

# Bioplinsko kogeneracijsko postrojenje na biorazgradivi otpad

---

Janković, Domagoj

Master's thesis / Diplomski rad

2019

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:579944>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-16**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Domagoj Janković**

Zagreb, 2019. godine

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Daniel Rolph Schneider

Domagoj Janković

Zagreb, 2019. godine

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Prvo, bih se želio zahvaliti mentoru, prof. dr. sc. Daniel Rolph Schneideru, za njegovo vodstvo tijekom pisanja ovog rada. Zahvaljujem se na pruženim savjetima, uloženom trudu te na iskazanom strpljenju.

Zahvaljujem se voditelju predmetnog bioplinskog postrojenja i svim zaposlenicima na pruženim savjetima, prijateljstvu te na iskazanom povjerenju.

Zahvaljujem se svojoj najbližoj obitelji koja me je podržavala i vjerovala u mene kroz sve godine studiranja, a bilo ih je. Najviše se zahvaljujem svojim roditeljima, ocu Tomislavu i prerano preminuloj majci Željki, majci koja niti u jednom trenutku nije sumnjala u mene i uvijek mi je bila najveći oslonac u životu, majci bez koje sve ovo što sam do sada postigao ne bi bilo moguće, beskrajno hvala mama ♡! Također, zahvaljujem se svojim roditeljima na ne manje važnoj financijskoj podršci tijekom svih ovih godina. Ujedno njima i posvećujem ovaj svoj (naš) uspjeh.

Od srca zahvaljujem svojoj djevojci Dorjani na ukazanom povjerenju i podršci koja se pokazala neophodna za završetak studija i ovog rada.

Također, zahvaljujem se svim svojim prijateljima, kolegama s FSB-a i sustanarima u Studenskom domu Stjepan Radić na prijateljstvu i podršci kroz cijelo studiranje.

Hvala Vam svima!

Domagoj Janković  
Zagreb, srpanj 2019.



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Domagoj Janković** Mat. br.: 0035194061

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Bioplinsko kogeneracijsko postrojenje na biorazgradivi otpad**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Biogas cogeneration plant on biodegradable waste**

Opis zadatka:

S obzirom na nastojanja da se na održiv način riješi postupanje s biorazgradivim otpadom, kao i da se proizvodnja energije iz fosilnih goriva supstituira obnovljivim izvorima, a u svrhu smanjenja emisija stakleničkih plinova, postrojenja na bioplin dobiven fermentacijom biorazgradivog otpada nameću se kao odgovarajuće rješenje.

U radu je potrebno analizirati bioplinsko postrojenje snage 1 MW koje ima sposobnost proizvodnje električne i toplinske energije iz bioplina dobivenog anaerobnom razgradnjom nusproizvoda životinjskog podrijetla kao i otpada biljnog podrijetla. S obzirom da plinski motor (u kojem izgara bioplin), a koji služi za proizvodnju energije, mora ići na periodička servisna održavanja, u radu je također potrebno razmotriti alternativu spaljivanja bioplina na baklji njegovim korištenjem kao energenta koji bi se utiskivao u plinsku mrežu.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

- napraviti pregled tehnologija bioplinskih postrojenja na biorazgradivi otpad,
- analizirati i opisati postojeće bioplinsko postrojenje, odnosno sve njegove značajne komponente,
- napraviti skicu postrojenja,
- izračunati bilancu svih energetskih tokova, ulaza i izlaza svih sirovina (uključujući zbrinjavanje plastike, papira, metala, drva od ambalaže), te analizirati zbrinjavanje digestata iz post-fermentora,
- analizirati mogućnost povećanja snage postrojenja sa 1 MW na 1,5 MW,
- analizirati alternativno rješenje sustava za pročišćivanje i injektiranje bioplina u plinsku mrežu,
- napraviti tehno-ekonomsku analizu postrojenja,
- odrediti poticajnu cijenu (odnosno *feed-in* tarifu) koju bi država morala plaćati za takav sustav da bude održiv.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan: Datum predaje rada: Predviđeni datum obrane:

2. svibnja 2019. 4. srpnja 2019. 10., 11. i 12. srpnja 2019.

Zadatak zadao: Predsjednica Povjerenstva:

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
2. ANAEROBNA DIGESTIJA .....	3
2.1. Biokemijski postupak anaerobne digestije.....	4
2.1.1. Hidroliza .....	5
2.1.2. Acidogeneza.....	5
2.1.3. Acetogeneza .....	6
2.1.4. Metanogeneza .....	6
2.2. Parametri anaerobne digestije .....	6
2.2.1. Temperatura .....	7
2.2.2. pH vrijednost.....	9
2.2.3. Hlapljive masne kiseline .....	10
2.2.4. Amonijak.....	10
2.2.5. Elementi u tragovima .....	11
2.3. Sveobuhvatni popis parametra praćenja anaerobne digestije .....	11
3. OPIS POSTOJEĆEG BIOPLINSKOG KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA (TOK SIROVINE) .....	13
3.1. Prijem i deambalaža sirovine .....	13
3.2. Hidrolizni spremnik ( <i>buffer</i> spremnik) .....	16
3.3. Digestor (fermentor) .....	16
3.4. Separator i higijenzacija digestata .....	17
3.5. Post-digestor (post-fermentor) .....	18
4. OPIS POSTOJEĆEG BIOPLINSKOG KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA (TOK BIOPLINA I ENERGIJE) .....	20
4.1. Priprema bioplina .....	20
4.2. Baklja .....	20
4.3. Plinski motor i generator topline (kogeneracijska jedinica) .....	21
4.4. Sklopna shema bioplinskog postrojenja.....	22
5. ENERGETSKA BILANCA BIOPLINSKOG POSTOJENJA.....	24
6. MASENA BILANCA BIOPLINSKOG POSTROJENJA .....	30
7. EKONOMSKA ANALIZA BIOPLINSKOG POSTROJENJA.....	34
8. ANALIZA MOGUĆNOSTI POVEĆANJA SNAGE POSTROJENJA .....	37
8.1. Analiza raspoloživog biootpada od interesa za postojeće bioplinsko postrojenje .....	37
8.2. Analiza povećanje snage postojećeg bioplinskog postrojenja na 1,5 MW .....	38
9. ANALIZA ALTERNATIVNOG RJEŠENJA SUSTAVA .....	40

---

9.1. Analiza postojećih tehnologija.....	40
9.2. Odvajanje pomoću membrane (eng. <i>Membrane separation</i> ).....	40
9.3. Tehnologija pročišćavanja plina pomoću radnog medija (eng. <i>Scrubbing</i> ).....	41
9.3.1. Fizičko pročišćavanje (eng. <i>Physical scrubbing</i> ).....	43
9.3.2. Kemijsko pročišćavanje (eng. <i>Chemical scrubbing</i> ).....	44
9.4. Tlačna adsorpcija (eng. <i>Pressure swing adsorption - PSA</i> ) .....	45
9.5. Kriogeno pročišćavanje (eng. <i>Cryogenic treatment</i> ) .....	46
9.6. Odabir adekvatne tehnologije .....	47
10. ODREĐIVANJE POTICAJNE CIJENE BIOMETANA ( <i>FEED-IN TARIFF</i> ) .....	52
11. ZAKLJUČAK.....	57
LITERATURA.....	59
PRILOZI.....	61

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Glavne faze anaerobne digestije [4] .....	5
Slika 2.2. Prinos bioplina ovisno o temperaturi procesa i vremenu retencije [5] .....	8
Slika 3.1. Shema proizvodnog procesa (tok sirovine).....	13
Slika 3.2. Prijemni bazen.....	14
Slika 3.3. Deambalažni stroj [6].....	14
Slika 3.4. Rastvoren deambalažni stroj [6] .....	15
Slika 3.5. Ambalaža na izlazu iz deambalažnog stroja .....	15
Slika 3.6. Mješači <i>buffer</i> spremnika [7] .....	16
Slika 3.7. Mješač digestora [7].....	17
Slika 3.8. Vijčani separator [8].....	18
Slika 3.9. Post-digestor s plinohranom [11] .....	19
Slika 3.10. Spremnici opisanog bioplinskog postrojenja .....	19
Slika 4.1. Shema bioplinskog postrojenja (tok bioplina i energije) .....	20
Slika 4.2. Glavne komponente plinskog Otto motora s unutarnjim izgaranjem [12].....	21
Slika 4.3. Bioplinsko postrojenje (kogeneracijski dio postrojenja) .....	22
Slika 4.4. Shema bioplinskog postrojenja .....	22
Slika 5.1. Energetski tokovi postrojenja.....	24
Slika 5.2. Proizvodnja (potrošnja) bioplina i primarna energija bioplina .....	26
Slika 5.3. Proizvedena, isporučena i potrošena toplinska energija .....	27
Slika 5.4. Ukupna iskoristivost bioplinskog postrojenja za 2018. godinu .....	29
Slika 6.1. Maseni tokovi postrojenja.....	30
Slika 6.2. Ulaz sirovine za referentnu godinu .....	31
Slika 7.1. Prikaz udjela prihoda ovisno o djelatnosti .....	34
Slika 7.2. Prikaz udjela troškova ovisno o djelatnosti.....	35
Slika 7.3. Odnos prihoda i rashoda u referentnoj u 2018. godini.....	36
Slika 8.1. Površina predmetnog bioplinskog postrojenja .....	38
Slika 9.1. Prikaz rada procesa pročišćavanje plina pomoću membrana [17].....	41
Slika 9.2 Shema tehnologije pročišćavanja pomoću radog medija [17]. .....	42
Slika 9.3. Shema adsorpcijske tehnologije [17] .....	46
Slika 9.4. Protok i sastav biometana i ispušnih plinova .....	49
Slika 9.5. Investicijski, pogonski i troškovi održavanja tehnologije unapređenja bioplina .....	50
Slika 9.6. Shema tehnologije unapređenja bioplina .....	50
Slika 10.1. Godišnji prihodi modela.....	55
Slika 10.2. Godišnji troškovi modela .....	55
Slika 10.3. Godišnji profit/deficit modela .....	56



**POPIS TABLICA**

Tablica 2.1. Sastav bioplina [2].....	4
Tablica 2.2. Temperaturne zone anaerobne digestije [4] .....	7
Tablica 2.3. Sveobuhvatni popis radnih parametara jednog bioplinskog postrojenja [4] .....	12
Tablica 5.1. Određivanje donje ogrjevne vrijednosti bioplina (metana).....	24
Tablica 5.2. Proizvedena, isporučena i potrošena električna energija .....	26
Tablica 5.3 Ukupna korisnost postrojenja.....	28
Tablica 6.1. Potrošnja vode u 2018. godini.....	31
Tablica 6.2. Količina krutog i tekućeg digestata.....	32
Tablica 7.1. Profit ili deficit po mjesecima za 2018. godinu .....	36
Tablica 8.1. Proizvedene količine otpada od hrane u Hrvatskoj za 2017. godinu [16].....	37
Tablica 9.1. Prednosti i nedostaci odvajanja pomoću membrana [17] .....	41
Tablica 9.2. Prednosti i nedostaci tehnologije pročišćavanja bioplina pomoću vode [17].....	43
Tablica 9.3. Prednosti i nedostaci tehnologije pročišćavanja bioplina pomoću organskog medija [17] .....	44
Tablica 9.4. Prednosti i nedostaci tehnologije pročišćavanja bioplina pomoću kemijskog medija [17] .....	45
Tablica 9.5. Prednosti i nedostaci adsorpcijske tehnologije [17].....	46
Tablica 9.6. Sastav bioplina dana 10.06.2019.....	47
Tablica 9.7. Standardna kvaliteta prirodnog plina plinske mreže [18] .....	48
Tablica 10.1. Karakteristike modela analize .....	52
Tablica 10.2. Izračun poticajne cijene biometana nakon povećanja kapaciteta 50 % .....	53
Tablica 10.3. Prikaz određene poticajne cijene biometana i usporedba s trenutnim poticajnim cijenama za električnu energiju .....	54
Tablica 10.4. Vremenski period povrata investicije modela.....	56

## SAŽETAK

Anaerobna digestija, proces proizvodnje bioplina, ima ekonomske i ekološke prednosti. Veliki energetske potencijal stoji iza bioplina odnosno bioplinskih postrojenja te je ono tema ovog diplomskog rada.

Proizvodnja energije predmetnog bioplinskog postrojenja iz bioplina ostvaruje se plinskim Otto motorom. Spoznajom kako je ukupna korisnost, uključujući električnu i toplinsku energiju, plinskog motora 40,9 % razmatra se alternativa upotrebe bioplina (primarne energije). S tim ciljem je u prvom dijelu rada opisano i analizirano predmetno bioplinsko postrojenje. Analiza uključuje masenu bilancu, energetske bilancu te ekonomsku bilancu bioplinskog postrojenja.

Nadalje, u Hrvatskoj nije definirana *feed-in* tarifa za alternativno unapređenje bioplina i injektiranje u plinsku mrežu. Cilj rada bilo je odrediti *feed-in* tarifu takvog sustava nakon implementacije adekvatne tehnologije, što je i analizirano u drugom dijelu rada. Ideja tijekom određivanja *feed-in* tarife za biometan je ostvarivanje istih prihoda kao u referentnoj 2018. godini predmetnog bioplinskog postrojenja te usporedba sa sadašnjim za električnu energiju.

**Ključne riječi:** Anaerobna digestija, bioplinsko postrojenje, bioplin, *feed-in* tarifa, unapređenje bioplina, biometan.

## **SUMMARY**

Anaerobic digestion, the biogas production process has economic and environmental benefits. The great energy potential lies behind biogas (biogas plants) and is the topic of this master's theses.

The energy production of the biogas plant in question is generated by the Otto gas engine. Knowing how the overall utility of Otto gas engine, including electric and termal energy, is 40,9 % generate a desire to consider alternatives to gas engine. With this aim, the biogas plant in question was described and analyzed in the first part of this paper. The analysis includes the mass balance, the energy balance and the economic balance of the biogas plant.

Furthermore, there was no feed-in tariff for alternative upgrading of biogas and injection in domestic gas pipeline in Croatia. The aim of the master's theses was to determine the feed-in tariff of biogas plant after the implementation of adequate technology, which i also analyzed in the second part of the paper. The idea when determining the feed-in tariff for biomethane is to achieve the same revenue as in the reference 2018. of the biogas plant in question and a comparison with the current feed-in tariff for electricity.

**Key words:** Anaerobic digestion, biogas plant, biogas, feed-in tariff, biogas upgrading, biomethane.

## 1. UVOD

Današnje društvo svjedoči razvoju obnovljivih izvora energije (OIE), kao i implementaciji istih. Brojne nove tehnologije ne osiguravaju povrat investicije, barem ne u vremenskom roku kojeg investitori smatraju prihvatljivim (7 – 8 godina), prvenstveno zbog svoje visoke cijene. Iako su cijene tehnologija u stalnom padu i dalje su potrebne subvencije kako bi u konačnici sustavi obnovljivih izvora energije bili održivi.

Nadalje, Hrvatska je odabirom orijentacije prema Europskoj uniji, a kasnije i ulaskom u Europsku uniju, krenula putem implementacije obnovljivih izvora energije. Na tom putu slijedila je modele ostalih članica Europske unije, model poticajne cijene (eng. *feed-in tariff*).

*Feed-in* model je politički instrument za promicanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora. *Feed-in* modelom se obvezuje državnog energetskog opskrbljivača električnom energijom na otkup iste od povlaštenog proizvođača, ali pri točno zakonom propisanim uvjetima odnosno cijeni tijekom određenog broja godina. Takvim zakonom osiguravaju se pogodni uvjeti za investitore što ujedno rezultira željenim ciljem, a to je razvoj OIE tj. okretanje prema samoodrživim i efikasnijim energetske rješenjima. Ciljevi koji stoje iza *feed-in* modela mogu uključivati:

- poticanje lokalne proizvodnje, čime se smanjuje opterećenje mreže i smanjenje gubitaka distribucije energije iz centraliziranih izvora putem distribucijske mreže prema potrošačima;
- poticanje razvoja i inovacija tehnologija vezanih uz obnovljive izvore energije;
- smanjenje emisija stakleničkih plinova smanjenjem oslanjanja na neobnovljive izvore energije [1].

*Feed-in* model predstavlja značajne novčane izdatke državi te je iz tih razloga u radu analizirana mogućnost formiranja nove cijene s ciljem smanjenja izdataka, ali to ne mora nužno značiti manju dobit proizvođača energije. Mogućnost korekcije poticajne cijene, primjenom novih tehnologija, analizirana je na stvarnom primjeru bioplinskog kogeneracijskog postrojenja u Hrvatskoj. Upravo u bioplinskom postrojenju, u teoriji, je uočena mogućnost povećanja efikasnosti, a time i otvaranja prostora koji bi dozvolio sniženje poticajne cijene.

U prvom dijelu rada opisana je biokemijska pozadina rada bioplinskih postrojenja te bioplinsko kogeneracijsko postrojenje. U drugom dijelu rada stavlja se naglasak na analizu

proširenja postojećeg kapaciteta, implementacije novih tehnologija te u konačnici tehn-ekonomski analiza s ciljem dokazivanja ili pak opovrgavanja prethodno spomenutih teoretskih tvrdnji.

## 2. ANAEROBNA DIGESTIJA

Anaerobna digestija ili anaerobna fermentacija je biokemijski proces u kojem se kompleksne organske tvari (biomasa) razgrađuju u manje kompleksne organske spojeve djelovanjem različitih vrsta bakterija u anaerobnim uvjetima (bez prisustva kisika). Anaerobna razgradnja prirodan je proces koji se svakodnevno odvija u prirodi npr. u morskome sedimentu i u probavi preživača. Isti se proces odvija u postrojenjima za proizvodnju bioplina gdje se organski ulazni materijal, odnosno sirovina ili supstrat, anaerobno razgrađuje na dva glavna proizvoda: bioplina i digestat. U većini bioplinskih postrojenja istodobno se koristi mješavina nekoliko sirovina radi stabiliziranja procesa i optimiranja proizvodnje bioplina, što se naziva kodigestija [2].

Prikladne sirovine za anaerobnu digestiju obuhvaćaju veliki raspon biomase, a poželjno je da se sastoje od tvari koje se lako razgrađuju. Tu se ubrajaju razne masti, ulja, šećeri i škrob. Sirovine koje u sastavu imaju značajan sastojak drva se teško razgrađuju iako su organskog podrijetla npr. trava, kukuruz, repa, granje drvenastih vrsta. Drvenaste vrste prije uključivanja u sirovinu moraju se obraditi kako bi se uklonio lignin (koji značajno usporava anaerobnu digestiju). Takva tehnologija je u razvoju te je sljedeći ključni korak napraviti efektivnu frakciju celuloze, hemi-celuloze, lignina i spojeva koji bi prelaskom u lako razgradive oblike biomase bili od velike važnosti, ali naravno na ekonomski održiv način [2, 3]. Tipične sirovine za bioplinska postrojenja mogu biti biljnog i životinjskog podrijetla:

- životinjski izmet,
- poljoprivredni ostaci i nusproizvodi,
- organski otpad iz prehrambeno-prerađivačke industrije,
- organski otpad iz industrije biomaterijala (npr. pulpa i papir, farmaceutski proizvodi)
- organska frakcija komunalnog krutog otpada,
- otpad koji nastaje pri pripremi iz konzumacije hrane iz ugostiteljstva,
- kanalizacijski mulj iz postrojenja za obradu otpadnih voda,
- energetske usjevi (npr. kukuruz, šećerna repa, trava).

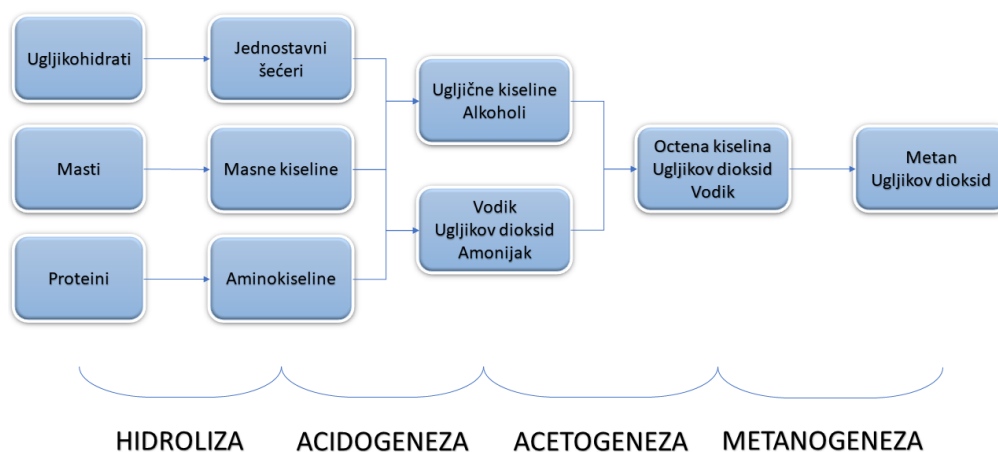
## 2.1. Biokemijski postupak anaerobne digestije

Glavni proizvodi anaerobne digestije procesa su bioplin i digestat. Bioplin je gorivi plin koji se primarno sastoji od metana i ugljikovog dioksida, koji čine otprilike 90% bioplina (cjelovit sastav prikazan je tablicom 2.1.). Glavni sastojak bioplina je metan, jer on daje energetska vrijednost plinu, a udio metana varira ovisno o sirovini koja se koristi u procesu proizvodnje bioplina. Digestat je procesuirani ostatak supstrata, nastao tijekom proizvodnje bioplina.

**Tablica 2.1. Sastav bioplina [2]**

Kemijski spoj	Kemijski simbol	Udio u bioplenu (%)
Metan	CH <sub>4</sub>	50 – 75
Ugljikov dioksid	CO <sub>2</sub>	24 – 45
Vodena para	H <sub>2</sub> O	2 – 7
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

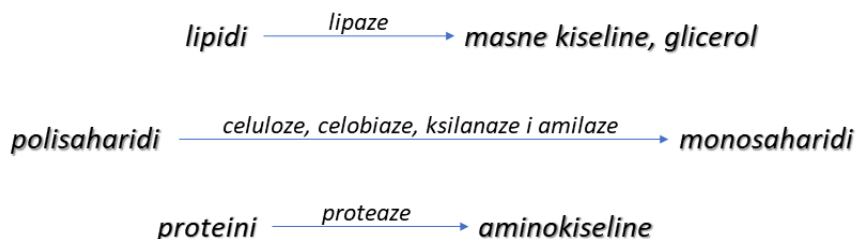
Tijekom anaerobne digestije supstrata nastaje vrlo malo topline u usporedbi s aerobnom razgradnjom (uz prisutnost kisika) ili kompostiranja. U supstratu je pohranjena kemijska energija u obliku kemijskih veza, a oslobađa se kidanjem istih i oslobađanjem metana. Proces anaerobne digestije događa se u nekoliko stupnjeva koji uključuju različite vrste bakterija ovisno o kojoj fazi je riječ. Slikom 2.1. pojednostavljeno je prikazan shematski prikaz anaerobne digestije kao i glavne faze iste [4].



Slika 2.1. Glavne faze anaerobne digestije [4]

### 2.1.1. Hidroliza

Hidroliza je prva faza anaerobne digestije tijekom koje se organska tvar (polimeri) razlažu na manje jedinice zvane monomeri i oligomeri. Polimeri poput ugljikohidrata, lipida, aminokiselina i bjelančevina transformiraju se u glukozu, glicerol, purine, piridine i sl. Hidrolitičke bakterije luče hidrolitičke enzime i transformiraju biopolimere u jednostavne i topljive spojeve kako je prikazano:



Opisani lančani procesi odvijaju se istodobno unutar fermentora, a brzina cjelokupnog procesa razgradnje određena je brzinom odvijanja najsporije reakcije u lancu. Produkte hidrolize dalje razgrađuju (probavljaju) prisutne bakterije, koje ujedno koriste ove spojeve za vlastite metaboličke procese [4].

### 2.1.2. Acidogeneza

U fazi acidogeneze proizvodi hidrolize se uz pomoć acidogenih bakterija (fermentacije) transformiraju u metanogene spojeve. Jednostavni šećeri, aminokiseline i masne kiseline razgrađuju se na acetat, ugljikov dioksid i vodik (70%) te na hlapljive masne kiseline i alkohole (30%) [4].

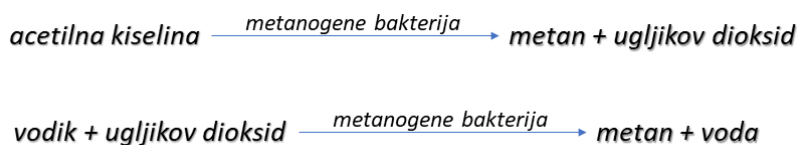


### 2.1.3. Acetogeneza

Tijekom acetogeneze se proizvodi anaerobne digestije ili fermentacije, koji se ne mogu metanogenim bakterijama direktno transformirati u metan, pretvaraju u metanogene spojeve. Hlapljive masne kiseline i alkoholi oksidiraju u acetat, vodik i ugljikov dioksid. Hlapljive masne kiseline koje imaju lance ugljika duže od dvije jedinice i alkohol s više od jedne molekule ugljika, oksidiraju u acetate i vodik. Nastanak vodika ima za rezultat povećanje parcijalnog tlaka vodika u digestoru, što se može smatrati otpadnim proizvodom acetogeneze jer inhibira metabolizam acetogenih bakterija. Tijekom metanogeneze vodik se transformira u metan. Procesi acetogeneze i metanogeneze uglavnom se odvijaju paralelno kao simbiotsko djelovanje dvije grupe organizama [4].

### 2.1.4. Metanogeneza

Proizvodnja metana i ugljikovog dioksida potaknuta je aktivnošću metanogenih bakterija. Otprilike 70% metana nastaje iz acetata, dok ostalih 30% nastaje pretvorbom vodika i ugljikovog dioksida, kako je prikazano u nastavku:



Metanogeneza je ključni korak u cijelom procesu anaerobne razgradnje, a ujedno predstavlja i najsporiju biokemijsku reakciju u proizvodnji bioplina. Metanogeneza uvelike ovisi o uvjetima rada, odnosno supstratu. Na uspješnost metanogeneze utječe niz čimbenika kao što su: sastav sirovine, stupanj dopune digestora, temperatura i pH vrijednost supstrata.

Pretrpavanje digestora, promjena temperature ili dotok kisika obično rezultiraju velikim problemima opisanog biokemijskog procesa ili pak zaustavljanjem proizvodnje istog. Odstupanja u proizvodnji odnosno promjene pojedinog čimbenika mogu rezultirati i višemjesečnim uspostavljanjem sustava proizvodnje bioplina u normalu [4].

## 2.2. Parametri anaerobne digestije

Učinkovitost anaerobne digestije ovisi o nekoliko ključnih parametara pa je stoga vrlo važno osigurati optimalne uvjete za razvoj anaerobnih mikroorganizama. Na njihov rast i aktivnost snažno utječe nedostatak kisika, temperatura, pH vrijednost, opskrbljenost hranjivim tvarima odnosno sastav supstrata, intenzitet miješanja kao i prisutnost inhibitora. Također, treba

voditi računa da su metanogene bakterije strogo anaerobne i zato se mora spriječiti svaki dotok kisika u digestor [4].

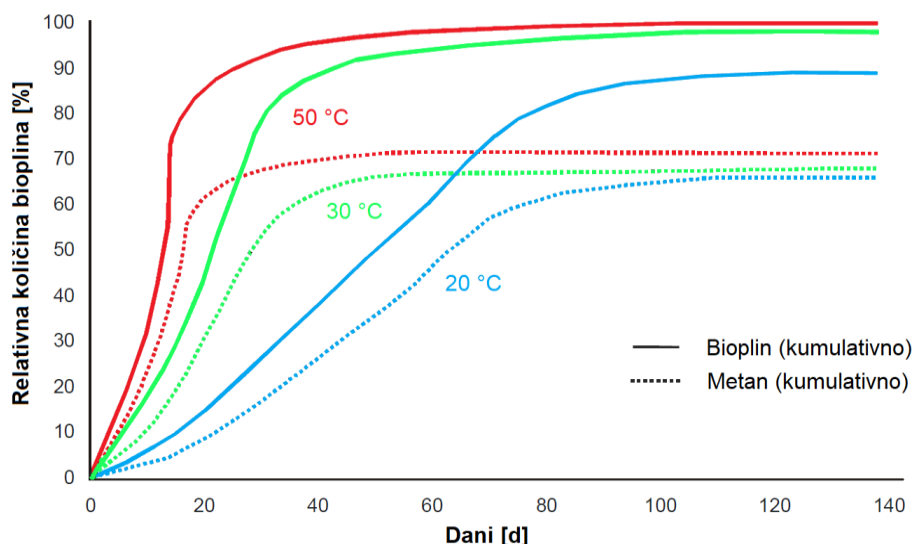
### 2.2.1. Temperatura

Postupak anaerobne digestije može se odvijati na različitim temperaturama. Temperature se klasificiraju u tri temperaturne zone: psihrofilnu, mezofilnu i termofilnu temperaturnu zonu. Duljina trajanja postupka anaerobne digestije je u direktnoj vezi s temperaturom na kojoj se postupak odvija što je i prikazano sljedećom tablicom.

**Tablica 2.2. Temperaturne zone anaerobne digestije [4]**

Temperaturna zona	Procesne temperature	Minimalno vrijeme trajanja procesa
Psihrofilna	< 20 °C	70 – 80 dana
Mezofilna	30 – 45 °C	24 – 45 dana
Termofilna	45 – 55 °C	15 – 20 dana

Stabilnost temperature je ključna za anaerobnu digestiju koja se pak održava putem podnih ili zidnih sustava grijanja unutar digestora (fermentora) kao i protočnim izmjenjivačima topline. Prinos bioplina uvelike ovisi o temperaturi pri kojoj se odvija proces. Slika 2.2. zorno prikazuje kako pri višim temperaturama proces anaerobne digestije ostvaruje veće količine bioplina odnosno metana, ali je još bitnije što se proces anaerobne digestije odvija u kraćem vremenskom periodu, što znači veći godišnji prinos bioplina. Dakle, ostvarena je ekstrakcija veće količine energije iz supstrata u istom vremenskom periodu što proces čini bržim i učinkovitijim. Isto tako, treba napomenuti kako je glavni čimbenik procesne temperature sastav supstrata te da se radna temperatura u praksi odabire ovisno o vrsti tj. sastavu istog.



Slika 2.2. Prinos bioplina ovisno o temperaturi procesa i vremenu retencije [5]

Veliki dio suvremenih postrojenja za proizvodnju bioplina rade na termofilnim temperaturama jer se javljaju brojne prednosti u odnosu na procese pri psihrofilnim i mezofilnim temperaturama, ali ujedno do izražaja dolaze i nedostaci tijekom vođenja procesa anaerobne digestije pri višim temperaturama o kojima također treba voditi računa [4].

Prednosti procesa proizvodnje pri termofilnim temperaturama su:

- učinkovito uništenje patogena,
- viša stopa rasta metanogenih bakterija na višim temperaturama,
- kraće vrijeme digestije, što proces čini bržim i učinkovitijim,
- poboljšana razgradnja i iskoristivost hranjivih tvari iz supstrata,
- bolja razgradnja krutih tvari i iskoristivost supstrata,
- bolja mogućnost razdvajanja tekuće i krute faze supstrata.

Nedostaci procesa proizvodnje pri termofilnim temperaturama očituju se u:

- većem stupnju neravnoteže,
- većoj potrošnji energije radi postizanja većih željenih temperatura,
- većem riziku od inhibicije amonijakom (stvaranja amonijaka).

Viskozitet sadržaja unutar digestora obrnuto je proporcionalan temperaturi. Što su temperature veće, supstrat je manjeg viskoziteta, odnosno prelazi u tekuće stanje čime je olakšana difuzija otopljenih tvari. Postupak na termofilnim temperaturama rezultira bržim kemijskim reakcijama, a time i većom učinkovitošću proizvodnje bioplina i manjim viskozitetom. Veći utrošak energije pri termofilnim procesima opravdan je boljim prinosom bioplina. Temperaturu procesa važno je održati konstantnom jer promjene ili variranja temperature negativno utječu na proizvodnju bioplina. Termofilne bakterije su osjetljive na variranja temperature od  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , te im je potrebno duže vremena da se prilagode novonastalim uvjetima i dosegnu maksimalnu proizvodnju metana. Mezofilne bakterije manje su osjetljive i podnose fluktuacije temperature od  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  bez znatnih smetnji u proizvodnji bioplina.

### 2.2.2. pH vrijednost

Kiselost odnosno bazičnost otopine kod mješavine supstrata izražava se pH vrijednošću. pH vrijednost supstrata utječe na rast i razvoj metanogenih mikroorganizama i kvalitetu odvajanja pojedinih spojeva važnih za uspješnost postupka anaerobne digestije (amonijak, sulfidi i organske kiseline). Nastanak metana odvija se u relativno uskom području pH vrijednosti, od otprilike pH 5,5 do 8,5 s optimumom između 7 i 8 za većinu metanogenih bakterija, dok su za acidogene bakterije, u mnogim slučajevima, optimalne niže vrijednosti pH.

Optimalne pH vrijednosti za mezofilnu digestiju su u rasponu od 6,5 do 8, a do inhibicije procesa dolazi ako pH vrijednost padne ispod 6 ili poraste iznad 8,3. Topivost ugljikovog dioksida u vodi opada s povećanjem temperature pa je pH vrijednost u termofilnim digestorima veća nego u mezofilnim digestorima, budući da otopljeni ugljikov dioksid u reakciji s vodom stvara ugljičnu kiselinu.

Amonijak koji nastaje razgradnjom proteina iz organskih tvari ili sadržaj koji je unesen supstratom mogu uzrokovati povećanje pH vrijednosti, dok akumuliranje hlapljivih masnih kiselina u supstratu snižava pH vrijednost.

Unutar anaerobnih digestora pH vrijednost kontrolira se sustavom bikarbonatnih pufera. Stoga pH vrijednost unutar fermentora ovisi o parcijalnom tlaku ugljikovog dioksida i sadržaju bazičnih i kiselih spojeva u tekućoj fazi supstrata. U slučaju promjene koncentracije kiselih ili lužnatih spojeva, bikarbonatni puferi sprečavaju promjenu pH vrijednosti do određene razine. Kada se kapacitet puferskog sustava iscrpi, dolazi do drastičnih promjena pH vrijednosti što dovodi do potpune inhibicije procesa digestije. Iz ovog razloga pH vrijednost nije moguće koristiti kao jedini indikator za praćenje procesa, već se on uvijek promatra u korelaciji s drugim

parametrima. Važno je napomenuti da pH vrijednost može biti brz, pouzdan i jeftin način praćenja neravnoteže odnosno ravnoteže, osobito u sustavima s malim digestorskim kapacitetom [4].

### 2.2.3. Hlapljive masne kiseline

Hlapljive masne kiseline (VFA - *Volatile Fatty Acids*) su spojevi sa šest ili manje atoma ugljika (npr. acetat, propionat, butirat i laktat) koji nastaju kao međuspojevi tijekom faze acidogeneze. Stabilnost procesa anaerobne digestije i koncentracija nastalih međuspojeva su povezani.

Nestabilnost procesa dovodi do akumulacije hlapljivih masnih kiselina unutar digestora što može dovesti do pada pH vrijednosti. Akumulacija hlapljivih masnih kiselina se neće uvijek odraziti padom pH vrijednosti zbog puferske sposobnosti određenih supstrata. Na primjer, stajski gnoj ima suvišak alkalnih tvari što znači da količina hlapljivih masnih kiselina mora biti iznad određene granice prije no što dođe do pada pH vrijednosti. U tim slučajevima koncentracija kiselina u digestoru može biti toliko visoka da je proces AD već u velikoj mjeri inhibiran.

Iskustvo pokazuje da se dva različita digestora mogu ponašati potpuno različito kod iste koncentracije hlapljivih masnih kiselina. Ista koncentracija hlapljivih masnih kiselina može biti optimalna u jednom digestoru, a istovremeno inhibirajuća za proces u drugom digestoru. Jedno od mogućih objašnjenja može biti da se sastav populacije mikroorganizama razlikuje u svakom digestoru. Kao i kod određivanja pH vrijednosti, koncentracija hlapljivih masnih kiselina ne može se preporučiti kao zaseban indikator procesa [4].

### 2.2.4. Amonijak

Amonijak ( $\text{NH}_3$  i  $\text{NH}_4$ ) ima značajnu funkciju u procesu anaerobne digestije. Amonijak je važna hranjiva tvar koja služi kao prethodnik prehrambenim namirnicama i gnojivima, a obično se susreće kao plin karakteristično odbojnog mirisa. Glavni izvor amonijaka u procesu anaerobne digestije su bjelančevine.

Previsoka koncentracija amonijaka, osobito u neioniziranom obliku ( $\text{NH}_3$ ), može potpuno zaustaviti proces digestije. Kako bi se spriječila inhibicija, koncentraciju amonijaka u smjesi supstrata treba održavati ispod 80 mg/l. Metanogene bakterije izuzetno su osjetljive na inhibiciju amonijakom.

Koncentracija slobodnog amonijaka proporcionalna je temperaturi te je stoga rizik od inhibicije amonijakom veći kod termofilnih procesa nego kod mezofilnih, a razlog tome je što je za inhibiciju amonijakom odgovoran neionizirani oblik amonijaka. Slobodni amonijak ( $\text{NH}_3$ ) je frakcija amonijaka koja inhibira proces anaerobne razgradnje.

Analogno prethodnim spoznajama jasno je kako povećanje pH vrijednosti i temperature dovodi do povećanja inhibicije. Teoretski, ali i praktično gledano, zaustavljanje procesa povećanjem koncentracije amonijaka rezultira povećanjem koncentracije hlapljivih masnih kiselina. Nadalje, povećani udio kiselina rezultira smanjenjem pH vrijednosti digestora što djelomično umanjuje učinak amonijaka radi smanjenja koncentracije slobodnog amonijaka.

### **2.2.5. Elementi u tragovima**

Željezo, nikal, kobalt, selen, molibden i volfram su elementi u tragovima koji su važni za rast i preživljavanje anaerobnih bakterija jednako kao i makronutrijenti. Optimalan odnos makronutrijenata ugljika, dušika, fosfora i sumpora (C:N:P:S) iznosi 600:15:5:1. Nedostatan sadržaj hranjivih tvari i elemenata u tragovima, kao i prevelika razgradivost supstrata, može uzrokovati inhibiciju ili narušavanje procesa.

Jedan od uzročnika koji može djelovati na životni ciklus bakterija su toksične tvari koje u digestor dopijevaju zajedno sa supstratom ili nastaju tijekom samog postupka digestije. Teško je odrediti granicu toksičnosti u supstratu (koncentracije i vrste toksičnih tvari) budući da toksični spojevi mogu nastati tijekom kemijskih procesa, no anaerobni mikroorganizmi se u određenim granicama mogu adaptirati novonastalim uvjetima.

## **2.3. Sveobuhvatni popis parametra praćenja anaerobne digestije**

U konačnici, potrebno je analizirati parametre radi što bolje kontrole sustava i što veće iskoristivosti istog tj. stabilna biologija u digestoru, rezultat će i većim prinosom bioplina. Tablicom 2.3. prikazane su sve važne vrijednosti koje se svakodnevno prate kako bi proces radio u odgovarajućem režimu rada.

**Tablica 2.3. Sveobuhvatni popis radnih parametara jednog bioplinskog postrojenja [4]**

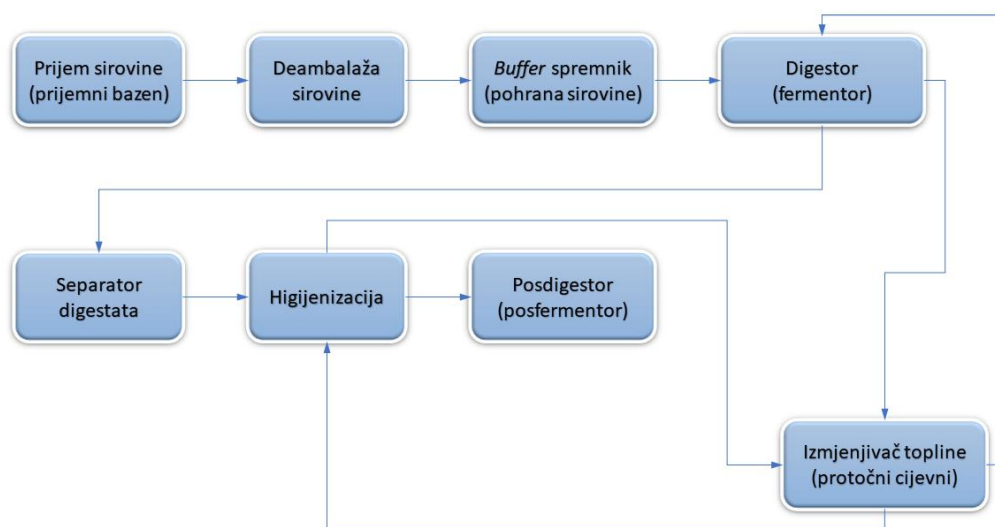
Parametar	Oznaka	Mjerna jedinica	Prikupljanje informacija
Temperatura	t	°C	Mjerenje tijekom postupka
Radni tlak	p	bar	Mjerenje tijekom postupka
Proizvodnja bioplina	$V_{bp}$	$m^3$	Mjerenje tijekom postupka
Udio CH <sub>4</sub> u bioplina	CH <sub>4</sub>	%	Mjerenje tijekom postupka
Napunjenost spremnika	V	$m^3$	Mjerenje tijekom postupka
Protok, intenzitet doziranja	$V_d$	$m^3/d$	Mjerenje tijekom postupka
Prijem sirovine	$m_{sirovine}$	t/d, t/mj	Unos podataka
pH vrijednost	pH	-	Mjerenje u laboratoriju
FOS/TAC	FOS/TAC	-	Mjerenje u laboratoriju
Ukupna energija	$E_{uk}$	kWh	Proračun iz količine plina i koncentracije metana
Proizvodnja električne energije	$E_{el}$	kWh	Mjerenje tijekom postupka
Plasman električne energije u mrežu	$E_{el-dist}$	kWh	Mjerenje na trafostanici HEP-a
Potrošnja toplinske energije	$E_{topl}$	kWh	Mjerenje tijekom postupka
Iskoristivost postrojenja	$\eta$	%	Proračun

Bitno je napomenuti kako se način prikupljanja podataka razlikuje ovisno o postrojenju i opremljenosti istog. U ovom radu analizirano postrojenje je opremljeno naprednim sustavom upravljanja i prikupljanja podataka poznatiji kao SCADA (eng. *Supervisory Control and Data Acquisition*). SCADA uvelike olakšava prikupljanje podataka, nadzor procesa te upravljanje.

### 3. OPIS POSTOJEĆEG BIOPLINSKOG KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA (TOK SIROVINE)

Kogeneracijsko bioplinsko postrojenje snage 1 MW nalazi se u blizini Zagreba te koristi lokalni biorazgradivi otpad i životinjske nusproizvode kao sirovinu. Procesom anaerobne digestije prerađuje se biorazgradivi otpad iz kuhinja i kantina, hrana isteklog roka trajanja iz trgovina i prehrambene industrije, flotati iz prehrambene industrije i klaonica te otpadno mlijeko iz mljekara.

Proizvodni postupak možemo podijeliti na sedam dijelova (slika 3.1.).



Slika 3.1. Shema proizvodnog procesa (tok sirovine)

#### 3.1. Prijem i deambalaža sirovine

Prijem sirovine je prvi korak proizvodnog procesa što obuhvaća istovar sirovine koja dolazi u bačvicama od 60 litara, kantama od 120 i 240 litara, kamionskim kontejnerima i autocisternama. Biorazgradivi otpad se sabire u spremniku (prijemni bazen) u kojem se odlaže biorazgradivi otpad u krutom stanju te zatim počinje svoj put kroz proizvodni proces. Biorazgradivi otpad u tekućem stanju se po dolasku pohranjuje u jedan od tri spremnika ukupnog volumena 60 m<sup>3</sup>, a potom se tekuća sirovina (mlijeko, pivo, sok, krv) uključuje u sustav kada je smjesa krute sirovine suha, s ciljem ovlaživanja iste. Također, vozila s kojima se biorazgradivi otpad dovozi se važu pri dolasku i odlasku kako bi se znala točna količina zaprimljenih sirovina. Pogon je opremljen sustavom ventilacije i filtracije s ciljem uklanjanja neugodnih mirisa. Sljedeća slika prikazuje napunjeni prijemni bazen.





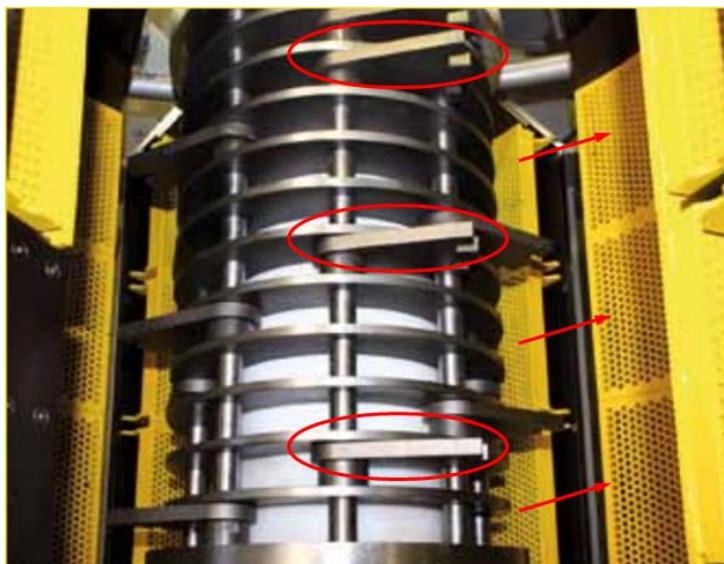
**Slika 3.2. Prijemni bazen**

Deambalaža sirovine je drugi korak predpripreme sirovine. Transport sirovine se odvija preko pužnih transportera od sabirnog spremnika do deambalažnog stroja. Deambalažni stroj (slika 3.3.) je rotacijski stroj koji istovremeno usitnjava sirovinu i odvaja ambalažu, a kapacitet separatora je 10 t/h što ga čini iznimno efikasnim strojem.



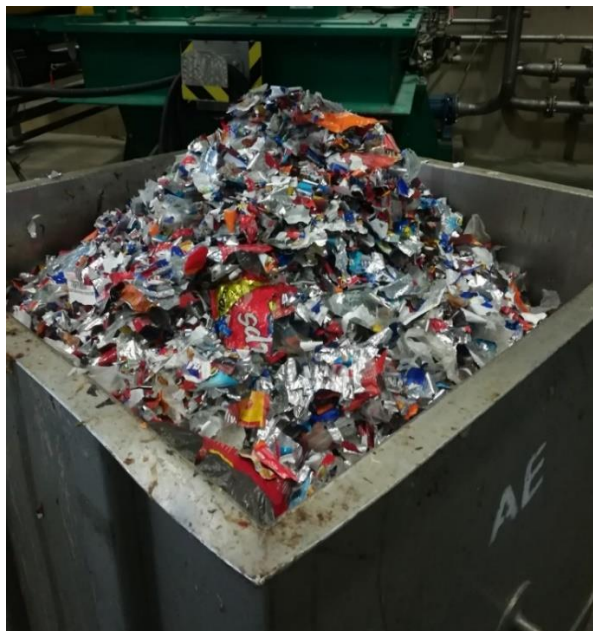
**Slika 3.3. Deambalažni stroj [6]**

Rotacijski dio se sastoji od čekića koji su vezani za vratilo. Čekići usitnjavaju sirovinu te ju usmjeravaju kroz sito, a ono je pak statički dio što je i prikazano slikom 3.4. Na kraju ambalaža izlazi odvojeno jer se ne uspije usitniti tj. pretvoriti u pastu kao sirovina.



**Slika 3.4. Rastvoren deambalažni stroj [6]**

Produkt separacije, uz usitnjenu ambalažu, (slika 3.5.) je i sirovina u obliku paste koja se po potrebi tijekom procesa separacije razrjeđuje s većom ili manjom količinom vruće vode što prvenstveno ovisi o strukturi sirovine. Takva sirovina (sad već supstrat) se dalje transportira pumpom u *buffer* tj. hidrolizni spremnik.



**Slika 3.5. Ambalaža na izlazu iz deambalažnog stroja**

### 3.2. Hidrolizni spremnik (*buffer* spremnik)

Hidrolizni spremnik ima ulogu akumulacijskog spremnika, a ujedno se u njemu odvija proces hidrolize. Volumen spremnika je  $520 \text{ m}^3$ , a aktivni volumen je  $450 \text{ m}^3$  te je napravljen od nehrđajućeg čelika. Hidrolizni spremnik ima dva sporohodna mješača pogonjena elektromotorima preko reduktorskog prijenosa, a služe sprječavanju nastanka sedimentacije (površinskog sloja masnoće) i povećanju homogenosti digestata. Instalirani su kosi i horizontalni mješači radi što boljeg miješanja, a prikazani su sljedećom slikom.



Slika 3.6. Mješači *buffer* spremnika [7]

Nakon procesa hidrolize koji traje 6,5 dana supstrat se transportira u digestor gdje se odvijaju preostale faze anaerobne digestije. Dnevno se otprilike  $65 - 75 \text{ m}^3$  supstrata ubacuje u digestor te je tijekom tjedna količina napunjenosti hidroliznog spremnika u blagom porastu, a vikendom se napunjenost smanjuje. Temperatura u hidroliznom spremniku se kreće od  $30$  do  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ , a pH vrijednost od  $3,5$  do  $4,5$ .

### 3.3. Digestor (fermentor)

U digestoru se, kako i sam naziv govori, odvijaju preostale, a ujedno i glavne faze anaerobne digestije. Digestor je spremnik u kojem se odvija glavna proizvodnja bioplina. Dnevno se iz *buffer* spremnika upumpa maksimalno  $75 \text{ m}^3$  supstrata. Doziranje se provodi u vremenskim razmacima, 12 puta u danu tj. svaka dva sata (maksimalno  $6,25 \text{ m}^3$  po doziranju). S ciljem održavanja napunjenosti spremnika, prije doziranja iz hidroliznog spremnika provodi se pražnjenje digestora u istoj količini kako bi maseni tok bio jednak, odnosno napunjenost digestora konstantna uz manje oscilacije. Volumen digestora je  $3900 \text{ m}^3$ , dok se efektivni volumen kreće oko  $3580 \text{ m}^3$ .

Metanogene bakterije su teško pokretljive pa je neophodno konstantno miješanje radi dovođenja hranjivih tvari do bakterija i lakše proizvodnje plina. Stoga je digestor opremljen s jednim velikim sporohodnim visećim mješačem koji je vertikalno upušten u sredinu spremnika (slika 3.7.). Njegova zadaća je sprječavanje sedimentacije, stvaranja površinskog sloja masnoće i povećanje homogenosti digestata. U digestor se dodaje manja količina zraka (oko 2% u odnosu na proizvedeni plin) radi odsumporavanja, jer se zbog vrste biootpada sumpor javlja kao sastojak bioplina.



**Slika 3.7. Mješač digestora [7]**

Proces se odvija u mezofilnom temperaturnom području (30-45 °C) te je potrebno održavati istu. Temperatura se održava konstantnom na 40,5 °C s mogućnošću odstupanja od 0,2 °C, a održava se cirkulacijom digestata kroz protočni izmjenjivač topline. Izmjenjivač topline snage 300 kW je na sekundarnoj strani napajan s vrućom vodom koja je proizvod plinskog motora. pH vrijednost tijekom anaerobne digestije u neutralnom području je oko 7,8 a vrijeme zadržavanja u digestoru je oko 40 dana.

### **3.4. Separator i higijenzacija digestata**

Nakon fermentacije digestat se iz digestora transportira na separator. U digestatu na vijčanom separatoru (slika 3.8.) anorganska tvar (kruti digestat) se odvoji od tekuće (tekući digestat) te potom preostali digestat ide u međuspremnik volumena 25 m<sup>3</sup>. Zatim slijedi postupak higijenzacije koji se provodi u spremniku 30 m<sup>3</sup>. Higijenzacija se provodi tako da se digestat drži na temperaturi od 70 °C jedan sat. Izmjenjivač topline snage 400 kW se koristi za

higijenizaciju digestata, a on je sa sekundarne strane napajan vrućom vodom koja je također proizvod plinskog motora, kao i kod digestora.



**Slika 3.8. Vijčani separator [8]**

Sirovinu životinjskog podrijetla, koja nije za prehranu ljudi (ŽNP K3), potrebno podvrgnuti higijenizaciji u skladu s europskim higijenskim propisima (Uredba EC br. 1069/2009, Uredba ES 142/2011) [9, 10].

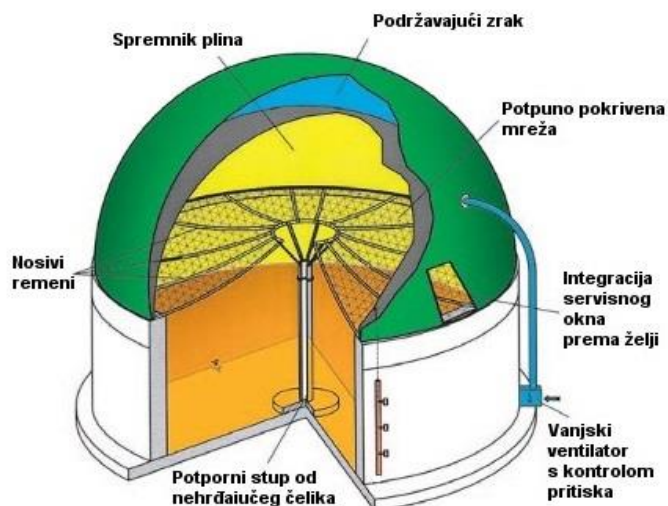
Po završetku higijenizacije digestat se ohladi i šalje u post-digestor u kojem se još dodatno hladi radi bolje kasnije dehidracije.

### **3.5. Post-digestor (post-fermentor)**

Digestirana i higijenizirana sirovina upumpava se u post-digestor gdje se digestat hladi i na taj način sprječava ispuštanje amonijaka u atmosferu. Također, u post-digestoru se stvara manja količina bioplina što je još jedna u nizu od prednosti. Vrijeme zadržavanja iznosi oko 18 dana.

Post-digestor ima volumen od 1700 m<sup>3</sup> dok je efektivni volumen 960 m<sup>3</sup>. Opremljen je s mjernom opremom kao i sporohodnim mješačem kao i ostali spremnici, ali u sklopu post-digestora se nalazi i plinohran bioplina izveden s dvije membrane. Sljedećom slikom je i shematski prikazan izgled post-digestora s plinohranom.





Slika 3.9. Post-digestor s plinohranom [11]

Bioplinsko blato (digestorski ostatak) se zatim odvozi u drugo bioplinsko postrojenje (lagunu) na daljnju obradu tj. isušivanje što rezultira organskim gnojivom. Pražnjenjem post-fermentora odnosno odvozom digestata ujedno i završava postupak anaerobne fermentacije.

Slikom 3.10. su prikazani spremnici opisanog bioplinskog postrojenja. Hidrolizni spremnik (lijevo), post-digestor s plinohranom (desno) i digestor (u sredini).

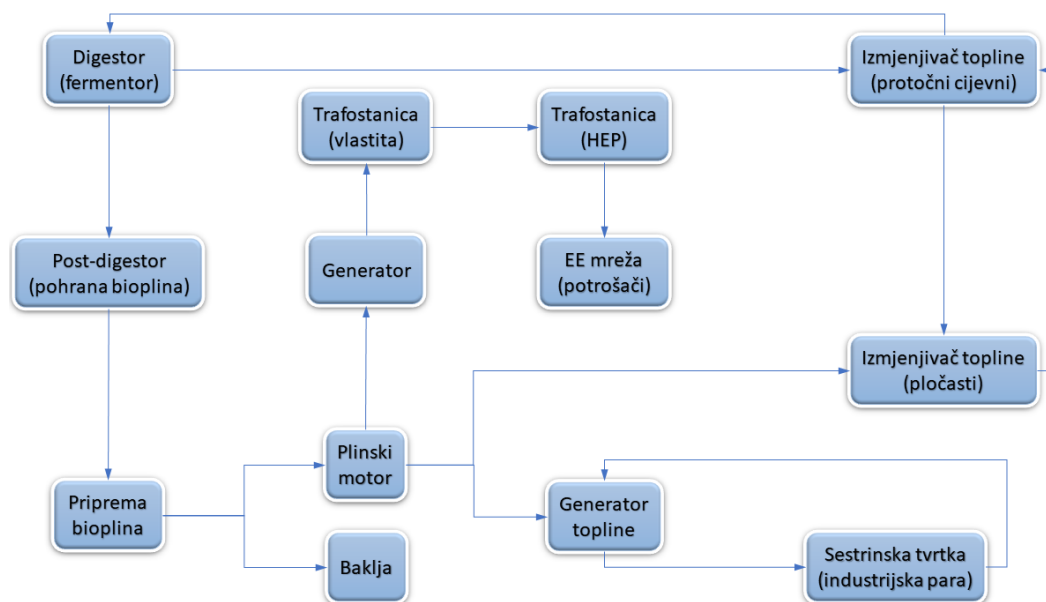


Slika 3.10. Spremnici opisanog bioplinskog postrojenja

Cijeli proces anaerobne digestije opisanog postrojenja traje otprilike 64,5 dana. Točnije, proces hidrolize traje 6,5 dana, vrijeme zadržavanja u digestoru je 40 dana te vrijeme zadržavanja digestata u post-fermentoru iznosi 18 dana ( $6,5 + 40 + 18 = 64,5$  dana).

## 4. OPIS POSTOJEĆEG BIOPLINSKOG KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA (TOK BIOPLINA I ENERGIJE)

Nakon anaerobne digestije proces se nastavlja pripremom i pretvorbom kemijske energije bioplina kao jedan od produkata digestije. Shema bioplinskog procesa (tok bioplina i energije) prikazana je slikom 4.1.



Slika 4.1. Shema bioplinskog postrojenja (tok bioplina i energije)

### 4.1. Priprema bioplina

Prije korištenja u kogeneracijskom postrojenju, bioplina je potrebno pripremiti. Naime, prikupljeni plin iz digestora i post-digestora je zasićen vodom i onečišćen raznim primjesama te se mora filtrirati i osušiti, što se postiže hlađenjem te ponovnim grijanjem. U fazi hlađenja kondenzat se ukapljuje i odvodi. Potom plin uz pomoć ventilatora, koji povećava tlak plina, nastavlja put kroz dva filtera s aktivnim ugljenom gdje se pročišćava te zatim ide na plinski Otto motor.

### 4.2. Baklja

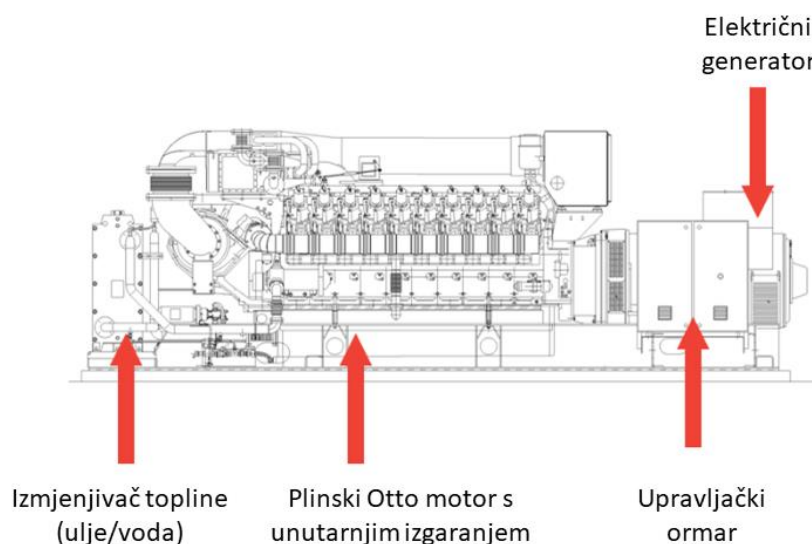
Sva su bioplinska postrojenja opremljena s bakljom pa je tako i ovo. Baklja je sigurnosni element koji u slučaju prestanka rada motora preuzima ulogu potrošača plina te spaljuje višak plina koji se ne može pohraniti u plinohran zbog nedostatnosti kapaciteta.

Višak plina nastaje u trenutku kada motor prestane raditi (npr. problemi s radom, servis motora, problemi s mrežom), a biologija unutar digestora i dalje proizvodi plin. Kako je

kapacitet plinohrana ograničen, višak plina se mora spaliti da ne bi došlo do popuštanja na istom.

### 4.3. Plinski motor i generator topline (kogeneracijska jedinica)

Kogeneracijska jedinica sastoji se od Otto motora s električnim generatorom, te generatora pare na otpadnu toplinu dimnih plinova iz motora. Plinskim motorom se kemijska energija pohranjena u bioplinu pretvara u mehaničku, a na el. generatoru i u električnu energiju. Nusproizvodi rada motora/proizvodnje električne energije su dva izvora toplinske energije. Jedan izvor toplinske energije su dimni plinovi, dok je drugi izvor toplinske energije voda za hlađenje motora. Glavne komponente plinskog motora prikazane su sljedećom slikom:



**Slika 4.2. Glavne komponente plinskog Otto motora s unutarnjim izgaranjem [12]**

Prilikom rada motora dimni plinovi se propuštaju preko parnog kotla (generatora pare). Dimni plinovi ulaze u parni kotao s temperaturom oko 550 °C, a izlaze s 270 °C predajući toplinsku energiju vodi koja se zagrije do stanja pregrijane pare (7 bar i 170 °C). Nastala para se cjevovodom transportira do sestrinske tvrtke gdje se koristi za daljnje potrebe tehnoloških procesa.

Voda za hlađenje motora pak postiže temperaturu od 85 do 90 °C te se koristi za vlastiti tehnološki proces, grijanje pogona i uredskih prostorija.

Radom motora snage 1 MW proizvodi se 350 kW toplinske energije na strani pare te 550 kW na strani vode. Motor radi stalnom brzinom od 1500 o/min te ostvaruje ukupnu iskoristivost od 40,9 %.



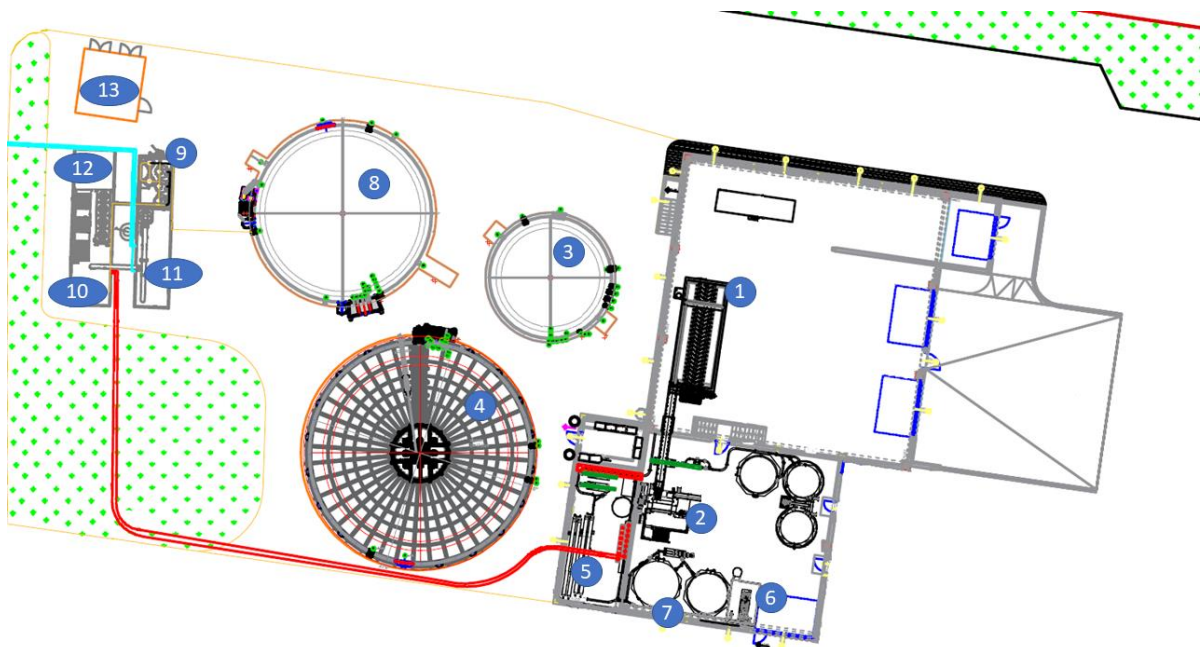
Sljedećom slikom je prikazan motor, odnosno kontejner motora u koji je on integriran kao i generator pare, baklja, trafostanica, parovod, digestor i post-digestor.



Slika 4.3. Bioplinsko postrojenje (kogeneracijski dio postrojenja)

#### 4.4. Sklopna shema bioplinskog postrojenja

Shemom je prikazan konačan izgled bioplinskog postrojenja. Redoslijed oznaka odgovara toku sirovine, a kasnije toku bioplina i energije.



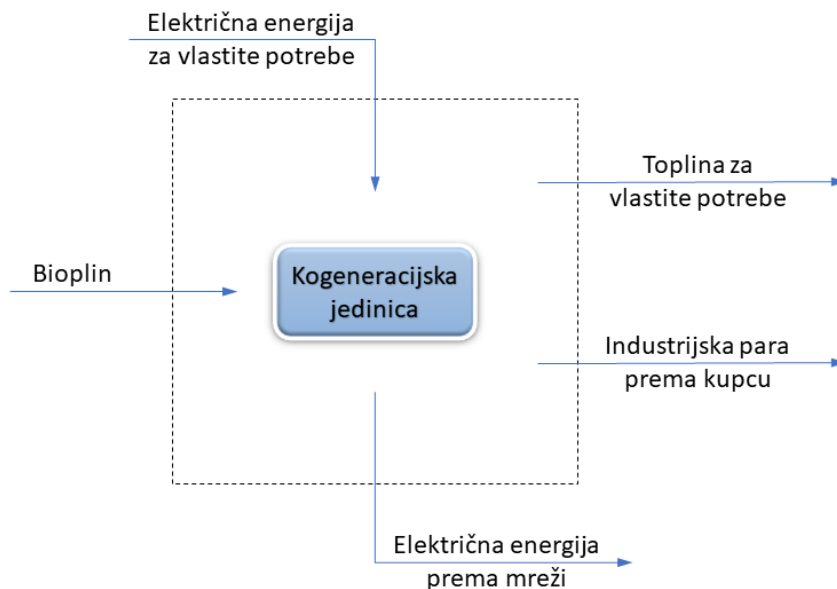
Slika 4.4. Shema bioplinskog postrojenja

- 1) Prijemni bazen
- 2) Deambalažni stroj

- 3) Hidrolizni spremnik
- 4) Digestor (fermentor)
- 5) Izmjenjivač topline (toplinska stanica)
- 6) Separator
- 7) Higijenizacija
- 8) Post-digestor (post-fermentor) i plinohran
- 9) Priprema bioplina i baklja
- 10) Plinski motor
- 11) Generator pare na otpadnu toplinu
- 12) El. generator
- 13) Trafostanica u vlasništvu pogona

## 5. ENERGETSKA BILANCA BIOPLINSKOG POSTOJENJA

Energetska bilanca bioplinskog postrojenja je prikazana u nastavku, a ujedno je provedena i analiza istog.



Slika 5.1. Energetski tokovi postrojenja

Glavni tj. primarni izvor energije se ostvaruje iz bioplina koji u prosjeku sadrži 61,93% metana ( $\text{CH}_4$ ). Podatci za 2018. godinu su dostupni iz SCADA-e te je prema udjelu metana određena donja ogrjevna vrijednost plina za pojedini mjesec što je i prikazano sljedećom tablicom.

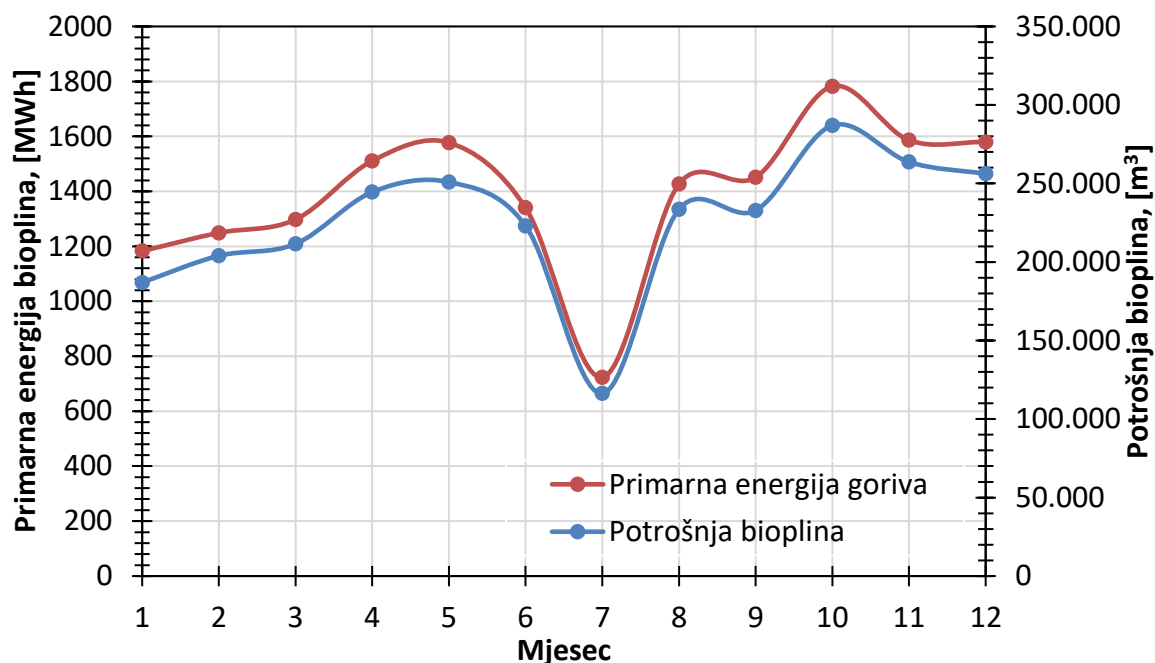
Tablica 5.1. Određivanje donje ogrjevne vrijednosti bioplina (metana)

Mjesec	Udio $\text{CH}_4$	$\Delta H_{\text{md}}$ [MJ/kmol]	$M(\text{CH}_4)$ [kg/kmol]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\Delta h_{\text{d,metana}}$ [kWh/m <sup>3</sup> ]	$\Delta h_{\text{d,bioplina}}$ [kWh/m <sup>3</sup> ]
Siječanj	63,51 %	802,3	16,04	0,7168	9,959	6,33
Veljača	61,49 %	802,3	16,04	0,7168	9,959	6,12
Ožujak	61,59 %	802,3	16,04	0,7168	9,959	6,13
Travanj	62,04 %	802,3	16,04	0,7168	9,959	6,18
Svibanj	63,12 %	802,3	16,04	0,7168	9,959	6,29
Lipanj	60,33 %	802,3	16,04	0,7168	9,959	6,01

Mjesec	Udio CH <sub>4</sub>	$\Delta H_{md}$ [MJ/kmol]	M(CH <sub>4</sub> ) [kg/kmol]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\Delta h_{d,metana}$ [kWh/m <sup>3</sup> ]	$\Delta h_{d,bioplina}$ [kWh/m <sup>3</sup> ]
Srpanj	62,44 %	802,3	16,04	0,7168	9,959	6,22
Kolovoz	61,33 %	802,3	16,04	0,7168	9,959	6,11
Rujan	62,57 %	802,3	16,04	0,7168	9,959	6,23
Listopad	62,36 %	802,3	16,04	0,7168	9,959	6,21
Studeni	60,40 %	802,3	16,04	0,7168	9,959	6,02
Prosinac	61,93 %	802,3	16,04	0,7168	9,959	6,17

Postupak određivanja energetske vrijednosti plina, na osnovu udjela metana, je poprilično jednostavan. Umnoškom donje molarne ogrjevne vrijednosti metana ( $\Delta H_{md}$ ) i recipročne molarne mase ( $M(\text{CH}_4)$ ) dolazi se do donje ogrjevne vrijednosti ( $\Delta h_{d,metana}$ ). Nadalje, umnoškom  $\Delta h_{d,metana}$  i gustoće ( $\rho$ ) se dolazi do donje ogrjevne vrijednosti u MJ/m<sup>3</sup> te zatim preostaje pretvoriti MJ u kWh. Pomnožimo li postotni udio plina za pojedini mjesec s donjom ogrjevnom vrijednosti u kWh/m<sup>3</sup> dobiva se energetska vrijednost bioplina za pojedini mjesec prema udjelu metana. Tablične vrijednosti za metan uzete su iz toplinskih tablica [13].

Kada poznajemo donju ogrjevnu vrijednost bioplina jednostavno se dolazi do energetske vrijednosti primarne energije u MWh što je i prikazano slikom 5.2.



**Slika 5.2. Proizvodnja (potrošnja) bioplina i primarna energija bioplina**

Slikom 5.1. vidljivo je da je bilo određenih problema s proizvodnjom odnosno s biologijom digestora u srpnju, ali treba imati na umu kako je pogon pušten u službeni rad, kao povlašteni proizvođač, sredinom 2017. godine te se još uvijek traže idealni radni parametri. Isto tako vidljiv je porast proizvodnje bioplina za 60.000 m<sup>3</sup> odnosno primarne energije iz bioplina za 400 MWh u odnosu na početak godine.

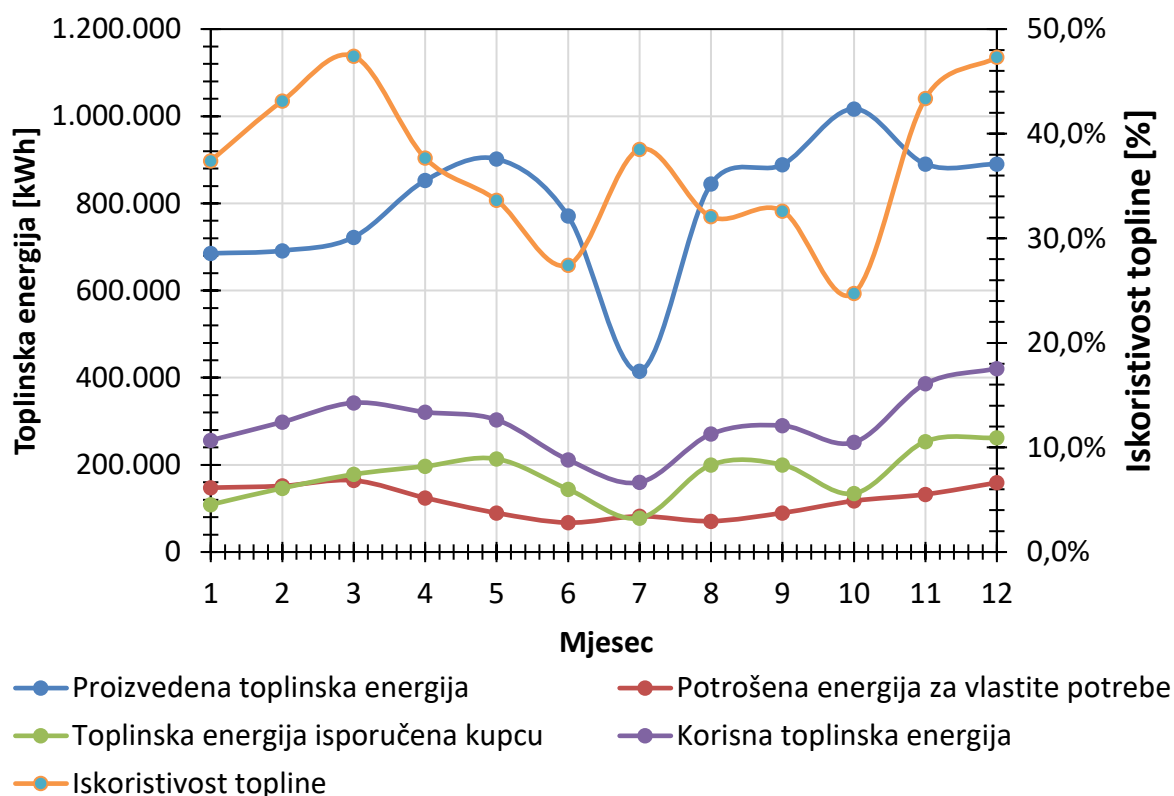
Nadalje, izgaranjem bioplina na motoru dobivamo električnu i toplinsku energiju. Bilance toplinske i električne energije prikazane su tablicom 5.3. i slikom 5.3.

**Tablica 5.2. Proizvedena, isporučena i potrošena električna energija**

Mjesec	Proizvedena električna energija [kWh]	Isporučena električna energija [kWh]	Električna energija potrošena na lokaciji [kWh]
Siječanj	459.400	445.256	52.184
Veljača	516.100	510.948	46.553
Ožujak	544.800	530.313	44.791
Travanj	630.900	611.406	46.974
Svibanj	651.000	627.580	47.594
Lipanj	537.600	515.513	53.397

Mjesec	Proizvedena električna energija [kWh]	Isporučena električna energija [kWh]	Električna energija potrošena na lokaciji [kWh]
Srpanj	277.000	256.809	51.040
Kolovoz	569.400	533.329	48.860
Rujan	553.100	519.667	42.219
Listopad	765.500	720.210	45.327
Studeni	684.600	646.025	49.934
Prosinac	683.100	645.399	44.122
<b>Ukupno</b>	<b>6.872.500</b>	<b>6.562.455</b>	<b>572.995</b>

Isporučena električna energija se razlikuje u odnosu na proizvedenu jer je trafostanica u vlasništvu tvrtke udaljena 8 metara od relevantne u vlasništvu HEP-a. Dakle, razlika predstavlja gubitke u prijenosu električne energije između istih, koji se kreću od 2-5 %.



Slika 5.3. Proizvedena, isporučena i potrošena toplinska energija

Slikom 5.3. je vidljivo kako proizvedena toplinska energija slijedi kretanje proizvodnje bioplina, dok kretanja iskoristivosti topline (iskoristivost potrošnje toplinske energije) nisu zavisna o proizvedenoj toplinskoj energiji. Iskoristivost topline se kreće u intervalu od 25-48 % s tim da je zimi u pravilu veća nego ljeti jer su potrebe za grijanjem smanjene.

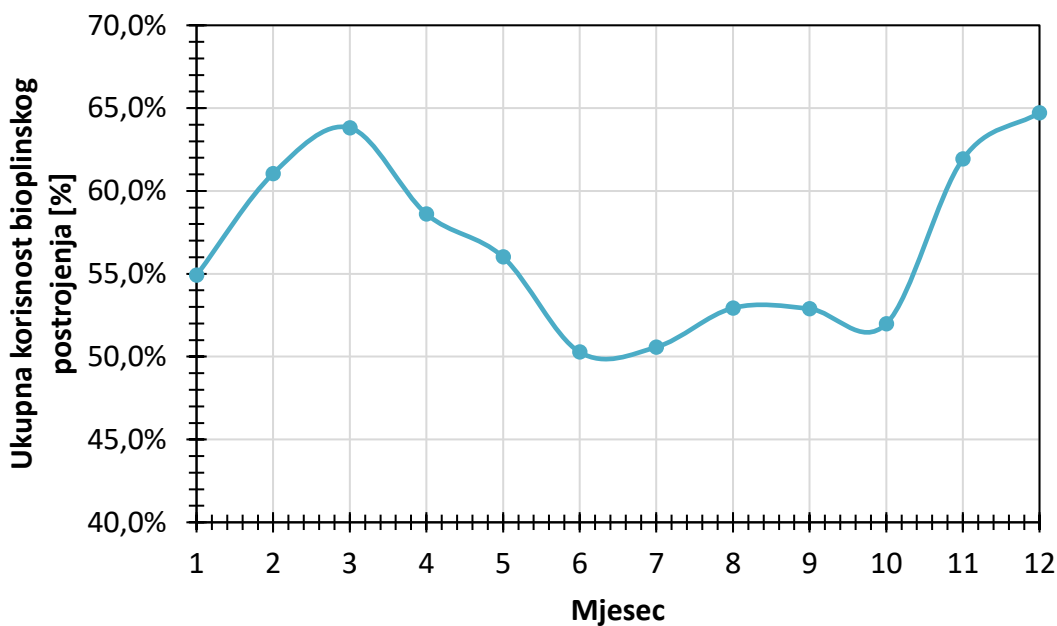
Ukupna iskoristivost topline u 2018. godini iznosi 36,7%, dok ukupna iskoristivost cijelog postrojenja iznosi 56,9% što je prikazano tablicom 5.5. Ukupna iskoristivosti postrojenja određena je omjerom:

$$\frac{\text{isporučena el. energija} + \text{korisna topl. energija} - \text{potrošena el. energija}}{\text{primarna energija goriva}}$$

**Tablica 5.3 Ukupna korisnost postrojenja**

Mjesec	Primarna energija goriva [kWh]	Isporučena električna energija [kWh]	Električna energija potrošena na lokaciji [kWh]	Korisna toplinska energija [kWh]	Ukupna korisnost [%]
Siječanj	1.182.801	445.256	52.184	259.393	54,9 %
Veljača	1.249.064	510.948	46.553	298.191	61,1 %
Ožujak	1.297.557	530.313	44.791	342.497	63,8 %
Travanj	1.510.955	611.406	46.974	321.155	58,6 %
Svibanj	1.577.169	627.580	47.594	303.390	56,0 %
Lipanj	1.340.055	515.513	53.397	211.596	50,3 %
Srpanj	723.034	256.809	51.040	159.901	50,6 %
Kolovoz	1.426.670	533.329	48.860	270.760	52,9 %
Rujan	1.450.854	519.667	42.219	289.902	52,9 %
Listopad	1.782.388	720.210	45.327	251.622	52,0 %
Studeni	1.586.183	646.025	49.934	386.164	61,9 %
Prosinac	1.579.856	645.399	44.122	421.225	64,7 %
<b>Ukupno</b>	<b>16.706.585</b>	<b>6.562.455</b>	<b>572.995</b>	<b>3.512.797</b>	<b>56,9 %</b>

Analogno potrebi za toplinom kreće se i iskoristivost postrojenja kroz analiziranu godinu (slika 5.4.), koja je zavisna o radu motora i parametrima rada istog. Do sada, u 2019. godini radni parametri su bolji u odnosu na analiziranu proteklu godinu. Radno iskustvo tj. vođenje pogona je od iznimne važnosti za postizanje rezultata te ako se nastavi s odličnim pristupom, kao do sad, predviđaju se bolji rezultati, a time i poslovanje što je i opisano u sljedećem poglavlju za 2018. godinu.

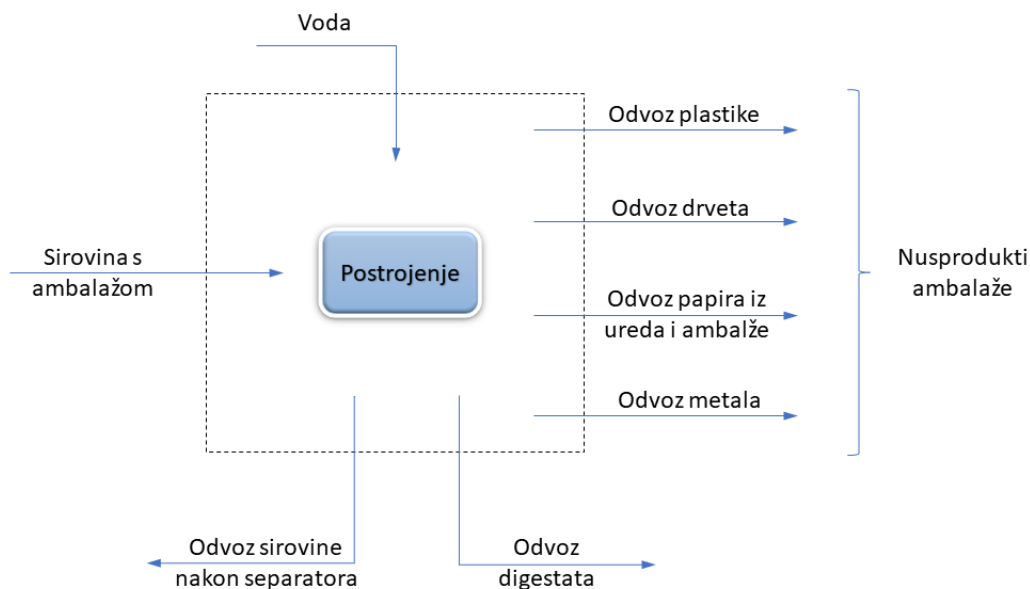


Slika 5.4. Ukupna iskoristivost bioplinskog postrojenja za 2018. godinu



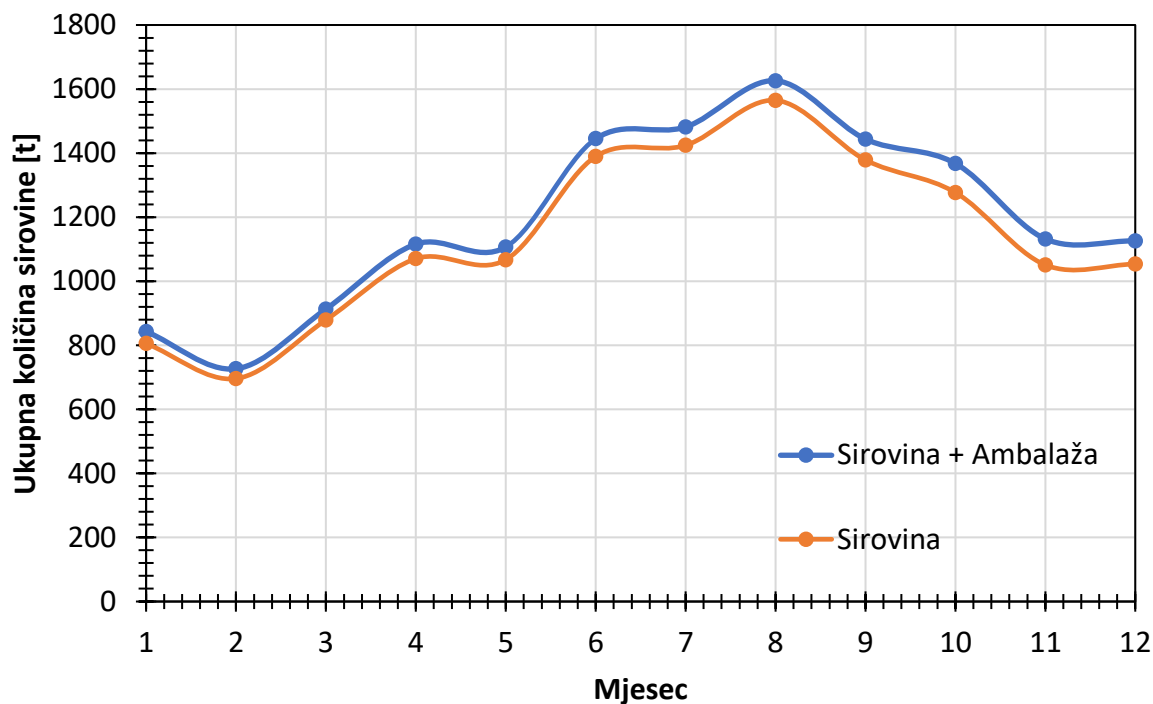
## 6. MASENA BILANCA BIOPLINSKOG POSTROJENJA

Masena bilanca obuhvaća ulaz i izlaz sve sirovine (uključujući zbrinjavanje plastike, papira, metala, drva od ambalaže i sirovine nakon separatora), te isto tako zbrinjavanje digestata iz post-fermentora. Sljedećom slikom su prikazani svi tokovi sirovine uključujući i potrošnu vodu.



**Slika 6.1. Maseni tokovi postrojenja**

U masenoj bilanci samo sirovina s ambalažom i voda predstavljaju ulazne veličine u postrojenje dok ostale prikazane slikom 6.1. predstavljaju izlazne veličine. Način ulaza sirovine je detaljnije opisan u poglavlju 3.1., a u nastavku su prikazane količine sirovine uključujući ambalažu (plava linija) i količinu sirovine umanjenu za iznos miješanog otpada od ambalaže (narančasta linija), dok razlika predstavlja količinu ambalaže. Miješani otpad od sirovine (plastika, papir, metal, drvo) zbrinjava tvrtka s kojom imaju ugovor o istom. Ukupni miješani zbrinuti otpad od ambalaže iznosio je 670,4 tone u 2018. godini.



Slika 6.2. Ulaz sirovine za referentnu godinu

Ulaz sirovine u 2018-oj godini, prosječno po mjesecu, iznosio je 1194,04 tona, odnosno prošle godine je ulaz sirovine iznosio 14.328,538 tona (uključujući ambalažu). Primjetan je porast sirovine u ljetnim mjesecima, ponajviše zbog turističke sezone, ali isto tako zbog klimatskih uvjeta tj. zahtjevnijeg skladištenja robe (hrane) u ljetnim mjesecima.

Voda se troši za potrebe procesa, higijenske i sanitarne potrebe, gdje je godišnja potrošnja iznosila 8.016 m<sup>3</sup> vode. Potrošnja vode po mjesecima prikazana je tablicom 6.1. gdje je potrošnja vode izražena u kubnim metrima, ali uz pretpostavku gustoće vode u iznosu od 1000 kg/m<sup>3</sup>, iznosi odgovaraju i masenoj količini vode.

Tablica 6.1. Potrošnja vode u 2018. godini

Mjesec	Potrošnja vode [m <sup>3</sup> ]
Siječanj	1.197
Veljača	640
Ožujak	424
Travanj	1.046

Mjesec	Potrošnja vode [m <sup>3</sup> ]
Svibanj	492
Lipanj	506
Srpanj	524
Kolovoz	653
Rujan	705
Listopad	552
Studeni	718
Prosinac	559
<b>Ukupno</b>	<b>8016</b>

Digestat se dijeli na kruti (sirovina nakon separatora) i tekući digestat iz post-fermentora. Kruti digestat kao otpad K1 kategorije zbrinjava se u kafileriji, dok se tekući digestat (bioplinsko blato) pak odvozi u postrojenje opremljeno s lagunom gdje se provodi daljnja obrada. Popis količina prikazan je sljedećom tablicom.

**Tablica 6.2. Količina krutog i tekućeg digestata**

Mjesec	Kruti digestat [t]	Tekući digestat [t]	Ukupno [t]
Siječanj	20,06	963,9	983,96
Veljača	11,76	1.284,44	1.296,2
Ožujak	8,78	1.360,94	1.369,72
Travanj	11,86	719,92	731,78
Svibanj	11,64	1.226,24	1.237,88
Lipanj	9,24	1.584,56	1.593,8
Srpanj	8,16	1.894,64	1.902,8
Kolovoz	10,76	1.252,86	1.263,62
Rujan	7,38	1.701,94	1.709,32

Mjesec	Kruti digestat [t]	Tekući digestat [t]	Ukupno [t]
Listopad	11,56	1.463,02	1.474,58
Studeni	13,54	1.664,02	1.677,56
Prosinac	11,28	1.345,12	1.356,4
<b>Ukupno</b>	<b>136,02</b>	<b>16.461,6</b>	<b>16.597,62</b>

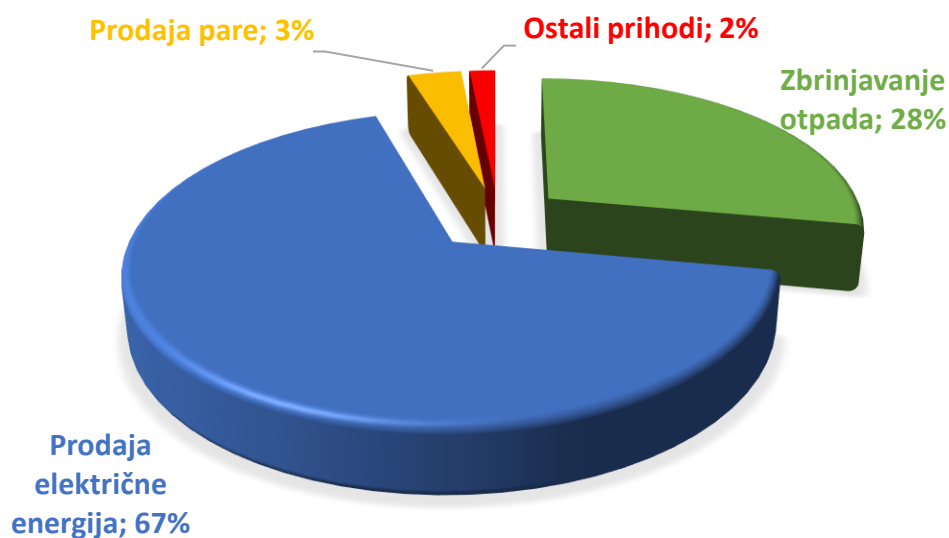
## 7. EKONOMSKA ANALIZA BIOPLINSKOG POSTROJENJA

Ekonomska analiza je također napravljena za 2018. godinu. Glavna ideja ekonomske analize je odrediti omjer prihoda i rashoda s ciljem daljnje analize, određivanja *feed-in* tarife, o kojoj će više biti riječi u nastavku.

Prodajna cijena električne energije propisana je zakonom: “Tarifni sustav za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije“ (NN 133/2013) [14]. Propisana *feed-in* tarifa za 2018. godinu je iznosila 1,25 kn/kWh, dok je u tekućoj 2019. godini iznosi 1,27 kn/kWh što je definirano korekcijom poticajnih cijena za 2019. godinu [15].

Prodaja električne energije čini 67 % svih prihoda, dok izvor ostalih prihoda dolazi iz sljedećih poslova:

- prihod od zbrinjavanja otpada,
- prihod od prodaje pare,
- prihod od pranja spremnika,
- ostali poslovni prihodi.

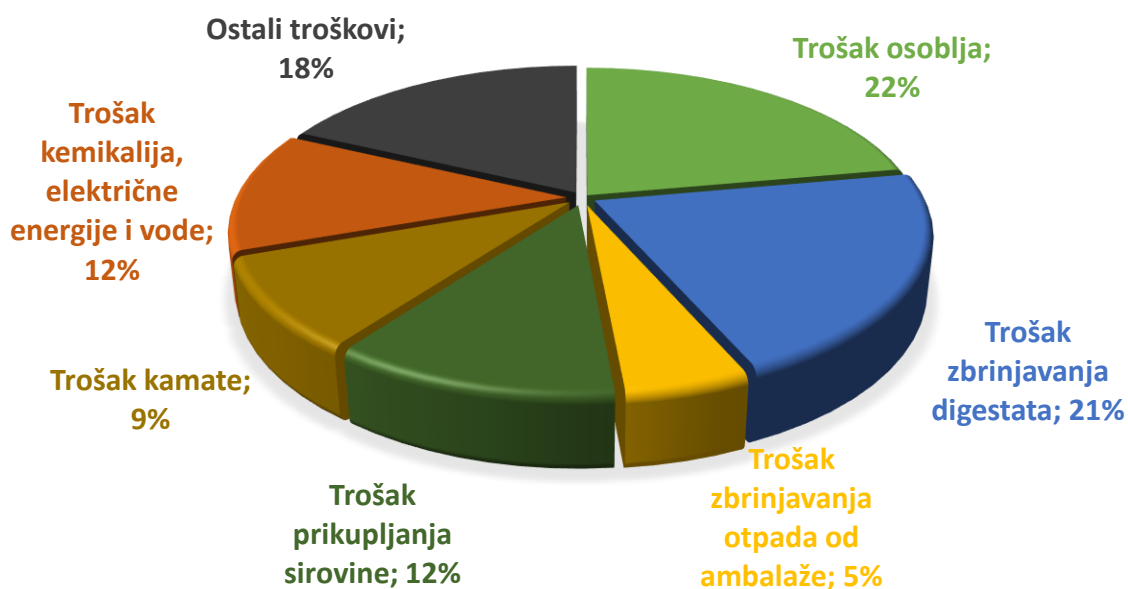


Slika 7.1. Prikaz udjela prihoda ovisno o djelatnosti

Rashodi su pak mnogobrojniji, ali za razliku od prihoda ne postoji trošak koji prevladava. Troškovi bioplinskog postrojenja su:

- troškovi osoblja,
- troškovi prikupljanja sirovine,

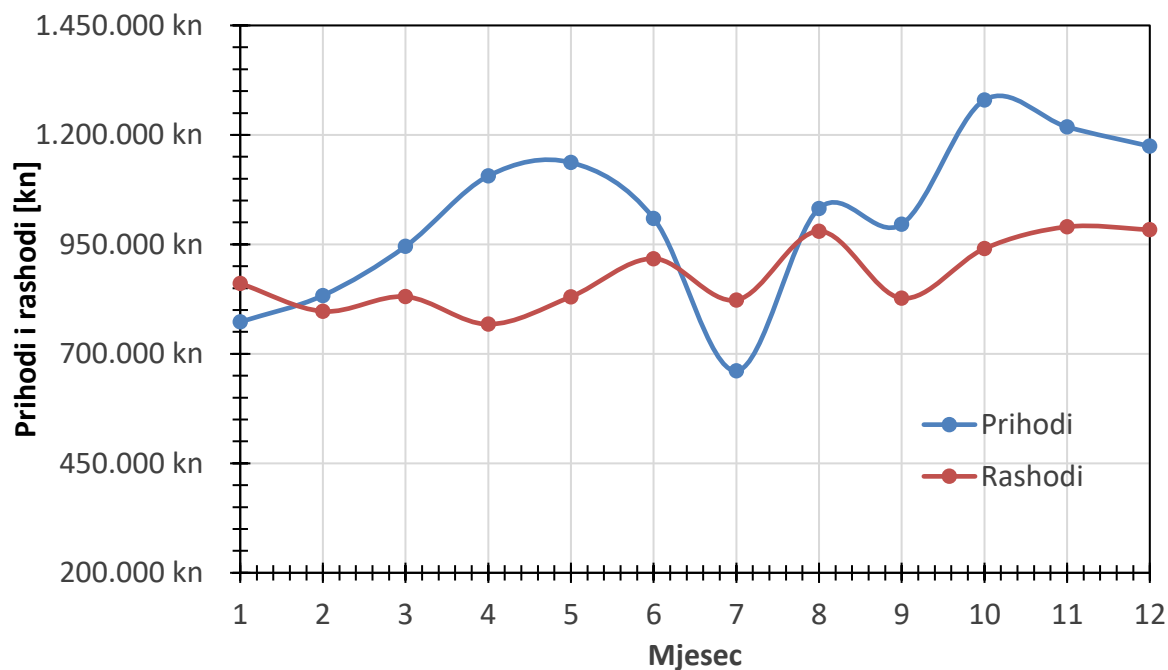
- troškovi zbrinjavanja digestata,
- troškovi zbrinjavanja otpada od ambalaže,
- troškovi kemikalija, električne energije i vode,
- trošak kamate,
- ostali troškovi.



Slika 7.2. Prikaz udjela troškova ovisno o djelatnosti

Slikom 7.3. grafički su prikazani omjeri prihoda i rashoda za pojedini mjesec u 2018. godini, dok razlika prihoda i rashoda odnosno profit/deficit prikazan je tablicom 7.1. U konačnici ukupan profit je iznosio 1.617.819,46 kuna.

U srpnju su prihodi nelogično niski zbog problema s biologijom koji su tada bili aktivni. Biologija nije mogla generirati dostatnu količinu plina odnosno plinski motor je bio daleko ispod svog prosjeka radnih sati i radne snage zbog nedostatka istog. Smanjeni radni sati plinskog motora imaju posljedično smanjenu proizvodnju električne energije i topline. Kako je spomenuto da 67 % svih prihoda predstavlja prodaja električne energije, razumljiv je i pad, koji je pak logičan rezultat lančane reakcije izazvane nestabilnostima biologije u digestoru.



Slika 7.3. Odnos prihoda i rashoda u referentnoj u 2018. godini

Tablica 7.1. Profit ili deficit po mjesecima za 2018. godinu

Mjesec	Profit/Deficit [kn]
Siječanj	- 87.895,32
Veljača	36.112,56
Ožujak	115.046,61
Travanj	338.629,91
Svibanj	306.463,08
Lipanj	91.957,59
Srpanj	- 161.761,76
Kolovoz	52.030,24
Rujan	169.067,05
Listopad	339.378,51
Studeni	228.195,5
Prosinac	190.595,49
<b>Ukupno</b>	<b>1.617.819,46</b>

## 8. ANALIZA MOGUĆNOSTI POVEĆANJA SNAGE POSTROJENJA

Zakonskim odredbama i odlukama se uvelike utjecalo na zbrinjavanje biootpada za na to predviđena mjesta. Sve djelatnosti koje svojim djelovanjem rezultiraju nastankom biootpada se prema zakonu moraju pobrinuti o zbrinjavanju istoga što ide u prilog razvoju bioplinskih postrojenja, te još važnije poticanju samoodrživosti.

### 8.1. Analiza raspoloživog biootpada od interesa za postojeće bioplinsko postrojenje

Aerobna biološka obrada biootpada odvija se na 11 kompostišta ukupnog kapaciteta oko 107.689 t/god, od kojih je najveći dio koncentriran u središnjoj i sjeverozapadnoj Hrvatskoj (podatci za 2017. godinu). Također, treba uzeti u obzir da je u 2017. godini kompostirano 39.389 tona biorazgradivog otpada, što predstavlja tek 37 % raspoloživih kapaciteta.

U istoj 2017. godini provodio se proces anaerobne biološke obrade biootpada u 25 bioplinskih postrojenja (bioplinsko postrojenje opisano u ovome radu nije još u evidenciji) ukupnog kapaciteta 1.395.809 t/god od čega se 830.093 tona/god odnosi na dozvoljeni kapacitet sukladno Zakonu o održivom gospodarenju otpadom (NN 94/13, 73/17). Također, treba napomenuti kako samo 5,6 % biootpada obrađeno na taj način (anaerobno) u odnosu na dozvoljeni kapacitet tj. 46.546 tona [16].

Ukupna količina biootpada koji nastaje u Hrvatskoj iznosi 589.608 tona. Jasno je kako predstoji veliki put pred državnim i regionalnim tijelima, koja se brinu kako o biootpadu tako i o ostalim otpadima, oko uspostave održivog plana, ali još bitnije i provedbe istog [16].

Predmetno bioplinsko postrojenje radi prvenstveno s otpadom od hrane te je kao takvo jedino u Hrvatskoj. Procjena količine otpada od hrane, temeljem raspoloživih podataka, prikazana je sljedećom tablicom.

**Tablica 8.1. Proizvedene količine otpada od hrane u Hrvatskoj za 2017. godinu [16]**

Razina prehrambenog lanca	Proizvedena količina otpada od hrane u RH u 2017. godini [kg/stanovniku]
Primarna proizvodnja	4
Prerada	9
Prodaja	3
Usluge hrane	6
Kućanstva	75



Razina prehrambenog lanca	Proizvedena količina otpada od hrane u RH u 2017. godini [kg/stanovniku]
<b>Ukupno</b>	<b>97</b>

Dakle, godišnje nastaje 399.611 tona otpada od hrane, no ukoliko se na nacionalnoj razini usvoji podatak da je na razini Europske unije moguće izbjeći 60 % otpada od hrane (239.766 tona), u konačnici bi to značilo da preostaje 159.845 tona otpada od hrane na raspolaganju [16].

Preostali iznos otpada od hrane nam daje za pravo planirati mogućnost proširenja postrojenja ili možda u skorijoj budućnosti i gradnju novih.

## 8.2. Analiza povećanje snage postojećeg bioplinskog postrojenja na 1,5 MW

Bioplinsko postrojenje zadnjih nekoliko mjeseci radi gotovo u gornjoj točki mogućega kapaciteta. Primjetno je kako na mjesečnoj razini, gledano od puštanja u pogon pa do danas, raste količina zbrinutog biootpada. Predviđanja su da će tijekom sljedeće godine doći do potkapacitiranosti postrojenja, te se iz tog razloga intenzivno raspravlja i razmišlja o širenju istog.

Površina u vlasništvu tvrtke na kojoj se nalazi predmetno bioplinsko postrojenje ima ukupnu površinu od 12.315 m<sup>2</sup>, dok 7200 m<sup>2</sup> zauzima postojeće postrojenje, pri čemu najveći dio te površine otpada na pogon, pristupne ceste i skladište, koji zajedno zauzimaju 5000 m<sup>2</sup> (slika 8.2.).



Slika 8.1. Površina predmetnog bioplinskog postrojenja

Bioplinska postrojenja su karakteristična u tome da tijekom širenja proizvodnje postoje dvije opcije, gradnja novih spremnika određenih kapaciteta ili pak zamjena postojećih većim. Isto tako treba voditi računa da se osigura potrošač dostatne snage proizvedenog plina, u ovome slučaju to je plinski motor s unutarnjim izgaranjem.

Prilikom povećanja snage ne bi se morala graditi u potpunosti nova infrastruktura nego samo određene komponente. Gotovo popunjeni kapacitet postojećih spremnika zahtijevao bi izradu novog hidroliznog spremnika, digestorskog spremnika i post-digestorskog spremnika s plinohranom. Uz spomenute spremnike, u investiciju bi se trebao uvrstiti novi Otto plinski motor ili pak sustav za pročišćivanje bioplina i injektiranje plina u plinsku mrežu, ali o tome će biti više riječi u sljedećem poglavlju.

Analogno prvotnoj investiciji za postojeće bioplinsko postrojenje određena je i investicija, za prethodno spomenute spremnike, koja bi iznosila 3.765.172 kn (507.906 €). Iznos obuhvaća cjevovode, pumpe i potrebnu armaturu, ali ne obuhvaća tehnologiju pročišćavanja plina ili plinski motor.

Cijena tehnologije pročišćavanja i plinskog motora gotovo je jednaka. Odnosno, na dostupnu tehnologiju za iskorištavanje bioplina odlazi 1/3 ukupne investicije, neovisno o odabranoj, što znači da bi za motor snage 0,5 MW investicija iznosila 6.165.976 kuna (polovica investicije tehnologije za unapređenje bioplina snage 1 MW).

## 9. ANALIZA ALTERNATIVNOG RJEŠENJA SUSTAVA

Alternativno rješenje za postojeće postrojenje krije se u postupku koji je poznat pod nazivom nadogradnja bioplina (eng. *upgrading biogas*). Nadogradnja podrazumijeva pročišćavanje bioplina do plina koji nazivamo biometan (eng. *biomethane*). Pročišćavanje podrazumijeva uklanjanje ugljikovog dioksida ( $\text{CO}_2$ ), sumporovodika ( $\text{H}_2\text{S}$ ), vode ( $\text{H}_2\text{O}$ ), kisika ( $\text{O}_2$ ) i ostalih nečistoća s ciljem povećanja energetske vrijednosti plina, koji se zatim koristi u transportu kao gorivo ili pak injektira u plinsku mrežu.

### 9.1. Analiza postojećih tehnologija

Tehnologije koje se koriste u procesu nadogradnje bioplina razvijane su i unapređivane niz godina, a rezultat su sljedeće tehnologije:

- odvajanje pomoću membrane (eng. *Membrane separation*),
- pročišćavanja pomoću vode (eng. *Water scrubbing*),
- fizičko pročišćavanje (eng. *Physical scrubbing*),
- kemijsko pročišćavanje (eng. *Chemical scrubbing*),
- tlačna adsorpcija (eng. *Pressure swing adsorption – PSA*),
- kriogeno pročišćavanje (eng. *Cryogenic treatment*).

Zajednički cilj prethodno navedenih tehnologija je postizanje visokog udjela metana uz što manje gubitke te niska potrošnja energije. U nastavku su iste opisane s ciljem upoznavanja i boljeg razumijevanja.

### 9.2. Odvajanje pomoću membrane (eng. *Membrane separation*)

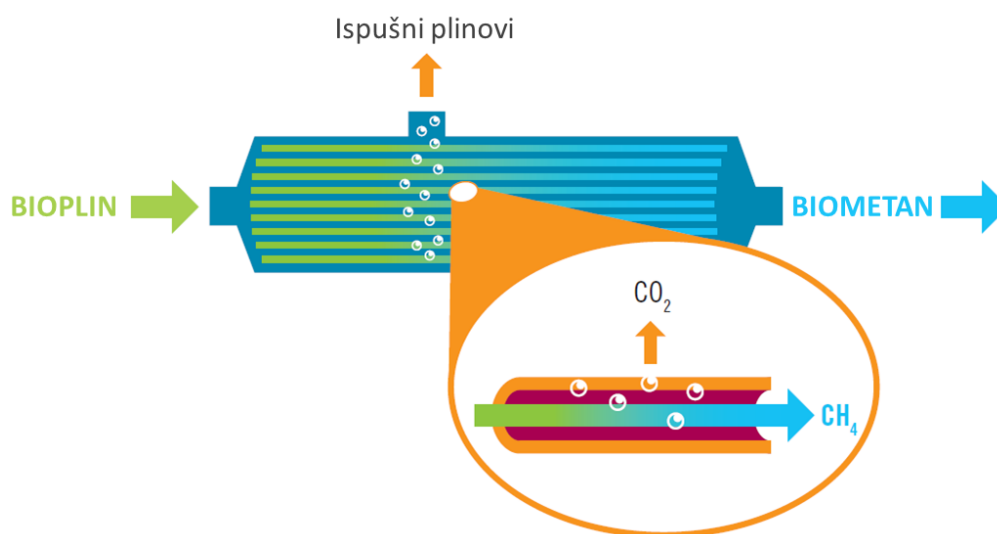
Metoda se temelji na načelu da plinovi prolaze kroz membranu pri različitim brzinama. Membrana je jako propusna za manje molekule poput  $\text{CO}_2$  i nepropusna za veće molekule kao što je  $\text{CH}_4$ . Propusnost  $\text{CO}_2$  je oko dvadeset puta veća nego  $\text{CH}_4$ .

Membrane se obično oblikuju u šuplja vlakna koja su vrlo tanka (oko 0,1 – 0,2 mikrometra), a izrađuju se od polimernih materijala. Vlakna se umeću unutar cijevi koja pak štiti membrane od savijanja i oštećenja. Tipični radni tlak je od 7 do 20 bara. Snopovi membrana se često povezuju u dva ili tri stupnja odnosno kaskadno s ciljem postizanja što veće koncentracije metana. Gubitci metana procesom se kreću u rasponu od 0,5 do 2 %. Gubitci metana se odnose

na onu količinu metana koja prođe kroz membranu i završi u ispušnim plinovima zajedno s ugljikovim dioksidom. Kako bi se spriječilo ispuštanje metana ( $GWP = 24$ ) u atmosferu, u pojedinim zemljama (koje podliježu regulativama o zaštiti okoliša) instalira se plinski plamenik gdje ispušni plinovi izgaraju i mijenjaju kemijski sastav prije ispuštanja u atmosferu. Sljedećom tablicom su prikazane prednosti i mane ove tehnologije, a slikom 9.1 i princip rada istog [17].

**Tablica 9.1. Prednosti i nedostaci odvajanja pomoću membrana [17]**

Prednosti	Nedostaci
Jednostavan, modularan i postojan dizajn	Potrebna el. energija od 0,18 do 0,33 kWh <sub>el</sub> /m <sup>3</sup> bioplina
Široka dostupnost	Gubitci metana od 0,5 do 2 %
Primjena i za manje protoke	Ograničeno iskustvo u primjeni
Preporučuje se plinski plamenik (u pojedinim zemljama)	

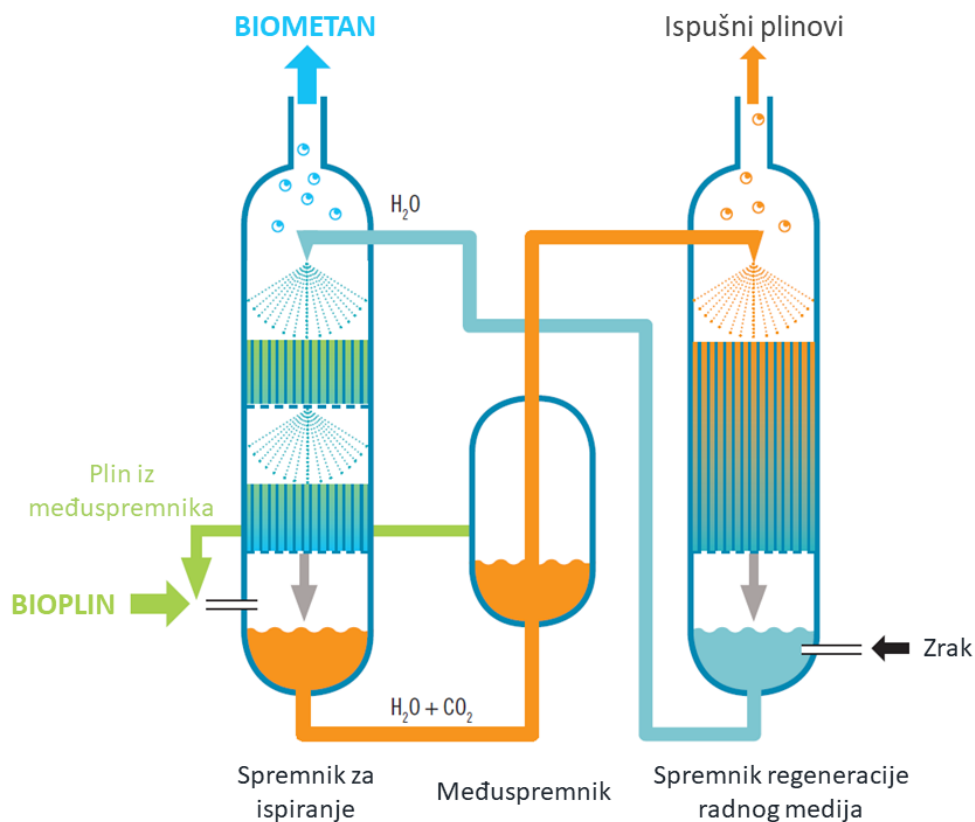


**Slika 9.1. Prikaz rada procesa pročišćavanja plina pomoću membrana [17].**

### 9.3. Tehnologija pročišćavanja plina pomoću radnog medija (eng. *Scrubbing*)

Tehnologije pročišćavanja obuhvaćaju pročišćavanja pomoću vode, kemijsko i fizičko pročišćavanje. Tehnologija se zasniva na svojstvu plinova da su različiti plinovi topljivi u različitim tekućinama pri različitim temperaturama. Shematski prikaz procesa prikazan je

slikom 9.2. Proces je univerzalan za sve podgrupe, dok se jedino razlikuju ovisno o radnom mediju.



**Slika 9.2 Shema tehnologije pročišćavanja pomoću radog medija [17].**

U spremniku za pročišćavanje bioplina (spremnik za ispiranje), bioplin se upuhuje odozdo dok se voda ili drugi radni medij (ovisno o tehnologiji) raspršuje kao maglica s ciljem postizanja što veće prijelazne površine. Medij se prska u nekoliko razina, obično dvije, s ciljem što bolje čistoće biometana. Ovim postupkom se ostvari čistoća metana od 90 do 99 % ovisno o dizajnu i izvedbi procesa.

Krug medija (vode), u kojemu se nalazi otopljeni  $\text{CO}_2$  i male količine drugih plinskih komponenti bioplina (npr.  $\text{H}_2\text{S}$  i  $\text{NH}_3$ ), skupljaju se na dnu stupca te zatim kreću u obnovu. U međuspremniku se ispuštaju određeni udjeli metana koji se zatim vraća u spremnik za ispiranje, kako bi se povećala efikasnost procesa. U spremniku ispiranja radnog medija se pročišćava odnosno regenerira radni medij pomoću zraka. Radni medij se zatim ponovno koristi u procesu, a ispušni plinovi se ispuštaju u okolinu nakon izgaranja u plinskom plameniku.

Ulasku bioplina u spremnik za ispiranje prethodi kompresija uslijed koje raste temperatura. Kako bi se pospješilo otapanje neželjenih komponenti iz bioplina potrebno ga je ohladiti.

Toplina se zatim može koristiti za vlastite potrebe pogona, a temperatura u spremniku za ispiranje bioplina se kreće između 15 i 20 °C.

Važno je napomenuti kako propisi strogo zabranjuju ispuštanje metana u atmosferu, te iz tog razloga svi tlačni uređaji za ispiranje pod tlakom moraju biti opremljeni plamenikom za naknadno izgaranje ispušnog plina jer je nemoguće u potpunosti razdvojiti željene plinove.

Također, treba napomenuti da se opisanim procesom vrlo uspješno uklanja sumporovodik, no nakon regeneracije radnog medija on završi atmosferi, stoga se uglavnom koristi postupak odsumporavanja bioplina [17].

**Tablica 9.2. Prednosti i nedostaci tehnologije pročišćavanja bioplina pomoću vode [17]**

Prednosti	Nedostaci
Veliko iskustvo u primjeni	Potrebna el. energija od 0,2 do 0,3 kWh <sub>el</sub> /m <sup>3</sup> bioplina
Voda je sigurna, jeftina i jednostavna za rukovanje	Gubitci metana od 0,5 do 2 %
Jednostavna metoda	Tlak između 4 – 10 bara
Nije potreban vanjski izvor topline, a ujedno se može koristiti višak topline	Preporučuje se plinski plamenik (u pojedinim zemljama)

### 9.3.1. Fizičko pročišćavanje (*eng. Physical scrubbing*)

Fizičko pročišćavanje za nadogradnju bioplina, za razliku od vode, kao radnu tvar koristi glikol dietil eter, koji se komercijalno može naći pod imenom Genosorb ili Seloxol. Proces i tehnički dizajn su gotovo u potpunosti jednaki sustavu nadogradnje bioplina s vodom.

Prednost ovog radnog medija odnosno otapala je veća topljivost ugljikovog dioksida i sumpornog dioksida u usporedbi s vodom, što rezultira mogućnošću korištenja manjeg stupca ispiranja. Također, tlak se kreće od 4 do 8 bara što je isto posljedica bolje topljivosti. Niži tlak znači nižu potrošnju energije kompresora.

Naravno, takav sustav ima i mane. Plinovi se bolje otape, ali se proces regeneracije otežava jer je potrebno otapalo zagrijati na temperaturu između 40 i 80 °C. U većini slučajeva se toplina nakon plamenika troši na zagrijavanje radnog medija, a potrebno je otprilike 0,1 – 0,15 kWh<sub>topl</sub>/m<sup>3</sup> toplinske energije [17]. Popis svih prednosti i nedostataka prikazan je sljedećom tablicom.

**Tablica 9.3. Prednosti i nedostaci tehnologije pročišćavanja bioplina pomoću organskog medija [17]**

Prednosti	Nedostaci
Veća topljivost i veći kapacitet otapala za ispiranje	Potrebna el. energija od 0,23 do 0,33 kWh <sub>el</sub> /m <sup>3</sup> bioplina
Potrebna manja površina	Gubitci metana od 1 do 4 %
Biometan se suši pomoću hidrofobnog rješenja	Potrebna je toplina za regeneraciju
	Ne smije se radna tvar ispuštati u okoliš
	Preporučuje se plinski plamenik (u pojedinim zemljama)

### 9.3.2. Kemijsko pročišćavanje (eng. *Chemical scrubbing*)

Kemijsko pročišćavanje podrazumijeva primjenu vode s kemijskim aditivima: monoetanolamin (MEA), dietanolamin (DEA), metildietanolamin (MDEA) i drugi amini spojevi. Rezultat takvog radnog medija je veći kapacitet i veća selektivnost prilikom odvajanja plina, a time i veća čistoća konačnog produkta tj. biometana.

Isto tako, nije potrebno imati plinski plamenik, ali se mora provesti odsumporavanje bioplina prije procesa nadogradnje. Proces u spremniku za pročišćavanje se odvija pri okolišnom tlaku, ali pošto je plin vezan za radni medij tijekom regeneracije istog, potrebno ga je zagrijati na temperaturu od 110 do 160 °C te potom ohladiti na 40 °C prije nego li se vrati u spremnik za pročišćavanje. Dio topline se može vratiti izmjenjivačima pa koristiti za potrebe nekog od procesa [17].

**Tablica 9.4. Prednosti i nedostaci tehnologije pročišćavanja bioplina pomoću kemijskog medija [17]**

Prednosti	Nedostaci
Potrebna je mala el. energija 0,06 – 0,17 kWh <sub>el</sub> /m <sup>3</sup> bioplina	Energetski intenzivna regeneracija pri visokim temperaturama
Velika sila vezanja plinova, visoki kapacitet radnog medija	Zahtjeva topl. energije 0,4 – 0,8 kWh <sub>topl</sub> /m <sup>3</sup> bioplina
Visoka selektivnost i velika čistoća metana (preko 99 %)	Otapalo se ne smije ispuštati u okoliš
Nizak gubitak metana (oko 0,1 %)	

#### 9.4. Tlačna adsorpcija (eng. *Pressure swing adsorption* - PSA)

Adsorpcijska metoda nadogradnje bioplina temelji se na principu različite površinske privlačnosti različitih komponenti plina prema različitim površinama. Dakle, različite komponente bioplina ulaze u pore različitih materijala.

Tlačna adsorpcijska metoda odvajanja koristi se već desetljećima. Prethodno je korištena u plinskoj industriji, a danas se uz određene prilagodbe, kako bi zadovoljila zahtjeve prerade bioplina, koristi kao tehnologija nadogradnje bioplina.

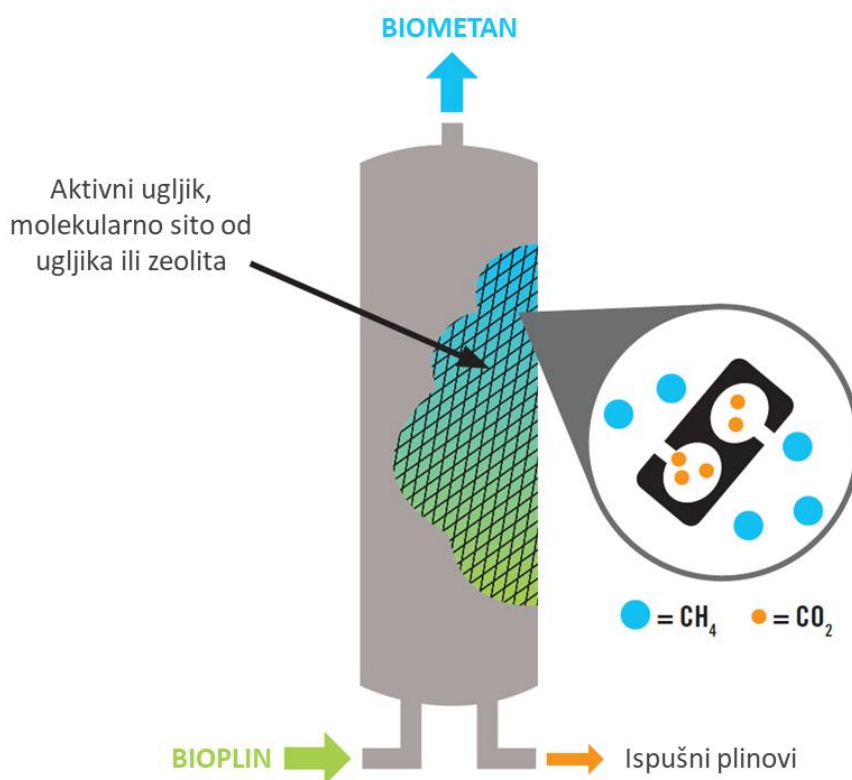
Glavna komponenta sustava je spremnik napunjen aktivnim ugljenom, zeolitskim granulama ili granulama od ugljika. Navedene supstance se ističu jer nude veliku površinu, a ujedno i potrebnu veličinu pora. Odvajanje plina provodi se kako je i opisano u nastavku.

Pročišćeni bioplin se komprimira na 2 – 7 bara. Kompresijom plina raste temperatura istog te zatim slijedi hlađenje plina (na temperaturu oko 70 °C) kako bi se poboljšala adsorpcija nečistoća. Pri tim uvjetima slijedi adsorpcija CO<sub>2</sub> koji se zarobi u porama npr. aktivnog ugljena, a CH<sub>4</sub> izlazi iz spremnika.

Na vrhu spremnika se nalazi ventil koji se potom otvara i plin odnosno biometan napušta spremnik, zatvara se ventil i dolazi do snižavanja tlaka u spremniku te uslijed toga CO<sub>2</sub> napušta pore i spremnik. Nakon tog proces se ponavlja. Također, treba napomenuti kako prije procesa treba provesti uklanjanje H<sub>2</sub>S, a ispušni plinovi nakon snižavanja tlaka u spremniku se moraju spaliti zbog velikog potencijala CH<sub>4</sub> kao stakleničkog plina [17].

Shematski je prikazan proces sljedećom slikom, a tablicom 9.5. navedene prednosti i nedostaci istog.





Slika 9.3. Shema adsorpcijske tehnologije [17]

Tablica 9.5. Prednosti i nedostaci adsorpcijske tehnologije [17]

Prednosti	Nedostaci
Veliko iskustvo u primjeni	Potrebna el. energija od 0,15 do 0,35 kWh <sub>el</sub> /m <sup>3</sup> bioplina
Ne koriste se otapala	Gubici metana od 1,5 do 2,5 %
Toplina nije potrebna za regeneraciju	Visok spremnik i potreba za vrlo dobro podešenim ventilima
	Preporučuje se plinski plamenik (u pojedinim zemljama)

### 9.5. Kriogeno pročišćavanje (eng. *Cryogenic treatment*)

Uz prethodno opisane i primijenjene tehnologije u praksi, postoje i one koje su tek u razvoju te još nisu dosegle spremnost za zahtjevno tržište. Malo je dostupnih i stvarnih podataka koji su dostupni, ali osnovna načela su poznata.

Kriogena priprema biometana se zasniva na različitim temperaturama kondenzacije ili resublimacije različitih komponenti bioplina. Na primjer, CO<sub>2</sub> mijenja agregatno stanje iz plinovitog u kruto agregatno stanje (resublimacija) na -78,5 °C i 1 bar, dok CH<sub>4</sub> ne mijenja agregatno stanje odnosno ostaje u plinovitom agregatnom stanju.

Glavna prednost ovakvog pristupa krije se u mogućnosti točnog i visokopostotnog razdvajanja komponenti biometana. Dakle, CO<sub>2</sub> koji se može dobiti o obliku suhog leda je visoke čistoće (oko 98 %) te se kao takav može plasirati na tržište. Velike mogućnosti ekstrakcije ugljikovog dioksida rezultiraju visokim udjelima metana u biometanu (do 99,9 %) te možemo govoriti o čistom metanu.

Glavni nedostatak kriogene pripreme bioplina je velika potrebna energija za hlađenje. Uz to se javljaju problemi koji mogu nastati s opremom nakon smrzavanja ugljikovog dioksida npr. brtvljenje sustava u procesu hlađenja plina [17].

## 9.6. Odabir adekvatne tehnologije

Glavni parametri odabira adekvatne tehnologije su kvaliteta bioplina (sastav bioplina) i kvaliteta biometana koja se mora ostvariti. Kvaliteta biometana ovisi o primjeni istog, a ovim radom je razmatrano injektiranje u plinsku mrežu. Dakle, kvalitetu plina propisuje državni operator plinskog transportnog sustava (tvrtka Plinacro), odnosno zakon.

Sastav bioplina izmjenjenog u postrojenju dana 10.06.2019. godine ukazuju na sljedeće vrijednosti prikazane tablicom 9.6., dok je standardna kvaliteta prirodnog plina prikazana tablicom 9.7.

**Tablica 9.6. Sastav bioplina dana 10.06.2019.**

Kemijski spoj	Kemijski simbol	Udio u bioplina
Metan	CH <sub>4</sub>	60,86 %
Ugljikov dioksid	CO <sub>2</sub>	36,43 %
Sumporovodik	H <sub>2</sub> S	500 ppm
Kisik	O <sub>2</sub>	0,0 %
Ostali kemijski spojevi	H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> ,	~ 2,71 %

**Tablica 9.7. Standardna kvaliteta prirodnog plina plinske mreže [18]**

Kemijski spoj	Kemijski simbol	Udio u bioplina
Metan	CH <sub>4</sub>	85 %
Etan	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	7 %
Propan	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	6 %
Dušik	N <sub>2</sub>	3 %
Ugljikov dioksid	CO <sub>2</sub>	2,5 %
Kisik	O <sub>2</sub>	0,001 %
Sumpor ukupni	S	30 mg/m <sup>3</sup>
Sumporovodik i karbonil sulfid	H <sub>2</sub> S + COS	5 mg/m <sup>3</sup>
Merkaptani	RSH	6 mg/m <sup>3</sup>

Uz spomenute podatke, bitna je količina proizvedenog bioplina. Ukupna proizvedena količina bioplina iznosila je 2.710.454 m<sup>3</sup> ili 310 m<sup>3</sup>/h 2018. godine. Nadalje, proširenjem pogona koje je opisano prethodnim poglavljem se pretpostavlja dodatan prinos plina koji odgovara polovici iznosa sadašnjeg. U konačnici bi na raspolaganju bilo oko 450 m<sup>3</sup>/h bioplina.

Nadalje, teško je suditi koja bi tehnologija bila najadekvatnija za predmetno postrojenje, ali odabir tehnologije nam ovdje i nije prioritet, nego iznos investicije. Tehnologije koje se koriste u 90 % bioplinskih postrojenja se cjenovno razlikuju u 2 – 3 % investicije jer postoji samo desetak renomiranih tvrtki koje proizvode navedenu tehnologiju, što je olakotna okolnost tijekom procjene iste.

Usporedbom postojećeg postrojenja sa sličnima u svijetu koja imaju instaliranu tehnologiju unapređenja bioplina, pronašli smo gotovo u potpunosti slično postrojenje u Švicarskoj ("Hitachi Zosen Inova BioMethan GmbH"). Sirovina se sastoji od biootpada iz kućanstava i otpada iz kuhinja, gdje procesom anaerobne digestije ostvaruje protok bioplina od 300 m<sup>3</sup>/h. Odabrana i instalirana tehnologija, u njihovom slučaju, je pročišćavanje putem kemijskog medija (eng. *Chemical scrubbing*) te je stoga i odabrana za analizu.

Prilikom određivanja investicije, ali i pogonskih troškova koristili smo se kalkulatorom koji je i razvijen u tu svrhu od strane Tehničkog sveučilišta u Beču, u sklopu europskog projekta [19]. U kalkulator se unose ulazni podatci o sastavu i protoku bioplina te se odabire tehnologija s pripadajućom opremom. Dodatna oprema koju smo uzeli u razmatranje je:

- odsumporavanje bioplina prije unapređenja do biometana,

- niskotlačni plinski cjevovod biometana (200 metara),
- visokotlačni plinski cjevovod biometana (60 bar),
- visokotlačnu kompresiju i kompresor,
- obogaćivanje biometana propanom,
- uređaj za dodavanje mirisa plinu.

Uređaj za odsumporavanje je uključen u razmatranje i investiciju jer se pokazao potrebnim u dosadašnjem radu bioplinskog postrojenja jer ono ima problem s koncentracijom H<sub>2</sub>S u bioplina. Trenutačni cilj je održavanje koncentracija unutar dozvoljenih granica, ali i pronalazak zakonitosti kretanja koncentracije sumporovodika ovisno o promjenama ili kemijskim pripravcima koji se dodaju u proces. H<sub>2</sub>S je u propisanim koncentracijama, ali povremeno zna “skočiti“ na veće vrijednosti.

Kalkulator na osnovu prethodno navedenih veličina određuje količinu i sastav biometana i ispušnih plinova što je i prikazano slikom 9.4.

Desired methane content in biomethane [vol%]:	<input type="text" value="97.0"/>	(Standard value is 97.0)
<b>Biomethane:</b>		<b>Offgas:</b>
Volume flow [m <sup>3</sup> (STP)/h]:	<input type="text" value="278.2"/>	Volume flow [m <sup>3</sup> (STP)/h]: <input type="text" value="171.8"/>
Methane content CH <sub>4</sub> [vol%]:	<input type="text" value="97"/>	Methane content CH <sub>4</sub> [vol%]: <input type="text" value="0.06"/>
Carbon dioxide content CO <sub>2</sub> [vol%]:	<input type="text" value="2.19"/>	Carbon dioxide content CO <sub>2</sub> [vol%]: <input type="text" value="99.94"/>
Oxygen content O <sub>2</sub> [vol%]:	<input type="text" value="0.16"/>	Oxygen content O <sub>2</sub> [vol%]: <input type="text" value="0"/>
Nitrogen content N <sub>2</sub> [vol%]:	<input type="text" value="0.65"/>	Nitrogen content N <sub>2</sub> [vol%]: <input type="text" value="0"/>
Hydrogen sulphide content H <sub>2</sub> S [ppmv]:	<input type="text" value="0.47"/>	Hydrogen sulphide content H <sub>2</sub> S [ppmv]: <input type="text" value="0"/>
Upper heating value (Hs) [kWh/m <sup>3</sup> (STP)]:	<input type="text" value="10.7"/>	Upper heating value (Hs) [kWh/m <sup>3</sup> (STP)]: <input type="text" value="0.01"/>
incl. propane:	10.86	

**Slika 9.4. Protok i sastav biometana i ispušnih plinova**

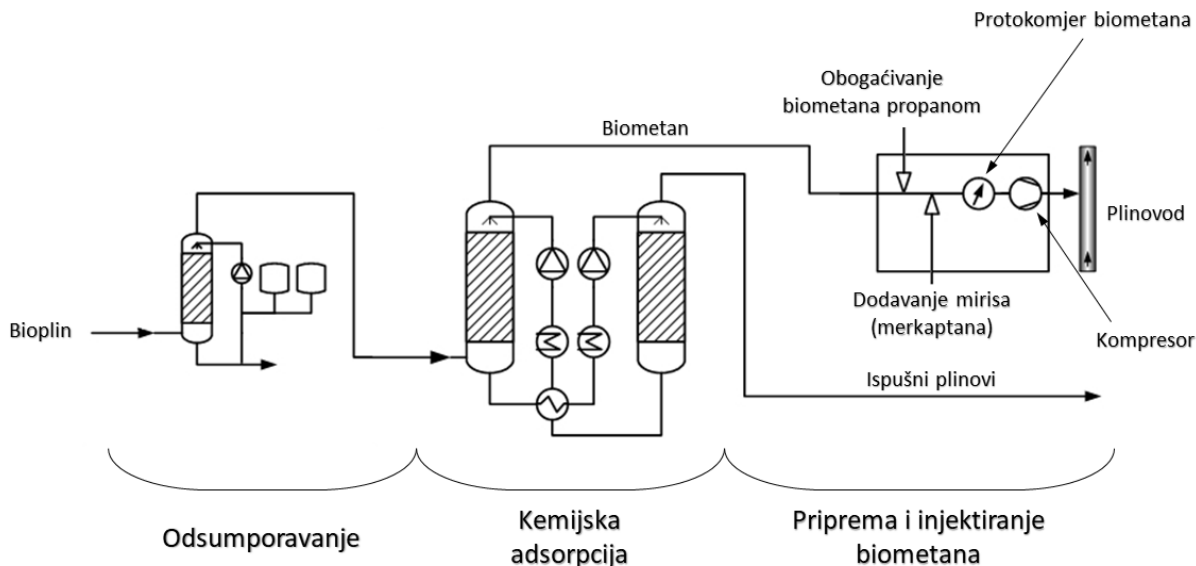
Dostupni su podatci o ukupnom godišnjem prinosu bioplina i biometana. Prinos bioplina bi iznosio oko 3.863.160 m<sup>3</sup>, dok bi prinos biometana (nakon unapređenja do 97 % udjela CH<sub>4</sub>) iznosio oko 2.388.628 m<sup>3</sup> godišnje. Pomoću programa se dolazi do spoznaje o iznosu investicije, pogonskim troškovima i troškovima održavanja, što je prikazano slikom 9.5., a slikom 9.6. prikazana je i konačna shema tehnologije unapređenja plina.

Investment costs [€]:	1.989.673	Specific costs per m <sup>3</sup> raw biogas [ct/m <sup>3</sup> (STP)]:	18.45
Annual capital costs [€/a]:	154.847	Specific costs per m <sup>3</sup> methane in raw biogas [ct/m <sup>3</sup> (STP)]:	30.75
Annual operational costs [€/a]:	332.412	Specific costs per kWh methane in raw biogas (Hs) [ct/kWh]:	2.79
Annual raw biogas costs [€/a]:	0	Specific costs per kWh methane in raw biogas (Hi) [ct/kWh]:	3.09
Annual propane costs [€/a]:	202.940	Specific costs per m <sup>3</sup> biomethane [ct/m <sup>3</sup> (STP)]:	29.84
Annual chemicals costs [€/a]:	22.512	Specific costs per m <sup>3</sup> methane in biomethane [ct/m <sup>3</sup> ]:	30.76
Annual overall costs [€/a]:	712.711	Specific costs per kWh methane in biomethane (Hs) [ct/kWh]:	2.79
		Specific costs per kWh methane in biomethane (Hi) [ct/kWh]:	3.1

NOTE: All costs contain investment and operation of heating for amine regeneration already.

### Slika 9.5. Investicijski, pogonski i troškovi održavanja tehnologije unapređenja bioplina

Investicijski troškovi bi iznosili oko 14.838.961 kn, a na pogonske troškove i troškove kemikalija godišnje bi trebalo izdvojiti oko 3.407.818 kn. S ovim podacima možemo provesti ekonomski proračun određivanja prodajne cijene biometana pri kojoj bi prihodi ostali jednaki dosadašnjima.



Slika 9.6. Shema tehnologije unapređenja bioplina

Biometan nakon procesa kemijske adsorpcije ima donju ogrjevnu vrijednost oko 9,7 kWh/m<sup>3</sup> te proces obogaćivanja biometana propanom ima za cilj povećavanje iste. Propisana donja ogrjevna vrijednost plina se kreće u intervalu od 9,25 do 11,47 kWh/m<sup>3</sup> [18] te je stoga pretpostavljeno kako obogaćivanje nije potrebno tj. analiza poticajne cijene plina ne uključuje

godišnji trošak propana. Dakle, obogaćivanje biometana propanom omogućava regulaciju energetske vrijednosti biometana prije injektiranja u plinsku mrežu, a ujedno i energetska kvalitetu plina plinske mreže ako govorimo o lokalnoj potrošnji istog.

Metan, a time i biometan, je plin bez boje i mirisa i uslijed curenja ne bi se mogao detektirati te iz tog razloga podliježe postupku dodavanja mirisa (merkaptana tj. tiola). Tioli su organski spojevi tj. sumporni analogni alkoholi. Glavno obilježje im je da su to lako hlapljive tekućine intenzivna i odbojna mirisa te se upravo iz tih razloga koriste u ovu svrhu.

Nakon procesa dodavanja mirisa slijedi proces kompresije biometana i injektiranje u plinsku mrežu.

## 10. ODREĐIVANJE POTICAJNE CIJENE BIOMETANA (*FEED-IN TARIFF*)

Određivanje poticajne cijene biometana (odnosno *feed-in* tarife) koju bi država morala plaćati da prethodno opisani sustav bude održiv podrazumijeva ostvarivanje profita koji je jednak trenutnom stanju bioplinskog postrojenja, što je i opisano poglavljem 7.

Spoznajom kako je ukupna korisnost, uključujući električnu i toplinsku energiju, plinskog motora 40,9 % razmatra se alternativa upotrebe bioplina (primarne energije). Za pretpostaviti je kako će *feed-in* tarifa u odnosu na dosadašnju *feed-in* tarifu za električnu energiju biti manja jer gubitke primarne energije mjerimo u samo nekoliko posto.

Analiza izračuna poticajne cijene biometana je provedena u odnosu na referentnu 2018. godinu i to za tri sljedeća slučaja:

- (1) instalacija sustava pročišćavanja bioplina u postojećem bioplinskom postrojenju snage 1 MW,
- (2) instalacija sustava pročišćavanja bioplina u bioplinskom postrojenju nakon povećanja kapaciteta za 50 % (1,5 MW),
- (3) Instalacija sustava pročišćavanja bioplina u bioplinskom postrojenju nakon povećanja kapaciteta za 100 % (2 MW).

Sljedećom tablicom prikazani su investicijski troškovi sustava pročišćavanja i povećanja kapaciteta, karakteristike kredita (kamatna stopa, iznos kamate) te troškovi održavanja i rada nove instalirane tehnologije.

**Tablica 10.1. Karakteristike modela analize**

	1 MW	1,5 MW	2 MW
Investicija	12.331.952 kn	18.486.844 kn	24.848.348 kn
Iznos kredita	12.500.000 kn	18.500.000 kn	25.000.000 kn
Kamatna stopa	2,4 %	2,4 %	2,4 %
Iznos godišnje kamate	150.833 kn	223.233 kn	301.666 kn
Godišnji troškovi održavanja i rada	1.951.234 kn	2.625.687 kn	3.390.321 kn
Protok bioplina	310 m <sup>3</sup> /h	450 m <sup>3</sup> /h	610 m <sup>3</sup> /h

Prethodnom tablicom su opisani svi troškovi koji se javljaju implementacijom nove tehnologije, a izračun poticajne cijene biometana nakon povećanja kapaciteta 50 % prikazan je sljedećom tablicom.

**Tablica 10.2. Izračun poticajne cijene biometana nakon povećanja kapaciteta 50 %**

Prihod/Trošak	1,5 MW
Prihod zbrinjavanja otpada, pranja spremnika i ostali prihodi	5.328.386 kn
Prihod od prodaje pare	0 kn
Prihodi od prodaje električne energije	0 kn
Prihod biometana (cijena)	?
Trošak kako je opisano 7. poglavljem	11.155.539 kn
Trošak održavanja motora	0 kn
Amortizacija	3.707.868 kn
Amortizacija nove tehnologije	2.322.901 kn
Profit u 2018. godini	1.617.819 kn

Prilikom izrade modela troškova na osnovu referentnog vodili smo se linearnim svojstvom bioplinskih postrojenja. Npr. proširimo li kapacitet određenog postrojenje za 10 % ono će rezultirati povećanjem prinosa plina od 10 %, a time i potrošnje/proizvodnje energije te u konačnici prihoda i troškova istog.

Također, treba napomenuti kako se motor u postrojenjima koji imaju mogućnost unapređivanja bioplina koristi najviše tijekom visokih cijena električne energije te na taj način ostvaruje dodatne prihode, naravno ako postrojenje sudjeluje na tržištu električne energije. Dakle, motor prvenstveno služi kao alternativa, a povremeno može i generirati prihode. Ovim modelom se često koriste bioplinska postrojenja nakon isteka povlaštenog ugovora tj. *feed-in tarife*.

Tablicom 10.2. su prikazani modelirani prihodi i troškovi bioplinskog postrojenja u 2018. godini, ali umanjeni za prihode prodaje pare i električne energije i trošak održavanja motora.



Nadalje, jednostavno se dolazi do cijene bioplinskog postrojenja jer prihod biometana mora nadoknaditi deficit od 11.857.922 kn. Kako poznajemo podatke o količini biometana ( $2.388.628 \text{ m}^3$ ), donju energetska vrijednost metana ( $9,96 \text{ kWh/m}^3$ ) i udio metana u biometanu, izračun se provede do kraja i dolazi se do cijene od  $0,584 \text{ kn/m}^3$ .

Analogno prikazanom primjeru, dolazi se do cijene biometana za preostala dva modela. Cijene i uštede u odnosu na trenutnu poticajnu cijenu za električnu energiju prikazane su tablicom 10.3.

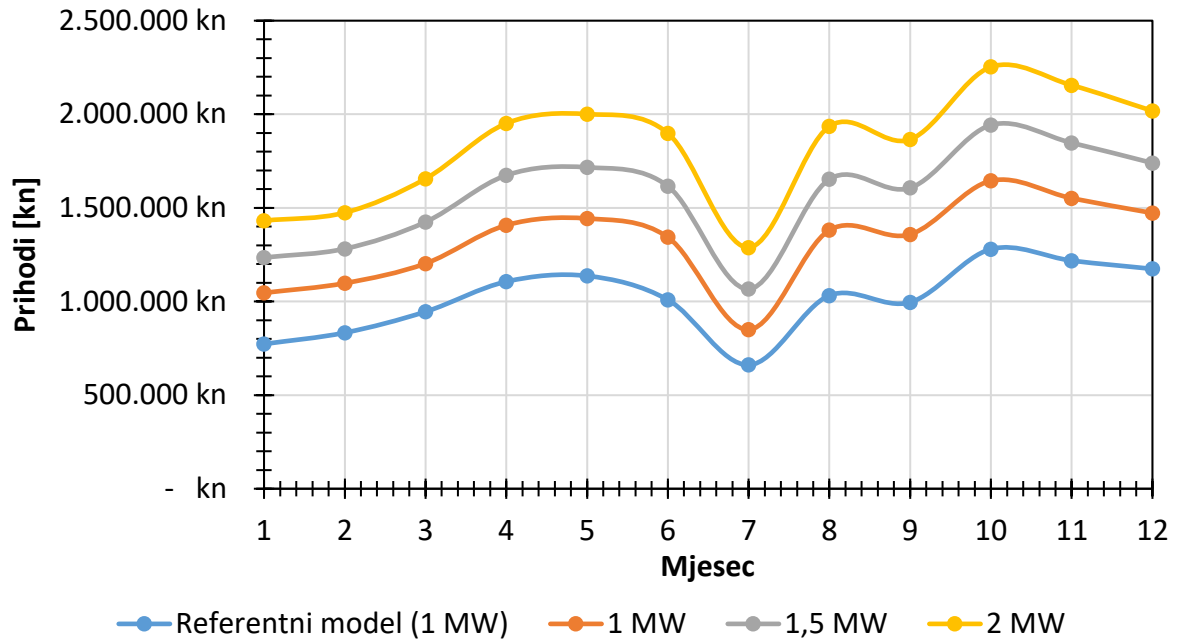
**Tablica 10.3. Prikaz određene poticajne cijene biometana i usporedba s trenutnim poticajnim cijenama za električnu energiju**

	1 MW	1,5 MW	2 MW
Poticajna cijena biometana [kn/kWh]	<b>0,794</b>	<b>0,584</b>	<b>0,475</b>
Stvarna cijena prirodnog plina [kn/kWh]	0,1985	0,1985	0,1985
Razlika poticajne i stvarne cijene plina [kn/kWh]	<b>0,5955</b>	<b>0,3855</b>	<b>0,2765</b>
Poticajna cijena električne energije [kn/kWh]	1,25	1,25	1,25
Stvarna cijena električne energije [kn/kWh]	0,37	0,37	0,37
Razlika poticajne i stvarne cijene električne energije [kn/kWh]	0,88	0,88	0,88
Ušteda prelaskom na tehnologiju unapređenja bioplina	<b>32,3 %</b>	<b>56,2 %</b>	<b>68,6 %</b>

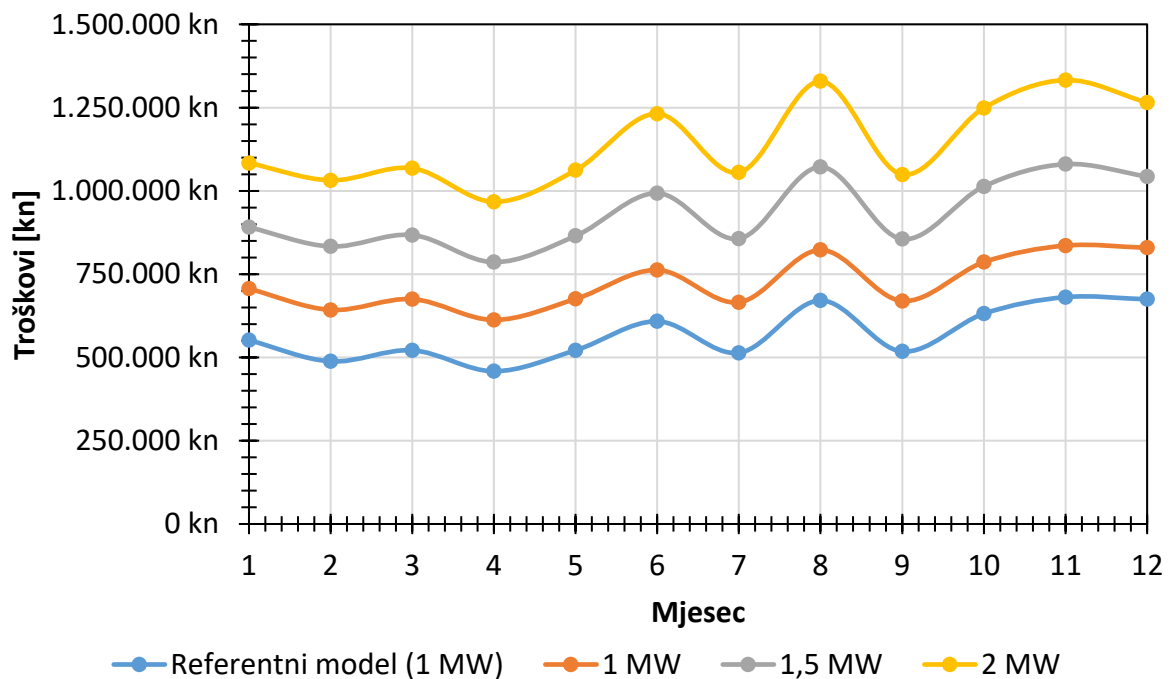
Vidljivo je kako i uz poprilično velike investicijske troškove i troškove pogona i održavanja tehnologija pročišćavanja plina ostvaruje velike uštede u smislu *feed-in tarife*. Glavni razlog tome je što tijekom procesa unapređenja bioplina nema velikih gubitaka (primarna energija ostaje gotovo jednaka). Gubi se samo 7,9 % primarne energije bioplina što znači da je iskoristivost procesa 92,1 %.

Toplina za grijanje digestora, potrebe pogona i ureda bi se osigurala hlađenjem plina tijekom procesa kemijskog pročišćavanja bioplina. Plin je potrebno hladiti za  $\Delta\theta$  od 100 do  $70^\circ\text{C}$  što na strani bioplina predstavlja toplinski kapacitet oko  $134,4 \text{ W/K}$  (za protok od  $310 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

U nastavku su prikazani odnosi prihoda, troškova te profita/deficita modela u zavisnosti o referentnom modelu. Slikom 10.1. i 10.2. je prikazana zavisnost modela troškova odnosno prihoda te je primjetna linearnost istih.

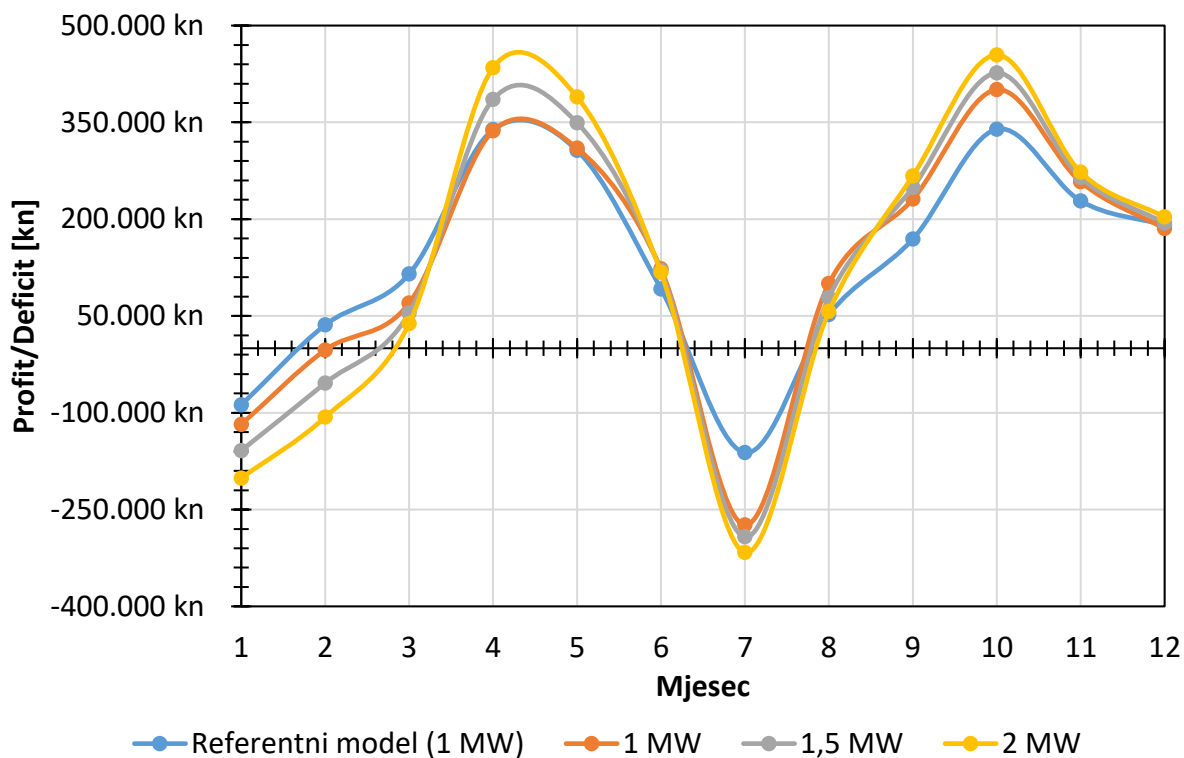


Slika 10.1. Godišnji prihodi modela



Slika 10.2. Godišnji troškovi modela

Slikom 10.3. je prikazano godišnje kretanje prihoda/deficita modela. Primjetno je kako je veći sustav (2 MW) skloniji većem deficitu npr. uslijed nepovoljnog rada pogona, ali isto tako i profitu. Dakle, veći sustavi su skloniji većim oscilacijama, ali ako sustav radi pri nazivnim parametrima rezultirat će većim prihodima i obratno.



Slika 10.3. Godišnji profit/deficit modela

Nadalje, stopa povrata (IRR) za modelirane sustave prikazana je sljedećom tablicom. Najbolja referentna točka povrata investicije u tehnologiju za unapređenje bioplina je vidljiva iz modela 1 MW jer isključuje investiciju proširenja.

Tablica 10.4. Vremenski period povrata investicije modela

	1 MW	1,5 MW	2 MW
IRR [god.]	<b>7,6</b>	<b>11,4</b>	<b>15,4</b>

## 11. ZAKLJUČAK

U radu je provedena analiza bioplinskog postrojenja u cijelosti. Provedena analiza obuhvaća:

- proces i parametre anaerobne digestije,
- opis postojećeg bioplinskog postrojenja,
- energetske i masene bilancu,
- ekonomsku analizu,
- analizu povećanja snage postrojenja,
- analizu pročišćavanja bioplina i injektiranja biometana u plinsku mrežu,
- određivanja poticajne cijene biometana (*feed-in tariff*).

Prvi dio rada je usmjeren na proces anaerobne digestije i parametara kontrole rada bioplinskog postrojenja. Daleko najvažniji parametar uz protok sirovine, temperaturu i pH vrijednost je omjer FOS/TAC jer daje procjenu procesa anaerobne digestije. FOS/TAC predstavlja omjer koncentracije hlapljivih masnih kiselina i kapaciteta međuspremnika uzorka. Vrijednost FOS/TAC se treba kretati između 0,3 i 0,4 te se regulira povećavanjem ili snižavanjem supstrata iz hidroliznog spremnika.

Energetskom bilancom dolazi se do spoznaje da je iskoristivost postrojenja 56,9 % što zadovoljava zahtjeve kogeneracijskih postrojenja. Masena bilanca obuhvaća sve masene tokove te se primjećuje konstantni porast biootpada kroz 2018., ali i kroz tekuću 2019. godinu. Analizom povećanja snage postrojenja primjetan je veliki potencijal biootpada tj. širenja postrojenja.

Ekonomska analiza provedena za 2018. godinu je ustvrdila da je tvrtka poslovala u profitu od 1.617.819,46 kuna. Porast zbrinutog biootpada daje za pravo prognozirati povećanje profita u sljedećim godinama.

Spoznajom da je iskoristivost plinskog Otto motora 40,9 %, analizirana je alternativa. Alternativa plinskom motoru je pročišćavanje bioplina i injektiranje u plinsku mrežu. Opisom dostupnih tehnologija i usporedbom istih, odabrano je kemijsko pročišćavanje bioplina (eng. *Chemical scrubbing*). Glavne prednosti su veliki udjeli metana u biometanu i velika potreba za hlađenjem tijekom procesa koja bi se koristila za potrebe postrojenja i procesa anaerobne digestije.

U konačnici, provedenom analizom poticajne cijene biometana vidljivo je kako su uštede iznimno velike. Uštede instalacijom opisane tehnologije iznose 32,3 % što odgovara cijeni od 0,794 kn/kWh biometana. Treba spomenuti kako je sestrinska tvrtka veliki potrošač prirodnog plina (20.000 m<sup>3</sup> dnevno), te ovisno o modelu, bioplinsko postrojenje bi osiguravalo od 22 % - 44 % potrebe.

Prirodni plin kao glavni energent u tranziciji energetske sustava na OIE imat će značajnu ulogu u istom. Preostaje jedino pozvati nadležne institucije kako bi definirali propise vezane uz injektiranje biometana u plinsku mrežu. Predmetno bioplinsko postrojenje voljno je razmotriti mogućnost unapređenja te čvrsto vjerujem da će doći do realizacije istog.

## LITERATURA

- [1] Energypedia: “Feed-in Tariffs (FIT)“ dostupno na: [https://energypedia.info/wiki/Feed-in\\_Tariffs\\_\(FIT\)](https://energypedia.info/wiki/Feed-in_Tariffs_(FIT)) (pristupljeno: lipanj 2019.)
- [2] Rutz, D., Mergner, R. i Janssen, R.: Održivo korištenje toplinske energije iz bioplinskih postrojenja, WIP Renewable Energies, München 2012.
- [3] Tian, D., P. Chandra, R., Lee, J. S., Lu, C. i N. Saddler, J.: A comparison of various lignin-extraction methods to enhance the accessibility and ease of enzymatic hydrolysis of the cellulosic component of steam-pretreated poplar, University of British Columbia, 2017.
- [4] Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S. i Janssen, R.: Priručnik za bioplin, WIP Renewable Energies, München 2008.
- [5] Bayer. Landesamt für Umwelt (Hrsg.): Biogashandbuch Bayern – Materialienband, Augsburg, 2007.
- [6] Huning anlagenbau, dostupno na: <https://www.huning-anlagenbau.de/39-0-Trennzerkleinerer.html> (pristupljeno: lipanj 2019.)
- [7] Stamo, dostupno na: <http://stamo.se/products/> (pristupljeno: lipanj 2019.)
- [8] Fan-separator, dostupno na: <https://www.fan-separator.de/> (pristupljeno: lipanj 2019.)
- [9] Uredba (EZ) br. 1069/2009 Europskog parlamenta i Vijeća: Utvrđivanje zdravstvenih pravila za nusproizvode životinjskog podrijetla i od njih dobivene proizvode koji nisu namijenjeni prehrani ljudi, 2009.
- [10] Uredba Komisije (EU) br. 142/2011, 2011.
- [11] Internet stranica: <https://obnovljiviizvorienergijee.weebly.com/bioplin.html> (pristupljeno: lipanj 2019.)
- [12] Jenbacher Gas Engines, dostupno na: <https://www.clarke-energy.com/gas-engines/> (pristupljeno: lipanj 2019.)
- [13] Halasz, B., Galović, A. i Boras, I.: Toplinske tablice, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2013.
- [14] Narodne novine (NN 133/2013): Tarifni sustav za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije, Zagreb 2013.
- [15] Obavijest o korekciji poticajnih cijena za 2019. godinu za Ugovore sklopljene temeljem odredbi Tarifnog sustava za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije (Narodne novine br. 133/2013, 151/2013, 20/2014, 107/2014 i 100/2015)

- [16] Hrvatska agencija za okoliš i prirodu: Unaprjeđenje sustava za prikupljanje podataka o biootpadu i otpadu od hrane, Zagreb 2018.
- [17] Wilken, D., Strippel, F., Hofmann, F. Maciejczyk, M., Klinkmüller, L., Wagner, L., Bontempo, G., Münch, J., Scheidl, S., Conton, M., Deremince, B., Walter, R., Zetsche, N. i Findeisen, C.: Biogas to Biomethane, Fachverband Biogas e. V., Njemačka 2017.
- [18] Prvo plinarsko društvo, kvaliteta plina, dostupno na: <https://www.ppd.hr/kvaliteta-plina-s85> (pristupljeno: lipanj 2019.)
- [19] Biomethane-Calculator, TU Wien, dostupno na: [http://bio.methan.at/?q=de/download\\_biomethane-calculator](http://bio.methan.at/?q=de/download_biomethane-calculator) (pristupljeno: lipanj 2019.)

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc