, ožujak 2022.
- [18]. [https://olajshop.hu/shop\\_ordered/16943/pic/gazmotor.jpg](https://olajshop.hu/shop_ordered/16943/pic/gazmotor.jpg), travanj 2022.
- [19]. Damić, D., „Upotrebljivost *dual fuel* motora pogonjenih proizvodnim plinom s aspekta smanjenja onečišćenja zraka – moguća alternativa klasičnim dizelskim motorima“, Multidisciplinarni znanstveni časopis Pomorstvo, god. 26, br. 1, Rijeka, lipanj 2012.

- [20]. [https://www.youtube.com/watch?v=SpJOJIdyyyQ&ab\\_channel=StefanWieners](https://www.youtube.com/watch?v=SpJOJIdyyyQ&ab_channel=StefanWieners), travanj 2022.
- [21]. [https://beta.finance.si//bmc/pics//cache\\_05/052-055-VODIK-4-6058af541c3fd-6058af541c9a2.jpg-widths/052-055-VODIK-4-6058af541c3fd-6058af541c9a2.jpg.720px.jpg](https://beta.finance.si//bmc/pics//cache_05/052-055-VODIK-4-6058af541c3fd-6058af541c9a2.jpg-widths/052-055-VODIK-4-6058af541c3fd-6058af541c9a2.jpg.720px.jpg), travanj 2022.
- [22]. „Prikaz tehnologije za pročišćavanje bioplina do razine biometana“, Tehnološko sveučilište u Beču, svibanj 2012.
- [23]. „Primjeri dobre prakse pročišćavanje bioplina do razine biometana“, Energetski institut Hrvoje Požar, svibanj 2012.
- [24]. Klabučar, B., „Stlačeni prirodni plin u transportu“, Zagreb, 2017.
- [25]. <https://wieserconcrete.com/wp-content/uploads/Fetzer-Farms-Precast-Concrete-Bunker-Silos-1-e1530901707338.jpg>, travanj 2022.
- [26]. <https://www.eisele.de/pumpen/vertikalpumpen>, travanj 2022.
- [27]. <https://vitan.hr/ekcentricno-vijcasta-pumpa/>, travanj 2022.
- [28]. <https://euromarkt.hr/wp-content/uploads/2019/05/Teleskopski-utovarivac-Manitou-MLT-625-75-H-1.jpg>, svibanj 2022.
- [29]. <https://www.facebook.com/biogazpro/photos/a.193941877870646/853778275220333/>, svibanj 2022.
- [30]. <https://www.rainbowtanks.co.za/wp-content/uploads/Biogas-Plant-inside.JPG>, svibanj 2022.
- [31]. <https://www.facebook.com/biogazpro/photos/a.193941877870646/841801403084687/>, svibanj 2022.
- [32]. <https://www.mnovine.hr/wp-content/uploads/2019/04/bioplina-kotoriba3.jpg>, svibanj 2022.
- [33]. [https://biomassmagazine.com/uploads/posts/magazine/2013/11/EISENMANN\\_BMM1213\\_13848817973147.jpg](https://biomassmagazine.com/uploads/posts/magazine/2013/11/EISENMANN_BMM1213_13848817973147.jpg), svibanj 2022.
- [34]. [https://www.nijhuisindustries.com/assets/uploads/References/685xAUTO\\_fit\\_center-center\\_none/ClientOL.jpg](https://www.nijhuisindustries.com/assets/uploads/References/685xAUTO_fit_center-center_none/ClientOL.jpg), svibanj 2022.
- [35]. <https://www.scmondes.com/uploads/201916133/free-standing-double-membrane-biogas-balloon55321303069.jpg>, svibanj 2022.
- [36]. <https://www.facebook.com/Digestech-by-Listech-341048029662316/photos/pcb.760886721011776/760886601011788>, svibanj 2022.
- [37]. <https://www.agroklub.rs/ratarstvo/oklasak-kukuruza-kao-energija-i-sirovina/56842/>, lipanj 2022.

- [38]. [https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=jnOIH40nLYM&ab\\_channel=AgroPoni%C4%8Dan](https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=jnOIH40nLYM&ab_channel=AgroPoni%C4%8Dan), lipanj 2022.
- [39]. [https://www.youtube.com/watch?v=0Ci22Bb0u3w&ab\\_channel=mediacombg](https://www.youtube.com/watch?v=0Ci22Bb0u3w&ab_channel=mediacombg), lipanj 2022.
- [40]. [https://static.jutarnji.hr/images/live-multimedia/binary/2019/11/3/19/268054-342529-kombajn\\_banda3-301019\\_1.jpg](https://static.jutarnji.hr/images/live-multimedia/binary/2019/11/3/19/268054-342529-kombajn_banda3-301019_1.jpg), lipanj 2022.
- [41]. [https://files.hrote.hr/files/OIEIK\\_Premije/JAVNI%20NATJE%C4%8CAJ%2012.11.2020..pdf](https://files.hrote.hr/files/OIEIK_Premije/JAVNI%20NATJE%C4%8CAJ%2012.11.2020..pdf), ožujak 2022.
- [42]. <https://planet-biogas.com/en/biogas-calculator/>, ožujak 2020.
- [43]. [https://www.researchgate.net/profile/Yucheng\\_Feng2/publication/289671060/figure/fig2/AS:669524063944718@1536638384703/3D-model-of-horizontal-dry-digester-as-an-example.png](https://www.researchgate.net/profile/Yucheng_Feng2/publication/289671060/figure/fig2/AS:669524063944718@1536638384703/3D-model-of-horizontal-dry-digester-as-an-example.png), lipanj, 2022.
- [44]. <https://www.ecomembrane.com/index.php/en/>, lipanj 2022.
- [45]. <https://www.biogasworld.com/product/biogas-management/ges-jenbacher-gas-engines/>, lipanj 2022.
- [46]. <https://cijenegoriva.info/CijeneGoriva.aspx>, 30.6.2022.
- [47]. [https://www.hep.hr/elektra/UserDocsImages/dokumenti/tarife/poduzetnistvo/od\\_01072022/Tarife\\_stavke\\_zajamcena\\_od\\_01-04-2022\\_do\\_30-06-2022.pdf](https://www.hep.hr/elektra/UserDocsImages/dokumenti/tarife/poduzetnistvo/od_01072022/Tarife_stavke_zajamcena_od_01-04-2022_do_30-06-2022.pdf), svibanj 2022.
- [48]. [https://www.porezna-uprava.hr/HR\\_porezni\\_sustav/Stranice/porez\\_na\\_dobit.aspx](https://www.porezna-uprava.hr/HR_porezni_sustav/Stranice/porez_na_dobit.aspx), lipanj 2022.
- [49]. [https://elfarchive1516.foi.hr/pluginfile.php/54360/mod\\_resource/content/0/01\\_Isplativost-KM\\_20130131.pdf](https://elfarchive1516.foi.hr/pluginfile.php/54360/mod_resource/content/0/01_Isplativost-KM_20130131.pdf), lipanj 2022.
- [50]. [https://www.efzg.unizg.hr/UserDocsImages/RAC/hpercevic/poslovno\\_planiranje/KAPITALNI%20PRORA%C4%8CUN.pdf](https://www.efzg.unizg.hr/UserDocsImages/RAC/hpercevic/poslovno_planiranje/KAPITALNI%20PRORA%C4%8CUN.pdf), lipanj 2022.
- [51]. <https://www.hnb.hr/documents/20182/121099/h-informacija-o-kamatnim-stopama.pdf/30a3ece8-32d6-82ed-ea76-f3e1b680a2b1?t=1656051106272>, lipanj 2022.
- [52]. <https://www.agroklub.com/poljoprivredne-vijesti/domaca-bioplinska-postrojenja-pred-gasnjem-radi-niske-otkupne-cijene-elektricne-energije/77832/>, lipanj 2022.
- [53]. <https://www.agroklub.com/poljoprivredne-vijesti/kako-do-proizvodnje-vlastite-energije-na-poljoprivrednom-gospodarstvu/77803/>, lipanj 2022

## POPIS SLIKA

Slika 1.1 Shema bioplinskog postrojenja na poljoprivrednom gospodarstvu [4].....	4
Slika 1.2 Stupovi održivog razvoja [5].....	4
Slika 1.3 Porast proizvodnje električne energije iz bioplina kroz godine [7] .....	5
Slika 2.1 Količina bioplina u ovisnosti o vrsti supstrata [2] .....	8
Slika 2.2 Faze anaerobne digestije [2] .....	9
Slika 2.3 Relativni rast nastanka psihrofilnih, mezofilnih i termofilnih metanogena [3] .....	13
Slika 3.1 Kineski tip postrojenja [9].....	19
Slika 3.2 Indijski tip postrojenja [10].....	19
Slika 3.3 Komercijalno kućno bioplinsko postrojenje [11].....	20
Slika 3.4 Bioplinsko postrojenje domaće izrade [12] .....	21
Slika 3.5 Centralno bioplinsko postrojenje u Viljevu u Osječko-baranjskoj županiji [13]....	24
Slika 3.6 Postrojenje za pročišćavanje otpadnih voda u Beču [14] .....	25
Slika 3.7 Shema procesa pročišćavanja otpadnih voda i zbrinjavanja nastalog mulja [15]...	27
Slika 3.8 Bivše odlagalište otpada Viševac blizu Rijeke pretvoreno u digestor deponijskog plina [17] .....	29
Slika 4.1 Načini iskorištavanja bioplina [3] .....	30
Slika 4.2 Plinski motor [18] .....	34
Slika 4.3 Stirlingov motor [20] .....	35
Slika 4.4 Proces u plinskoj turbini [3].....	36
Slika 4.5 Shema gorivnog članka s polimernom membranom [21].....	37
Slika 4.6 Shema postrojenja za pročišćavanje bioplina apsorpcijskim procesom s vodom kao otapalo[22] .....	40
Slika 4.7 Shema postrojenja za pročišćavanje bioplina apsorpcijskim procesom s aminom kao otapalo [22] .....	41
Slika 4.8 Shema postrojenja za pročišćavanje bioplina adsorpcijskim procesom s varijacijama tlaka[22] .....	41
Slika 4.9 Princip separacije plina pomoću poliamidne membrane [23].....	42
Slika 4.10 Shema postrojenja za pročišćavanje bioplina membranskom permeacijom [22] .	43
Slika 4.11 Usporedba prijeđene udaljenosti u km osobnim automobilom u ovisnosti o vrsti biogoriva proizvedenog na 1 ha [3].....	46
Slika 6.1 Shema i osnovni dijelovi bioplinskog postrojenja [3] .....	51

Slika 6.2 Procesne faze proizvodnje bioplina iz poljoprivredne biomase [3].....	52
Slika 6.3 Shema bioplinskog postrojenja na poljoprivrednom imanju [3].....	53
Slika 6.4 Bunker silos [25].....	55
Slika 6.5 Centrifugalna pumpa za tekući gnoj [26].....	58
Slika 6.6 Ekscentrično vijčasta (volumetrijska) pumpa [27] .....	58
Slika 6.7 Teleskopski utovarivač silaže [28].....	59
Slika 6.8 Pužni transporter [29].....	60
Slika 6.9 Grijaće cijevi u digestoru [30] .....	61
Slika 6.10 Miješalice supstrata [31] .....	63
Slika 6.11 Vertikalni digestor s membranskim spremnikom bioplina [32] .....	64
Slika 6.12 Horizontalni digestor [33].....	64
Slika 6.13 Bioplinsko postrojenje s više digestora [34].....	65
Slika 6.14 Vanjski membranski spremnik bioplina [35].....	66
Slika 6.15 Otvoreni spremnici digestata, lagune [36] .....	67
Slika 7.1 Oklasje [37].....	68
Slika 7.2 Runjenje kukuruza iz spremišta [38] .....	69
Slika 7.3 Berba kukuruza u znu pomoću kombajna [39].....	69
Slika 7.4 Polje nakon berbe kukuruza u znu [40] .....	70
Slika 7.5 Kemijska analiza gnoja .....	73
Slika 7.6 Skica bunker silosa za ostatke od branja kukuruza u znu.....	77
Slika 7.7 Presjek horizontalnog digestora [43] .....	80
Slika 7.8 Skica spremnika digestata s membranom .....	84
Slika 7.9 Skica membrane na digestoru [44].....	85
Slika 7.10 Skica presjeka membrane na digestoru .....	85
Slika 7.11 Skica spremnika digestata [44] .....	86
Slika 7.12 Skica presjeka membrane na spremniku digestata.....	86
Slika 7.13 Peleti od pilećeg gnoja .....	89
Slika 7.14 Priprema peleta za određivanje ogrjevne moći .....	89
Slika 8.1 Ovisnost $Z_{\text{god,neto}}$ i JPP-a o padu investicijskih troškova.....	95
Slika 8.2 Ovisnost IP-a i NSV-a o padu investicijskih troškova.....	95
Slika 8.3 Ovisnost $Z_{\text{god,neto}}$ i JPP-a o porastu referentne vrijednosti otkupne cijene električne energije .....	97

Slika 8.4 Ovisnost IP-a i NSV-a o porastu referentne vrijednosti otkupne cijene električne energije .....	97
Slika 8.5 Ovisnost $Z_{\text{god,neto}}$ i JPP-a o padu investicijskih troškova uz $c_{\text{RV}} = 1,3 \text{ kn/kWh}$ .....	99
Slika 8.6 Ovisnost IP-a i NSV-a o padu investicijskih troškova uz $c_{\text{RV}} = 1,3 \text{ kn/kWh}$ .....	99
Slika 8.7 Ovisnost $Z_{\text{god,neto}}$ i JPP-a o porastu referentne vrijednosti otkupne cijene električne energije uz 30 % manje investicijske troškove .....	101
Slika 8.8 Ovisnost IP-a i NSV-a o porastu referentne vrijednosti otkupne cijene električne energije uz 30 % manje investicijske troškove .....	101



## POPIS TABLICA

Tablica 1.1 Sastav bioplina [3].....	3
Tablica 2.1 Temperatura i duljina trajanja procesa [3] .....	12
Tablica 4.1 Sastav bioplina [3].....	31
Tablica 4.2 Prosječni teorijski prinos metana [3].....	31
Tablica 4.3 Količina bioplina i udio metana u ovisnosti o vrsti supstrata [3].....	32
Tablica 4.4 Usporedba gorivnih članaka [2] .....	38
Tablica 4.5 Smanjenje emisija dimnih plinova u motoru na SPP u odnosu na benzin za istu kilometražu [24] .....	45
Tablica 7.1 Podaci o supstratima.....	75
Tablica 7.2 Karakteristike motor generatora [45] .....	87
Tablica 8.1 Procjena investicijskih troškova bioplinskog postrojenja .....	90
Tablica 8.2 Analizu osjetljivosti na pad investicijskih troškova.....	94
Tablica 8.3 Analiza osjetljivosti na porast referentne vrijednosti otkupne cijene električne energije .....	96
Tablica 8.4 Analiza osjetljivosti na pad investicijskih troškova uz $c_{RV} = 1,3$ kn/kWh.....	98
Tablica 8.5 Analiza osjetljivosti na porast referentne vrijednosti otkupne cijene električne energije uz 30% manje investicijske troškove .....	100

## SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

Tema ovog rada je idejni projekt bioplinskog postrojenja. Bioplin je goriva smjesa plinova od koji su dva najvažniji  $\text{CH}_4$  i  $\text{CO}_2$ . Spada u obnovljive izvor energije jer se dobiva se anaerobnom digestijom, odnosno razgradnjom organskih tvari bez kisika. Kao sirovina koristio bi se gnoj s 15 farmi pilića i ostaci od branja kukuruza u zrnu. Na godišnjoj razini može se dobiti 2 100 t gnoja i 900 t ostataka. Prema bioplinskom kalkulatoru može se dobiti 1 021 545  $\text{m}^3$  bioplina. Predviđa se iskorištavanje bioplina u motor generatoru za dobivanje električne i toplinske energije. Električna energija bi se isporučivala u mrežu dok bi se dio toplinske iskoristio za grijanje digestora, a ostatak predao u okolinu. Ekonomskom analizom pokazano je da takvo postrojenje s trenutnim troškovima investicije, cijenom električne energije i sl. nije isplativo.

Ključne riječi:

Obnovljivi izvori energije, bioplin, anaerobna digestija, kogeneracija, plinski motor-generator, ekonomska analiza bioplinskog postrojenja

## SUMMARY AND KEY WORDS

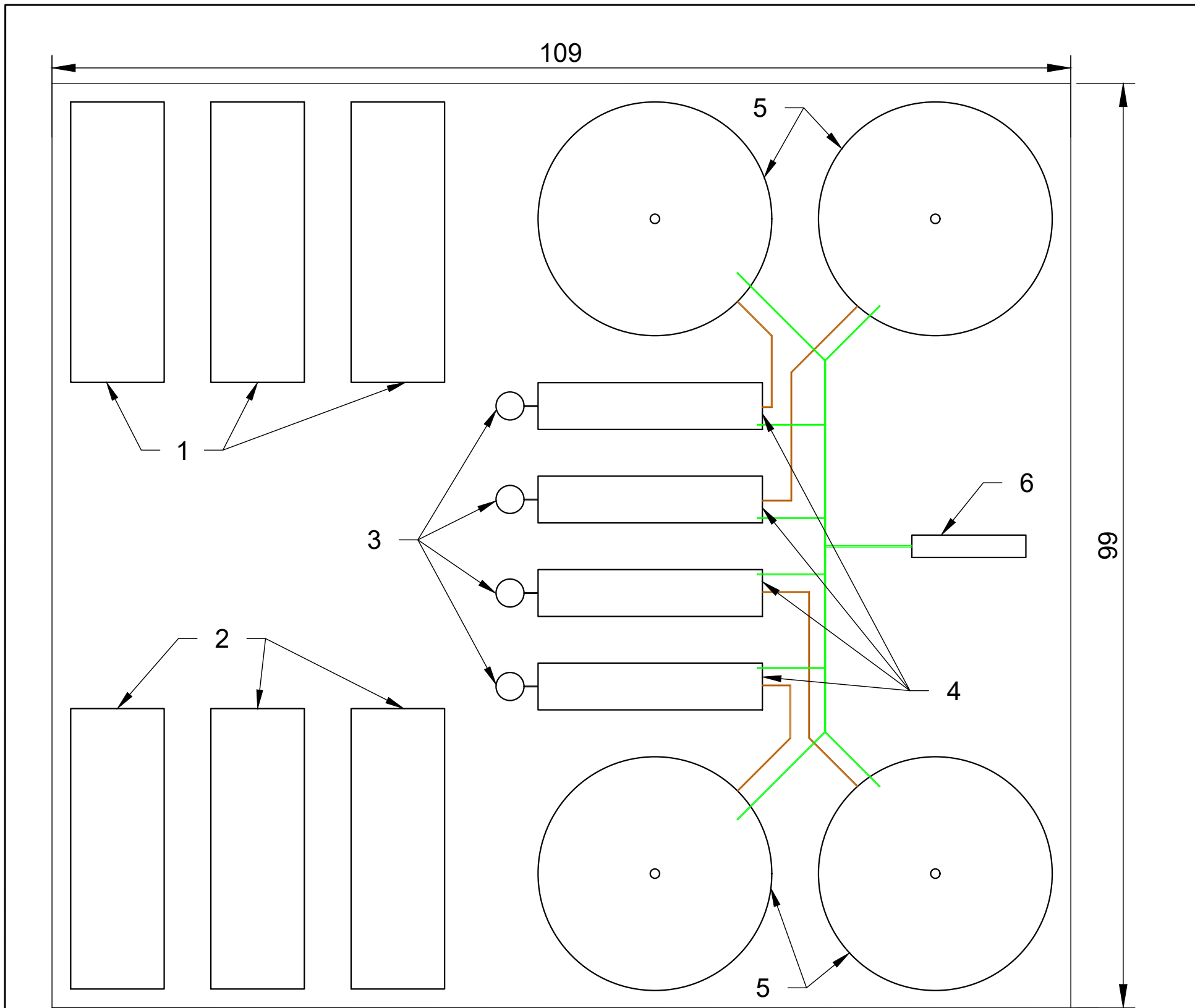
The topic of this paper is the conceptual design of a biogas plant. Biogas is a flammable mixture of gases, the two most important of which are  $\text{CH}_4$  and  $\text{CO}_2$ . It is a renewable energy source because it is obtained through anaerobic digestion, i.e. decomposition of organic substances without oxygen. Manure from 15 broiler farms and residues from harvesting corn in grain would be used as a feedstock. 2,100 t of manure and 900 t of residues can be obtained annually from which 1 021 545  $\text{m}^3$  of biogas can be generated. It is planned to use biogas in a motor-generator to obtain electrical and thermal energy. The electrical energy would be delivered to the grid, while part of the thermal energy would be used to heat the digester, and the rest would be released into the environment. The economic analysis showed that such a plant with the current investment costs, the price of electricity, etc. is not profitable.

Key words:

Renewable energy sources, biogas, anaerobic digestion, CHP plant, gas engine, economic analysis of the biogas plant

## **PRILOZI**

1. Tlocrt bioplinskog postrojenja
2. Karta Zlatar Bistrice s ucrtanim pozicijama farmi i bioplinskog postrojenja
3. Satelitska karta Zlatar Bistrice s ucrtanim pozicijama farmi i bioplinskog postrojenja



Tumač znakova:

- Digestat
- Bioplin

Napomena: sve kote na crtežu su u metrima

R.br.	Naziv dijela	Komada	Dimenzije, m
6	Kontejner motor generatora	1	2,4×12,2×2,6
5	Spremnik digestata	4	Ø25×6
4	Digestor	4	5×24×5
3	Predspremnik	4	Ø3×2
2	Bunker silos za ostatke od branja kukuruza u znu	3	10×30×3
1	Bunker silos za pileći gnoj	3	10×30×3

Diplomski rad:  
Idejni projekt biopliskog postrojenja




Naziv kolegija:  
Obnovljivi izvori energije

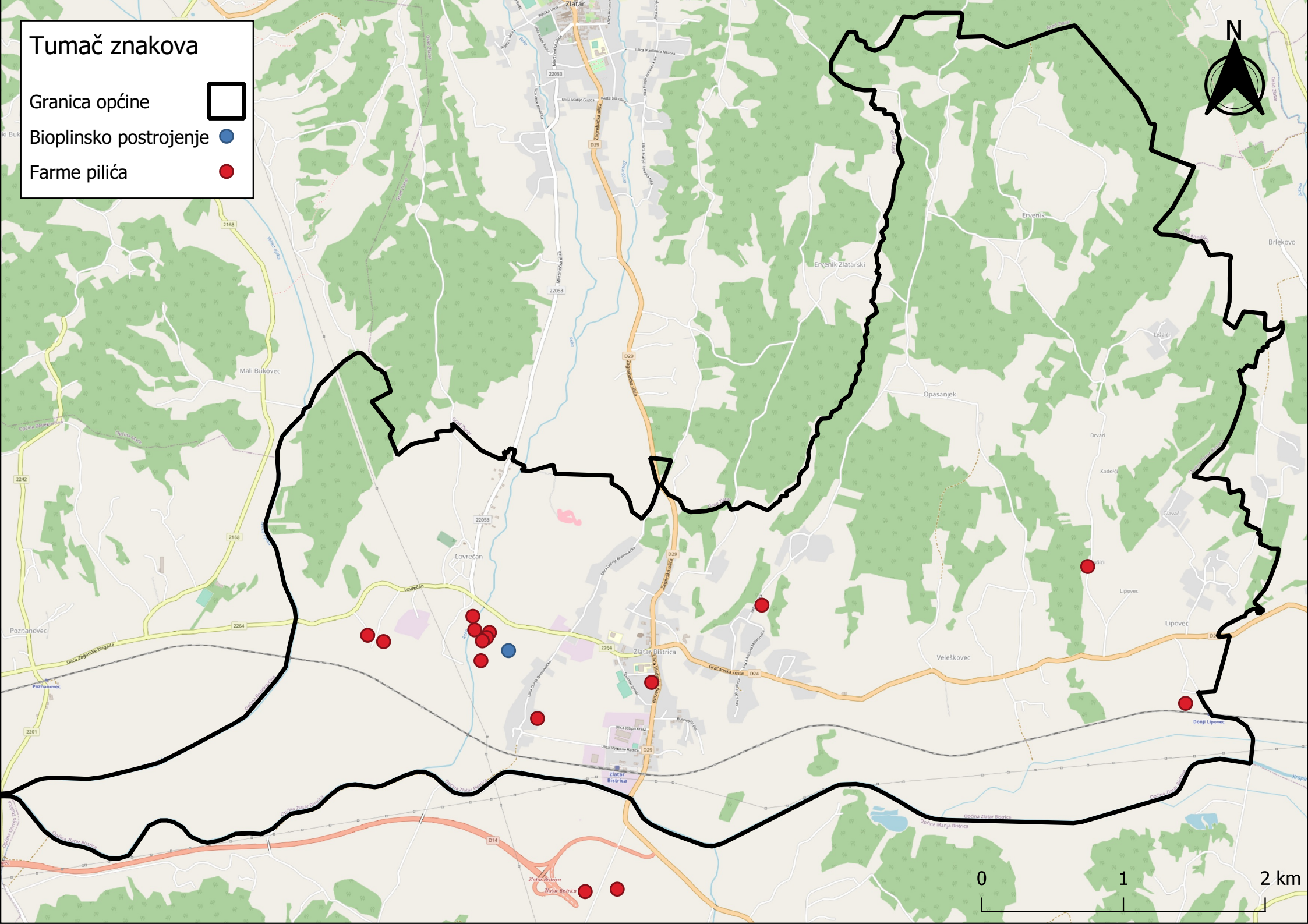
Sveučilište u Rijeci  
TEHNIČKI FAKULTET  
51000 RIJEKA, Vukovarska 58,  
HRVATSKA

Datum	Ime prezime, mat. br.	Potpis	Prog. br.	Mjerilo :
Nacrtao: 25.6.2022.	Petar Kuljak 0035199692		1	1:10
Provjerio:			List/listova 1/1	
Odobrio:			Ak.god. : 21/22	

Naziv dijela : Tlocrt bioplinskog postrojenja	Broj crteža : 1
--	--------------------

**Tumač znakova**

- Granica općine 
- Bioplinsko postrojenje 
- Farme pilića 



# Tumač znakova

Granica općine



Državne ceste



Županijske ceste



Lokalne ceste



Željeznice



Rijeke



Bioplinsko postrojenje



Farme pilića

