

# Proizvodnja bioplina iz komunalnog otpada

---

Romić, Jure

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:934648>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-25**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

# **PROIZVODNJA BIOPLINA IZ KOMUNALNOG OTPADA**

Diplomski rad

Jure Romić

N 404

Zagreb, 2023.

## PROIZVODNJA BIOPLINA IZ KOMUNALNOG OTPADA

Jure Romić

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku

Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

### Sažetak

Bioplin se iz komunalnog otpada može proizvoditi na više načina, a najčešći su proizvodnja bioplina s odlagališta komunalnog otpada te proizvodnja bioplina u anaerobnom digestoru pri čemu se kao nusprodukt dobiva digestat. Za učinkovitu proizvodnju bioplina na odlagalištima komunalnog otpada potrebna je odgovarajuća infrastruktura u obliku plinskih bušotina, horizontalnih i vertikalnih cijevi te sustava procjedne vode. Za proizvodnju bioplina u anaerobnim digestorima potrebna je hermetički zatvorena komora te anaerobni uvjeti kao i prisutnost metanogenih bakterija. Neobrađeni bioplin se koristi u pogonima za proizvodnju električne energije. Za primjenu bioplina u vozilima ili za priključak na plinsku mrežu, potrebno je obraditi bioplin u biometan. Biometan u svom sastavu ima značajnu količinu metana uz minimalnu količinu ostalih plinova.

Ključne riječi: bioplin, komunalni otpad, bioreaktor, anaerobni digestor, biometan, digestat.

Diplomski rad sadrži: 64 stranice, 2 tablice, 44 slike i 58 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Voditeljica: dr. sc. Katarina Simon, redovita profesorica RGNf-a

Suvoditeljica: dr. sc. Katarina Žbulj

Ocjenjivači: dr. sc. Katarina Simon, redovita profesorica RGNf-a

dr. sc. Karolina Novak Mavar, izvanredna profesorica RGNf-a

dr. sc. Vladislav Brkić, izvanredni profesor RGNf-a

Datum obrane: 13. listopada 2023., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

## PRODUCTION OF BIOGAS FROM MUNICIPAL WASTE

Jure Romić

Master's thesis completed at the: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

### Abstract

Biogas can be produced from municipal waste in several ways, the most common of which are the production of biogas from a municipal waste landfill and the production of biogas in an anaerobic digester, where digestate is obtained as a byproduct. For the efficient production of biogas at municipal waste disposal sites, appropriate infrastructure is needed in the form of gas wells, horizontal and vertical pipes and leachate systems. The production of biogas in anaerobic digesters requires a hermetically sealed chamber and anaerobic conditions, as well as the presence of methanogenic bacteria. Unprocessed biogas is used in plants for the production of electricity. To use biogas in vehicles or for connection to the gas network, it is necessary to process biogas into biomethane. Biomethane has a significant amount of methane in its composition with a minimal amount of other gases.

Keywords: biogas, municipal waste, bioreactor, anaerobic digester, biomethane, digestate

Thesis contains: 64 pages, 2 tables, 44 figures and 58 references

Original in: Croatian

Thesis deposited at: The Library of the Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Supervisor: Professor Katarina Simon, PhD

Developmental help: Katarina Žbulj, PhD

Reviewers: Professor Katarina Simon, PhD  
Professor Karolina Novak Mavar, PhD  
Professor Vladislav Brkić, PhD

Date of defense: October 13<sup>th</sup>, 2023, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,  
University of Zagreb

## SADRŽAJ

<b>POPIS SLIKA</b> .....	I
<b>POPIS TABLICA</b> .....	IV
<b>POPIS KORIŠTENIH KRATICA</b> .....	V
<b>POPIS KORIŠTENIH MJERNIH JEDINICA</b> .....	VI
<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. OPĆENITO O BIOPLINU</b> .....	3
<b>3. BIOPLIN S ODLAGALIŠTA KOMUNALNOG OTPADA</b> .....	7
3.1. Nastanak bioplina s odlagališta komunalnog otpada .....	7
3.2. Kretanje bioplina u odlagalištu komunalnog otpada .....	12
3.3. Podjela odlagališta komunalnog otpada .....	13
3.4. Plinske bušotine na odlagalištu komunalnog otpada .....	16
3.5. Drenažni sustav i procjedna voda .....	19
3.6. Proizvodnja bioplina na odlagalištima komunalnog otpada – primjeri .....	22
<b>4. BIOREAKTORI (ANAEROBNI DIGESTORI)</b> .....	29
4.1. Čimbenici koji utječu na proizvodnju bioplina u bioreaktorima .....	29
4.2. Podjela bioreaktora .....	33
4.3. Digestat .....	47
4.3.1. <i>Izravno gorivo</i> .....	50
4.3.2. <i>Neizravno gorivo</i> .....	52
4.3.3. <i>Ostala primjena</i> .....	54
<b>5. OBRADA BIOPLINA I BIOMETAN</b> .....	55
5.1. Izdvajanje kiselih plinova i sumpora iz bioplina .....	56
5.2. Izdvajanje vode iz bioplina (dehidracija).....	57
5.3. Biometan.....	58
<b>6. ZAKLJUČAK</b> .....	59
<b>7. LITERATURA</b> .....	60

## POPIS SLIKA

<b>Slika 2-1.</b> Shema proizvodnog procesa bioplina anaerobnom digestijom te njegova primjena.....	6
<b>Slika 3-1.</b> Dijagram ovisnosti sastava bioplina o proteklom vremenu odlaganja otpada podijeljen u faze razgradnje.....	9
<b>Slika 3-2.</b> Pojednostavljeni prikaz kretanja metana i ugljikovog dioksida na odlagalištu otpada prilikom prodiranja vode iz okoline.....	12
<b>Slika 3-3.</b> Pojednostavljena shema tipičnog postrojenja za proizvodnju bioplina s odlagališta komunalnog otpada te njegova kasnija obrada i primjena u svrhu generiranja električne energije.....	13
<b>Slika 3-4.</b> Pojednostavljeni prikaz proizvodnje bioplina s tipičnog neuređenog odlagališta komunalnog otpada.....	14
<b>Slika 3-5.</b> Bušotine za proizvodnju bioplina na neuređenom odlagalištu komunalnog otpada.....	15
<b>Slika 3-6.</b> Postavljanje geomembrane na uređeno odlagalište komunalnog otpada.....	15
<b>Slika 3-7.</b> Poprečni presjek uređenog odlagališta komunalnog otpada.....	16
<b>Slika 3-8.</b> Shematski prikaz glavnih dijelova plinske bušotine na odlagalištu komunalnog otpada.....	18
<b>Slika 3-9.</b> Bušotinska glava plinske bušotine na vrhu odlagališta komunalnog otpada.....	19
<b>Slika 3-10.</b> Prikaz odlagališta komunalnog otpada s nakošenim dnom u svrhu učinkovite drenaže.....	20
<b>Slika 3-11.</b> Prikaz protoka i kruženja procjedne vode i ostalih komponenti u sustavu procjednih voda na odlagalištu komunalnog otpada.....	21
<b>Slika 3-12.</b> Shematski prikaz horizontalnih cijevi i ostalih glavnih dijelova sustava proizvodnje bioplina na uređenom odlagalištu komunalnog otpada.....	22
<b>Slika 3-13.</b> Odlagalište komunalnog otpada Apex Regional Landfill u Las Vegasu.....	23

<b>Slika 3-14.</b> Najveća odlagališta komunalnog otpada po gradovima s obzirom na površinu.....	23
<b>Slika 3-15.</b> Satelitska fotografija odlagališta komunalnog otpada „Olusosun“ u Lagosu.....	24
<b>Slika 3-16.</b> Satelitska fotografija odlagališta komunalnog otpada „Sudokwon“ u Seulu.....	25
<b>Slika 3-17.</b> Bioelektrana „Sudokwon“ u blizini odlagališta komunalnog otpada.....	25
<b>Slika 3-18.</b> Plinska bušotina na riječkom odlagalištu otpada „Viševac“.....	26
<b>Slika 3-19.</b> Plinsko postrojenje za proizvodnju električne energije na odlagalištu komunalnog otpada „Jakuševac“.....	28
<b>Slika 4-1.</b> Dijagram ovisnosti brzine rasta metanogenih bakterija s obzirom na temperaturu.....	30
<b>Slika 4-2.</b> Grafički prikaz mogućih različitih načina anaerobne digestije u bioreктору....	32
<b>Slika 4-3.</b> Tipično kućno šaržno postrojenje za proizvodnju bioplina.....	34
<b>Slika 4-4.</b> Shematski prikaz kućnog šaržnog postrojenja za proizvodnju bioplina s dodatkom ručne miješalice za bolju homogenizaciju smijese.....	35
<b>Slika 4-5.</b> Podzemni šaržni bioreaktor.....	36
<b>Slika 4-6.</b> Podzemno šaržno postrojenje za proizvodnju bioplina s četiri komore.....	37
<b>Slika 4-7.</b> Podzemno šaržno postrojenje za proizvodnju bioplina s tri komore.....	38
<b>Slika 4-8.</b> Shematski prikaz modernog šaržnog postrojenja za proizvodnju bioplina sa svim glavnim dijelovima sustava.....	38
<b>Slika 4-9.</b> Otvor za utovar otpada na šaržnom bioplinskom postrojenju.....	39
<b>Slika 4-10.</b> Pregledni i poprečni prikaz anaerobnog digestora s čepolikim protokom i svim relevantnim dijelovima sustava.....	40
<b>Slika 4-11.</b> Shematski prikaz paralelnog spajanja anaerobnih digestora s čepolikim protokom u praksi.....	41

<b>Slika 4-12.</b> Ilustracija tipičnog anaerobnog digestora s kontinuiranim protokom i miješalicom.....	42
<b>Slika 4-13.</b> Shematski prikaz serijskog spajanja anaerobnih digestora s kontinuiranim protokom i miješalicom u praksi.....	43
<b>Slika 4-14.</b> Shematski prikaz tipičnog anaerobnog kontaktnog digestora.....	44
<b>Slika 4-15.</b> Uvećani i pojednostavljeni grafički prikaz djelovanja membrane i biofilma na proizvodnju bioplina.....	45
<b>Slika 4-16.</b> Shematski prikaz tipičnog anaerobnog digestora s pregradama s četiri komore.....	46
<b>Slika 4-17.</b> Shematski prikaz tipičnog anaerobnog digestora s pregradama s pet komora.....	46
<b>Slika 4-18.</b> Grafički prikaz širine primjene digestata.....	48
<b>Slika 4-19.</b> Digestat nakon anaerobne digestije.....	49
<b>Slika 4-20.</b> Biogorivo u obliku peleta dobiveno iz komunalnog otpada.....	51
<b>Slika 4-21.</b> Peleti dobiveni anaerobnom digestijom iz otpada namijenjeni za fertilizaciju.....	51
<b>Slika 4-22.</b> Katran kao nusprodukt.....	53
<b>Slika 4-23.</b> Biougljen.....	54
<b>Slika 5-1.</b> Grafički prikaz obrade bioplina u biometan.....	58



## POPIS TABLICA

<b>Tablica 3-1.</b> Sastav deponijskog plina.....	10
<b>Tablica 5-1.</b> Tablični prikaz sastava bioplina, biometana i prirodnog plina te volumnih udjela određenih komponenti u navedenim plinovima.....	55

## POPIS KORIŠTENIH KRATICA

EEA – Europska agencija za okoliš (engl. *European Environment Agency*)

CNG – Stlačeni prirodni plin (engl. *Compressed Natural Gas*)

LNG – Ukapljeni prirodni plin (engl. *Liquid Natural Gas*)

RNG – Obnovljivi prirodni plin (engl. *Renewable Natural Gas*)

PVC – Polivinil klorid (engl. *Polyvinyl Chloride*)

HDPE – Polietilen velike gustoće (engl. *High-density Polyethylene*)

pH – koncentracija vodikovih iona

PFR - Anaerobni digestor s čepolikim protokom (engl. *Plug Flow Reactor*)

CSTR - Bioreaktor kontinuiranog protoka s miješalicom (engl. *Continuous Flow Stirred-tank Reactor*)

MEA – Monoetanolamin

DEA – Dietanolamin

CH<sub>4</sub> – Metan

CO – Ugljikov monoksid

CO<sub>2</sub> – Ugljikov dioksid

NH<sub>3</sub> – Amonijak

O<sub>2</sub> - Kisik

N<sub>2</sub> – Dušik

H<sub>2</sub>S - Sumporovodik

## POPIS KORIŠTENIH MJERNIH JEDINICA

m – metar

cm - centimetar

°C – stupanj celzijusa

ppm – dijelova (čestica) na milijun (engl. *parts per million*)

km - kilometar

km<sup>2</sup> – kilometara kvadratnih

MW – megavat

## 1. UVOD

Energija je pokretač ljudske civilizacije. Gospodarstva svijeta ovise o količini energije koju proizvode ili uvoze, odnosno o količini energije s kojom raspolažu. Kako bi osigurali egzistenciju i napredak, ljudi su se kroz povijest oslanjali na razne izvore energije. Jedan od najvažnijih oblika energije, koji se koristi i danas, je biomasa. Izgaranjem drveta, kao široko dostupne i kalorične sirovine, ljudi su osiguravali toplinsku energiju kao i energiju za potrebe kuhanja i obrade materijala. Krajem 18. stoljeća, porast broja stanovnika i povećanje opsega sveukupne proizvodnje nagnao je stanovništvo ka pronalaženju drugog energenta. Tako se kao glavni energent u parnim tvorničkim postrojenjima počeo koristiti ugljen, a široku primjenu je pronašao i u transportu kao glavni energent za pogon parnih lokomotiva i parobroda. Daljnjim razvojem ljudskog društva povećala se potreba za pokretljivošću, a izum motora s unutrašnjim izgaranjem profilirao je naftu i naftne derivate kao strateške sirovine prvoga reda. Nafta i naftni derivati prvo su zamijenili ugljen kao pogonsko gorivo ratnih brodova, a kasnije se, s povećanjem kvalitete života i povećanom potrošnjom energije po stanovniku, primjena tekućeg fosilnog goriva proširila u sve slojeve društva. Nafta je samo jednim dijelom istisnula ugljen kao sirovinu u energetici, a daljnji napredak društva i početak upotrebe prirodnog plina kao trećeg bitnog fosilnog goriva usmjerili su infrastrukturu i gospodarstva svijeta ka korištenju fosilnih goriva kao primarnih izvora energije (Yergin, 2020).

Ubrzani razvoj društva i porast broja stanovnika rezultirali su sve većim konzumerizmom. Za prehranu stanovništva trebalo je sve više hrane životinjskog i biljnog porijekla, što je pak rezultiralo sve većom količinom otpada od uzgoja. Također, sve veći broj stanovnika proizvodio je sve više komunalnog otpada, čije je pravilno gospodarenje postao veliki problem u urbanim sredinama.

Uzimajući u obzir neobnovljivost fosilnih goriva i konstantnu potrebu za uvozom istih, većina se europskih zemalja okrenula istraživanju i primjeni obnovljivih izvora energije kako bi na taj način postigli vlastitu energetske sigurnost i neovisnost. Tranzicija energetske sustava koji je ovisan o tehnologiji primjene fosilnih goriva u energetske sustav pogonjen obnovljivim izvorima energije nije moguća u kratkom vremenskom razdoblju i pitanje je hoće li ikada biti u potpunosti ostvarena.

Rezultat svega navedenog je razvijanje tehnologije biogoriva, koja obuhvaća infrastrukturu fosilnih goriva, djelomično rješavanje problema gospodarenja otpadom te

povećanje energetske neovisnosti pojedinih zemalja na račun proizvodnje energije iz obnovljivih izvora uz smanjen ugljični otisak.

U biogoriva se ubrajaju mnoga tekuća goriva dobivena obradom biomase kao što su bioalkoholi i biodizel. Uz navedena tekuća biogoriva, iz biomase se proizvodi i bioplin. Naime, bioplin kao gorivo u plinovitom stanju djelomice može zamijeniti konvencionalni prirodni plin te na taj način povećati energetske samodostatnost uz povećanje učinkovitosti gospodarenja otpadom. Uz političku privolu krovnih međunarodnih energetskih agencija, bioplin je okarakteriziran kao zeleni, odnosno obnovljiv izvor energije. S obzirom na „zeleni“ predznak bioplina i njegovu primjenjivost, očekuje se značajno povećanje njegove proizvodnje i korištenja u Europi i svijetu.

U ovom radu bit će detaljno objašnjene opće karakteristike bioplina, način njegova nastajanja, tehnologija proizvodnje bioplina i njegovih nusprodukata, tehničke značajke dizajna reaktora za proizvodnju bioplina, obrada i pročišćavanje bioplina te njegova krajnja primjena u energetske sustavu.

## 2. OPĆENITO O BIOPLINU

Prema Europskoj agenciji za okoliš (engl., *EEA*), bioplin je definiran kao: „plin bogat metanom, koji nastaje fermentacijom životinjskog izmeta, ljudskih otpadnih voda ili ostataka usjeva u hermetički zatvorenoj komori. Koristi se kao gorivo za grijanje, pokretanje malih strojeva i za proizvodnju električne energije. Ostaci proizvodnje bioplina koriste se kao niskokvalitetno organsko gnojivo. Bioplinska goriva obično ne zagađuju atmosferu, a budući da dolaze iz obnovljivih izvora energije, imaju veliki potencijal za buduću upotrebu“ (*EEA*, 2023).

Bioplin se u prirodi pojavljuje kao „*barski plin*“, odnosno plin koji se prirodno stvara u barama, močvarama i jezerima. Močvarno tlo je porozno i natopljeno vodom te u početku vegetacija koja trune stvara barijeru i sprječava kisik da dopre do organskog materijala zarobljenog ispod. Tako se stvaraju uvjeti koji dozvoljavaju anaerobnu digestiju bilo koje biljne ili životinjske tvari, a produkt te digestije je bioplin bogat metanom koji u obliku mjehurića izlazi na površinu vode (*Anthony i Macintyre*, 2016). U prirodi se ne mogu proizvesti zadovoljavajuće količine bioplina, ali je na deponijima i u bioreaktorima to moguće.

Bioplin se proizvodi tijekom procesa anaerobne digestije te se smatra obnovljivim izvorom energije koji se može koristiti na razne načine. Lokalne zajednice i gospodarstva diljem svijeta koriste bioplin za (*EPA*, 2023):

- Pokretanje motora (uključujući i vozila na plin), proizvodnju mehaničke snage, topline i/ili električne energije (uključujući sustave kogeneracije topline i električne energije);
- Grijanje kotlova i peći, digestora i drugih prostora te za,
- Opskrbljivanje domova i radnih prostora plinom.

Kemijski sastav bioplina varira ovisno o više čimbenika, kao što su vrsta biomase (otpada) koja se koristi kao ulazna sirovina, tehnološki način i uvjeti pridobivanja bioplina. Bioplin s odlagališta komunalnog otpada i bioplin proizveden anaerobnom digestijom u bioreaktorima najčešći su načini proizvodnje bioplina u svijetu. O navedenim tehnološkim načinima pridobivanja bioplina bit će više riječi u nastavku rada.

Na koji način i koliko učinkovito se koristi bioplin ovisi o njegovoj kvaliteti. Nakon što se proizvede, bioplin je potrebno dodatno obraditi, odnosno pročistiti, što uključuje

uklanjanje ugljikovog dioksida, vode (vodena para) kao i drugih nepoželjnih komponenti obično prisutnih u tragovima. Uklanjanje ovih spojeva povećava energetska vrijednost bioplina. Prema udjelu metana, bioplin se može podijeliti na kvalitetni, tj. bioplin s većim udjelom metana i na manje kvalitetni, koji ima manji udio metana. Bioplin niske kvalitete obično se koristi u snažnijim, manje učinkovitim motorima, poput robusnih motora s unutarnjim izgaranjem. Kvalitetniji bioplin očišćen od nečistoća može se koristiti u učinkovitijim, ali i osjetljivijim motorima (EPA, 2023). Biometan koji nastaje detaljnom obradom i pročišćavanjem proizvedenog bioplina gdje je postotak metana u sastavu bioplina veći i od 94%. Postotak metana određuje ogrjevnu vrijednost plina pa je stoga plin kvalitetniji što ima veći udio metana u svom sastavu. Također, biometan zadovoljava norme i standarde za transport cjevovodima te se kao takav može transportirati kroz transportni i distributivni sustav cjevovoda prirodnog plina i koristiti u kućanstvima i poslovnim prostorima. Biometan se također može unaprijediti za proizvodnju stlačenog prirodnog plina (*engl. Compressed natural gas, CNG*) ili ukapljenog prirodnog plina (*engl. Liquid Natural Gas, LNG*) (EPA, 2023).

Primjena bioplina i biometana smanjuje emisije stakleničkih plinova kroz cijeli lanac vrijednosti, s trostrukim učinkom smanjenja emisija. Prvo, organski ostaci odlažu se u kontrolirani okoliš bioplinskih postrojenja, čime se sprječava ispuštanje emisija koje nastaju razgradnjom organske tvari u atmosferu. Drugo, proizvedeni bioplin i biometan mogu djelomice zamijeniti fosilna goriva kao izvore energije. Treće, korištenje digestata dobivenog u procesu proizvodnje bioplina kao biognojiva pomaže vraćanju organskog ugljika natrag u tlo i smanjuje potražnju za proizvodnjom mineralnih gnojiva koja sadrže ugljik (EBA, 2023).

Kogeneracijska postrojenja za proizvodnju toplinske i električne energije uobičajeni su način primjene bioplina u Europi. Takav kombinirani način proizvodnje energije je učinkovitiji nego njihova odvojena proizvodnja. Ovisno o dizajnu bioplinskih postrojenja, dio topline iz kogeneracije može se koristiti za proces anaerobne digestije postrojenja npr. ukoliko bioreaktori zahtijevaju toplinu za održavanje točno određene temperature. Proizvedena električna energija uglavnom se predaje u elektroenergetsku mrežu, dok je sav višak topline dostupan za lokalno iskorištavanje (EBA, 2023).

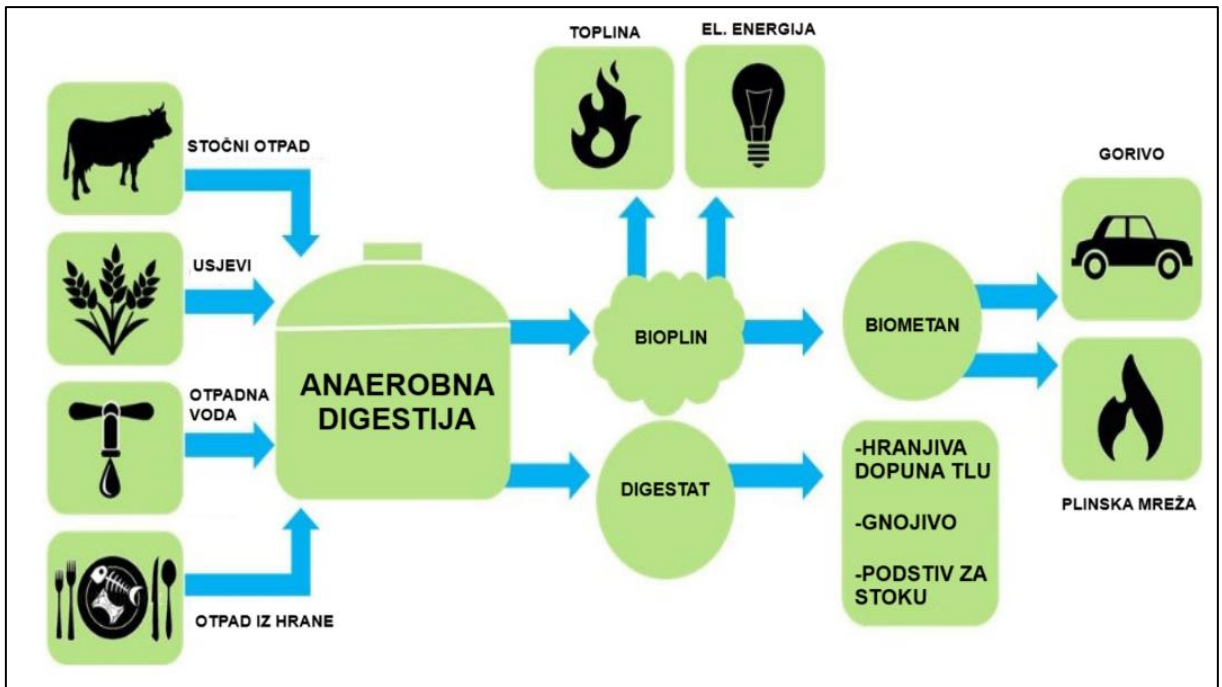
Bioplin nastaje iz različitih vrsta organskih ostataka, čime se otpad pretvara u vrijedan resurs, što je temeljni princip učinkovitog kružnog gospodarstva. Komunalni otpad, biootpad

ili otpadne vode sakupljaju se i mogu se koristiti za proizvodnju obnovljive energije, što pomaže u razvoju lokalnog gospodarstva. U ruralnim područjima se ostaci iz uzgoja domaćih životinja ili otpadna biomasa iz poljoprivrede mogu optimizirati i pretvoriti u energiju, dok se digestat može koristiti kao organsko gnojivo. To stvara dodatne poslovne modele i prilike u poljoprivrednom sektoru, čineći ga konkurentnijim i otpornijim (EBA, 2023).

Ugljikov dioksid je nusprodukt pročišćavanja bioplina u biometan. Tok ugljikovog dioksida može se valorizirati u prehrambenoj industriji ili se može koristiti za povećanje potencijala fotosinteze u staklenicima. Ovo je posljednji korak takozvanog „*kratkog ciklusa ugljika*“, procesa koji započinje korištenjem ugljika sadržanog u organskim ostacima za proizvodnju bioplina, koji se dijelom sastoji od molekula ugljika. „*Kratki ciklus ugljika*“ nastavlja se ponovnom upotrebom ugljika sadržanog u digestatu, a širenje digestata kao organskog gnojiva vraća ugljik natrag u tlo. Završetak cijelog ciklusa ugljika valorizacijom ugljičnog dioksida nakon proizvodnje biometana osigurava uklanjanje ugljika iz atmosfere (EBA, 2023).

Određene vrste organskog otpada teže se razgrađuju, odnosno digestiraju od drugih. Otpaci hrane, masti i ulja najlakši su organski otpad za razgradnju, dok je stočni otpad najteži. Miješanje više otpada u istom digestoru, što se naziva kodigestija, može pomoći u povećanju prinosa bioplina (EESI, 2017). Primjena bioplina i digestata kao nusprodukta je raznolika (Slika 2-1).





**Slika 2-1.** Shema proizvodnog procesa bioplina anaerobnom digestijom te njegova primjena (Tanigawa, 2017)

U današnjem svijetu ekološke zabrinutosti, sveobuhvatna primjena bioplina i njegova proizvodnja nudi razumno rješenje za uredno gospodarenje komunalnim otpadom, maksimalno iskorištavanje poljoprivrednih dobara te povećanje energetske efikasnosti i neovisnosti.

### 3. BIOPLIN S ODLAGALIŠTA KOMUNALNOG OTPADA

Bioplin s odlagališta komunalnog otpada je plin koji se akumulira i proizvodi na odlagalištima iz krutog komunalnog otpada. Također je poznat i kao deponijski plin, a u engleskoj literaturi kao „landfill gas“. Na odlagalištima otpada proizvodi se isti bioplin kao i u anaerobnim digestorima, odnosno odvijaju se identični procesi anaerobne digestije. Osim po obujmu i tipu otpada, značajna razlika između načina dobivanja plina je u tome što u procese na odlagalištima nisu direktno uključeni grijači, uzimači uzoraka, miješalice i ostali uređaj zbog čega je brzina digestije značajno veća u anaerobnim digestorima u odnosu na proizvodnju bioplina na odlagalištima otpada. Još jedna prednost proizvodnje bioplina u bioplinskim reaktorima je ta što proizvodnja bioplina u digestorima može trajati puno duže. Drugim riječima, dokle god se sakuplja novi otpad i odlaže ga se u digestore, proizvodnja bioplina ne prestaje, što može podrazumijevati razdoblje od čak 30 ili 40 godina. Na odlagalištima, proizvodnja bioplina prestaje u rasponu od treće do dvanaeste godine. Međutim, zbog niske cijene i nezahtjevnog održavanja, način pridobivanja bioplina s odlagališta komunalnog otpada široko je raširen diljem svijeta (ATSDR, 2001).

Primjena bioplina s odlagališta je raznolika. Nakon obrade, plin proizveden na odlagalištu otpada može se transportirati dalje u plinsku mrežu, može biti pogonsko gorivo za vozila, a može se koristiti i za lokalne potrebe generiranja električne i/ili toplinske energije.

U sastavu bioplina s odlagališta može biti prisutno više različitih plinova. Po volumnom udjelu prednjače metan (45-60%) i ugljikov dioksid (40-60%) uključujući male količinske udjele dušika, kisika, amonijaka, vodika, sumporovodika (i ostalih sulfida), ugljikovog monoksida i viših ugljikovodika kao što su trikloroetilen, benzen i vinil klorid (EPA, 2023). Sastav deponijskog plina varira od odlagališta do odlagališta, međutim te razlike su zanemarive. Jedan od glavnih razloga je globalizacija i univerzalan način gospodarenja otpadom, odnosno vrlo sličan sastav komunalnog otpada u svim dijelovima svijeta.

#### 3.1. Nastanak bioplina s odlagališta komunalnog otpada

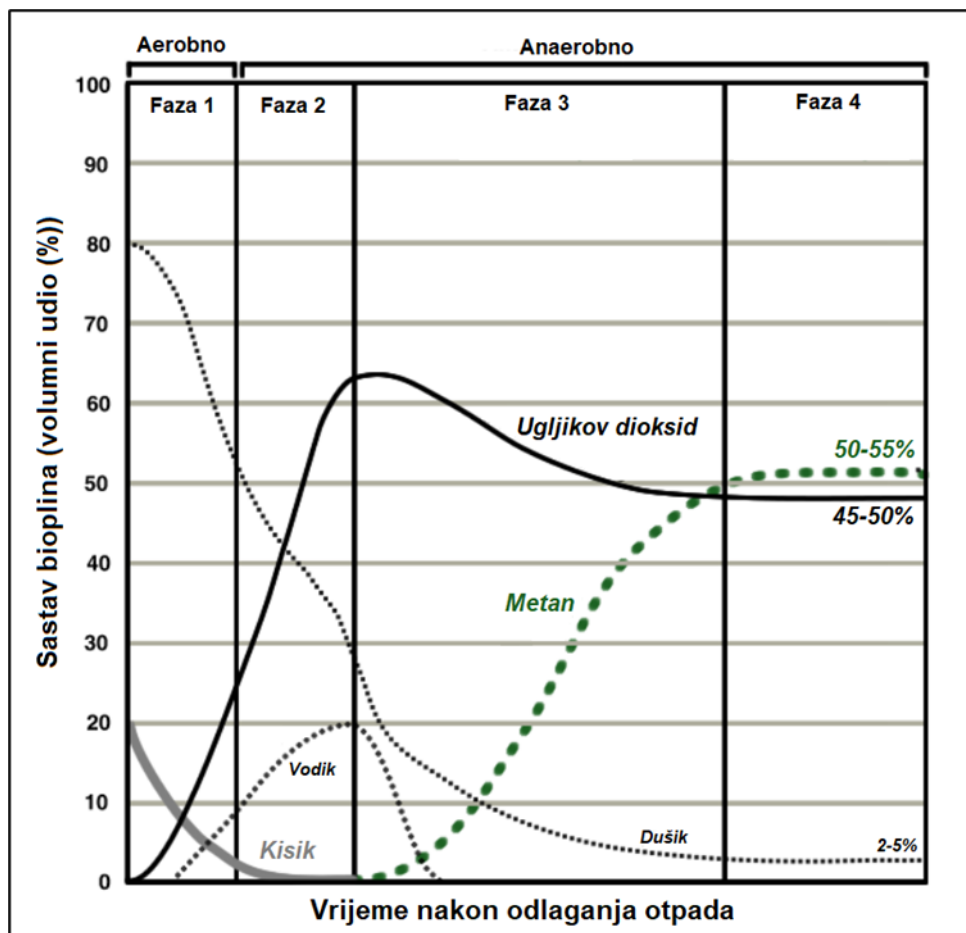
Deponijski plin nastaje na tri načina, odnosno njihovom kombinacijom.

- **Bakterijska razgradnja.** Većina plina s odlagališta otpada nastaje bakterijskom razgradnjom, koja se događa kada organski otpad razgrađuju bakterije koje su prirodno prisutne u otpadu i u tlu koje se koristi za pokrivanje odlagališta. Organski

otpad uključuje hranu, vrtni otpad, ulični otpad, tekstil te proizvode od drva i papira. Odlagališta akumuliraju otpad tijekom razdoblja od više desetaka godina, tako da otpad na odlagalištu može prolaziti kroz nekoliko faza razgradnje odjednom. To znači da bi stariji otpad na jednom dijelu istog odlagališta mogao biti u različitoj fazi razgradnje od kasnije deponiranog otpada na drugom dijelu istog odlagališta. Bakterije razgrađuju organski otpad u četiri faze, a sastav plina se mijenja tijekom svake od njih (ATSDR, 2001):

- **Faza 1.** Tijekom prve faze razgradnje, aerobne bakterije troše kisik dok razgrađuju dugačke molekularne lance složenih ugljikohidrata, proteina i lipida koji sačinjavaju organski otpad. Primarni nusprodukt ovog procesa je ugljikov dioksid. Na početku je sadržaj dušika visok, ali opada kako odlagalište prolazi kroz sve faze razgradnje. Faza 1 se nastavlja dok se ne potroši raspoloživi kisik. Može trajati danima ili mjesecima, ovisno o količini kisika koja je prisutna kada se otpad odlaže. Razine kisika variraju ovisno o stupnju sabijenosti otpada.
- **Faza 2.** Ova faza razgradnje započinje nakon što se potroši kisik na odlagalištu. Koristeći anaerobni proces, acidogene bakterije pretvaraju spojeve koje su stvorile aerobne bakterije u octenu, mliječnu i mravlju kiselinu te alkohole kao što su metanol i etanol. U ovoj fazi, kemijski gledano, odlagalište postaje vrlo kiselo. Kako se kiseline miješaju s vlagom prisutnom na odlagalištu, uzrokuju otapanje određenih hranjivih tvari, čineći dušik i fosfor dostupnima sve raznovrsnijim vrstama bakterija na odlagalištu. Plinoviti nusprodukti ovih procesa su ugljikov dioksid i vodik.
- **Faza 3.** Faza 3 započinje kada određene vrste anaerobnih bakterija, odnosno acetogene bakterije konzumiraju organske kiseline proizvedene u Fazi 2 i tvore acetat, odnosno organsku kiselinu. Posljedično nastaje neutralnije okruženje u kojem se bakterije koje proizvode metan počinju naseljavati i djelovati. Bakterije koje proizvode organsku kiselinu stvaraju spojeve koje metanogene bakterije konzumiraju.
- **Faza 4.** U Fazi 4 se nastavlja započeta razgradnja, odnosno geneza metana pomoću metanogenih bakterija, a stopa proizvodnje i akumuliranja bioplina postaje konstantna te se povećava postotak metana u bioplina.

Na Slici 3-1 prikazana je ovisnost sastava plina o vremenu proteklom nakon odlaganja otpada kroz pojedine faze razgradnje.



Slika 3-1. Dijagram ovisnosti sastava bioplina o proteklom vremenu odlaganja otpada podijeljen u faze razgradnje (EPA, 2023)

- **Isparavanje.** Bioplin s odlagališta otpada može nastati i kada određeni otpad isparava, osobito otpad s različitim i brojnim organski spojevima, odnosno kada isparavaju određeni kemijski spojevi iz krutog ili tekućeg otpada.
- **Kemijske reakcije.** Određeni spojevi unutar deponijskog plina mogu nastati reakcijama određenih kemikalija prisutnih u otpadu. Na primjer, ukoliko klorni izbjeljivač i amonijak dođu u kontakt jedan s drugim na odlagalištu, rezultat je vrlo štetan plin kloramin. U tom slučaju ne dolazi do stvaranja metana kao takvog.

U Tablici 3-1 prikazan je sastav deponijskog plina.

**Tablica 3-1.** Sastav deponijskog plina (EPA, 2023)

<b>SPOJ</b>	<b>KEMIJSKA FORMULA</b>	<b>VOLUMNI UDIO (%)</b>
<b>Metan</b>	CH <sub>4</sub>	45 - 60
<b>Ugljikov dioksid</b>	CO <sub>2</sub>	40 - 60
<b>Dušik</b>	N <sub>2</sub>	2 - 5
<b>Kisik</b>	O <sub>2</sub>	0,1 - 1
<b>Amonijak</b>	NH <sub>3</sub>	0,1 - 1
<b>C<sub>2</sub>+ (organski spojevi viši od metana)</b>	C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub> , C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl, ...	0,01 - 0,6
<b>Sumporovodik (i ostali sulfidi)</b>	H <sub>2</sub> S	0 - 1
<b>Vodik</b>	H <sub>2</sub>	0 - 0,2
<b>Ugljikov monoksid</b>	CO	0 - 0,2

Količina proizvedenog bioplina na odlagalištu, kao i brzina njegova nastanka ovise o sastavu i starosti otpada te o čimbenicima kao što su sadržaj vlage, temperatura i prisutnost kisika.

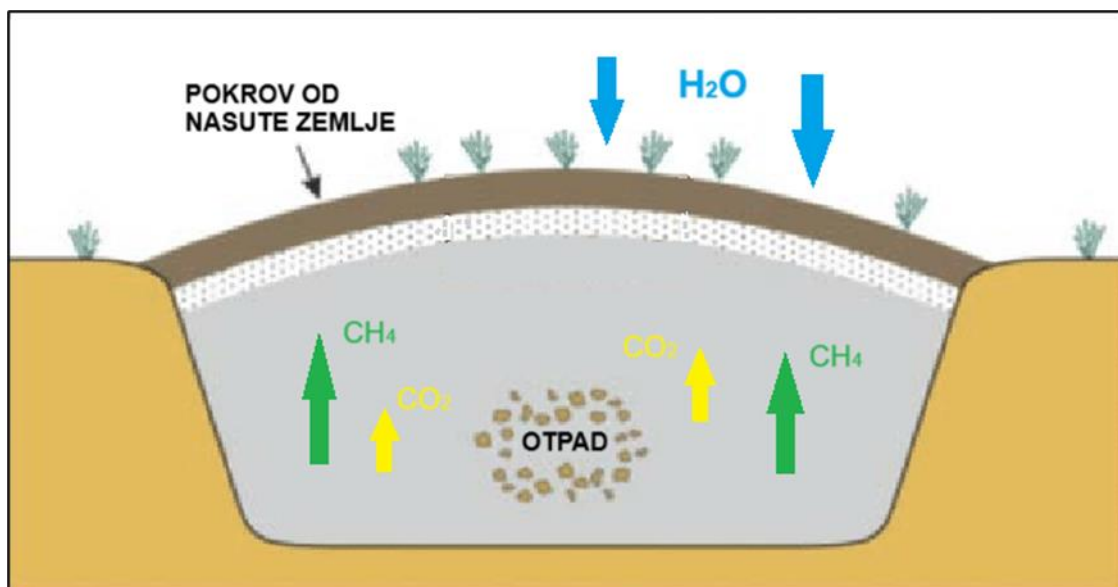
Što je više organskog otpada prisutno u komunalnom otpadu, to se više deponijskog plina proizvodi bakterijskom razgradnjom. Neke vrste organskog otpada sadrže hranjive tvari, poput natrija, kalija, kalcija i magnezija, koje pomažu razvoju bakterija. Kada su te hranjive tvari prisutne, povećava se proizvodnja odlagališnog plina. Također, neki otpad sadrži spojeve koji štete bakterijama, rezultirajući smanjenom količinom nastalog plina. Tek kada se potroši sav kisik, bakterije će početi proizvoditi metan. Što je više kisika prisutno na odlagalištu, to aerobne bakterije mogu dulje razgrađivati otpad u prvoj fazi. Ako je otpad

slabo zbijen na odlagalištu, dostupno je više kisika, tako da aerobne bakterije dulje žive i dulje proizvode ugljikov dioksid i vodu. Međutim, ako je otpad jako zbijen, proizvodnja metana započet će ranije jer su aerobne bakterije zamijenjene anaerobnim bakterijama koje proizvode metan u trećoj fazi. Anaerobne metanogene bakterije počinju proizvoditi metan tek kada aerobne bakterije potroše kisik na odlagalištu, zbog čega će preostali kisik na odlagalištu usporiti proizvodnju metana.

Prisutnost vode na odlagalištu povećava proizvodnju plina jer vlaga potiče rast bakterija te prenosi hranjive tvari i bakterije u sva područja unutar odlagališta otpada (Slika 3-2). Sadržaj vlage od 40% ili više, potiče maksimalnu proizvodnju plina. S obzirom na prisustvo vode i njen učinak poticanja stvaranja plina, zbijanje otpada usporava proizvodnju plina jer povećava gustoću sadržaja odlagališta, smanjujući stopu kojom se voda može infiltrirati u otpad. Također, stopa proizvodnje plina se povećava ako u odlagalište prodiru dodatne količine vode u obliku padalina (EPA, 2023).

Visoke temperature povećavaju aktivnost bakterija, što povećava stopu proizvodnje plina. Niže temperature inhibiraju aktivnost bakterija te ona dramatično opada ispod 10°C. Vanjske vremenske i temperaturne prilike imaju daleko veći učinak na proizvodnju bioplina u plitkim odlagalištima. To je zato što su bakterije izloženiije temperaturnim promjenama u usporedbi s dubokim odlagalištima gdje debeli sloj zemlje prekriva otpad. Zatvoreno odlagalište obično održava stabilnu temperaturu, čime se povećava proizvodnja plina. Bakterijska aktivnost oslobađa toplinu, stabilizirajući temperaturu odlagališta između 25°C i 45°C, iako su zabilježene temperature i do 70°C. Povećanje temperature također potiče isparavanje i kemijske reakcije kao dodatne načine stvaranja deponijskog plina.

Odlagališta proizvode znatne količine plina do pete godine, ali se vršna proizvodnja obično odvija između pete i sedme godine nakon odlaganja otpada. Nakon sedme godine proizvodnja bioplina počinje opadati. Različiti dijelovi odlagališta mogu biti u različitim fazama procesa razgradnje u isto vrijeme, ovisno o tome kada je otpad izvorno postavljen na određeno područje. Količina organskog materijala u otpadu važan je čimbenik u trajanju proizvodnje deponijskog plina (EPA, 2023).



**Slika 3-2.** Pojednostavljeni prikaz kretanja metana i ugljikovog dioksida na odlagalištu otpada prilikom prodiranja vode iz okoline (Robinson, 2017)

### 3.2. Kretanje bioplina u odlagalištu komunalnog otpada

Nakon što se ispod pokrovne površine odlagališta akumulira deponijski plin, kojeg većinom čini metan, gravitacijski migrira prema površini. Plinovi imaju tendenciju širenja i ispunjavanja raspoloživog prostora, tako da se kreću kroz pore unutar nakupljenog i zbijenog otpada i migriraju kroz zemlju koja pokriva odlagalište. Prirodna tendencija odlagališnih plinova koji su lakši od zraka, poput metana, je da se kreću prema gore. Vertikalna migracija može biti spriječena gusto zbijenim otpadom ili materijalom za pokrivku. Kada je vertikalna migracija onemogućena, plin ima tendenciju horizontalne migracije u druga područja unutar odlagališta ili u područja izvan odlagališta, gdje može nastaviti svoj put prema gore. U osnovi, plinovi slijede put najmanjeg otpora. Neki plinovi, poput ugljikovog dioksida, gušći su od zraka i nakupljaju se u područjima ispod površine. Tri su glavna čimbenika koji utječu na migraciju odlagališnih plinova: difuzija (koncentracija), izjednačavanje tlakova i propusnost (ATSDR, 2001):

- **Difuzija.** Difuzija je prirodna tendencija plina da postigne ujednačenu koncentraciju u određenom prostoru, bilo da se radi o zatvorenom prostoru ili Zemljinomj atmosferi. Plinovi na odlagalištu kreću se iz područja visokih koncentracija u područja nižih koncentracija plina. Budući da su koncentracije plina općenito veće na odlagalištu nego u okolnim područjima, odlagališni

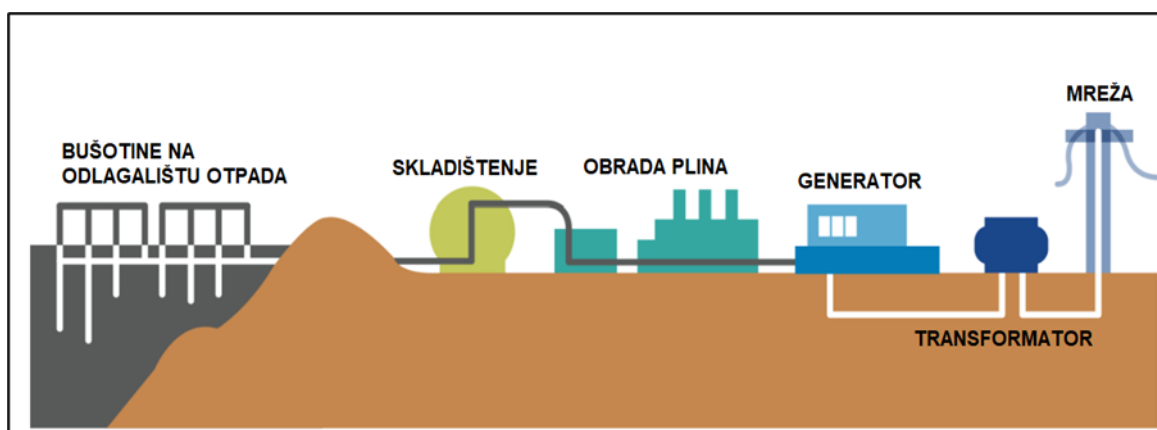
plinovi migriraju iz odlagališta u okolna područja (s nižim koncentracijama plina).

- **Izjednačavanje tlakova.** Plinovi koji se akumuliraju na odlagalištu, stvaraju područja visokog tlaka, u kojima je kretanje plina ograničeno zbijenim otpadom ili pokrovom tla i područja niskog tlaka, u kojima je kretanje plina neograničeno (atmosfera). Različite vrijednosti tlaka na prostoru cijelog odlagališta rezultiraju kretanjem plinova iz područja visokog tlaka u područja niskog tlaka. Povećanjem ukupne količine deponijskog plina, tlak u odlagalištu raste, što obično uzrokuje da tlak ispod površine odlagališta bude viši od atmosferskog tlaka. Kada je tlak u odlagalištu veći, plinovi teže migrirati u okolinu.
- **Propusnost.** Plinovi će migrirati putevima najmanjeg otpora. Propusnost je mjera koliko dobro plinovi i tekućine teku kroz povezane prostore ili pore u stijenama, tlu pa tako i otpadu. Na primjer, suha i pjeskovita tla vrlo su propusna, dok je propusnost vlažne gline puno manja. Pokrovni slojevi odlagališta često su izrađeni od materijala male propusnosti, poput gline. Stoga je vjerojatnije da će se plinovi u natkrivenom odlagalištu kretati horizontalno, a ne vertikalno.

### 3.3. Podjela odlagališta komunalnog otpada

Ovisno o načinu prikupljanja otpada i proizvodnje plina postoje dvije vrste odlagališta: neuređeno i uređeno (ZORG, 2023).

Na Slici 3-3 prikazan je pojednostavljeni primjer tipičnog postrojenja za proizvodnju bioplina s odlagališta komunalnog otpada koje može biti primijenjeno i na uređena i na neuređena odlagališta.



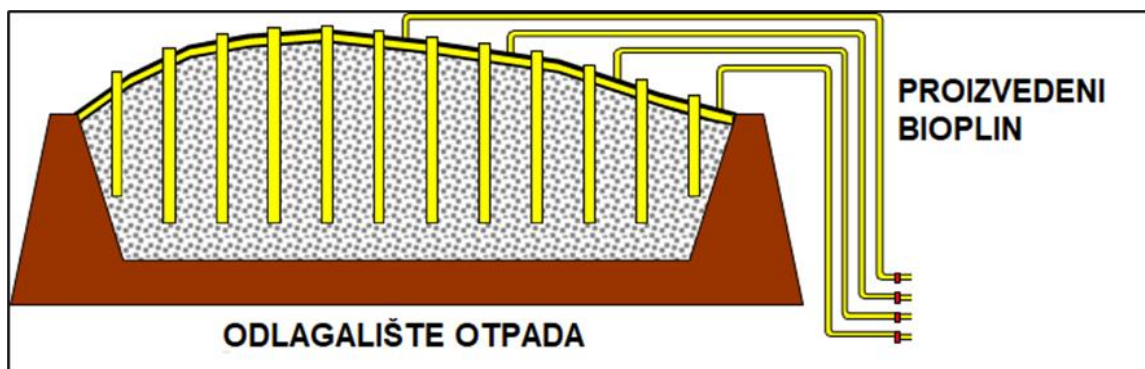
Slika 3-3. Pojednostavljena shema tipičnog postrojenja za proizvodnju bioplina s odlagališta



komunalnog otpada te njegova kasnija obrada i primjena u svrhu generiranja električne energije (Bautista i Calvimontes, 2017)

Neuređeno odlagalište najlakše je opisati kao običnu jamu, odnosno iskopani prostor kojem se akumulira komunalni otpad. Takva odlagališta najčešće nisu bila predviđena prostornim planom na mjestima na kojima se nalaze. Međutim, zbog dugogodišnje operativnosti i nedostatka alternative, i dalje akumuliraju otpad. Više je mogućih razloga zašto takva odlagališta postoje, a najčešći je nedovoljno financijskih sredstava u manje razvijenim lokalnim zajednicama zemalja u razvoju. Neuređena odlagališta postoje i operiraju i u razvijenim zemljama. Najčešći razlog tomu je ljudski i politički nemar na lokalnoj razini. Na neuređenom odlagalištu otpad se odlaže bez polaganja horizontalnih drenažnih cijevi, a često i bez geomembrana. Tek se na vrh odlagališta polaže izolator u obliku plastične folije. Kroz otpad se na udaljenosti od 15 do 25 metara buše okomite bušotine u koje se polažu uzlazne cijevi, s tim da je vrh bušotine betoniran. Raspon djelovanja bušotine trebao bi se preklapati sa zonama između bušotina. Dubina odlagališta varira od 20 do 40 metara. Bioplin se može proizvoditi samo 3 do 7 godina što je značajno manje od proizvodnje na organiziranom odlagalištu (ZORG, 2023).

Na Slici 3-4 prikazan je pojednostavljeni način pridobivanja deponijskog plina proizvodnjom iz plinskih bušotina na neuređenom odlagalištu komunalnog otpada.



**Slika 3-4.** Pojednostavljeni prikaz proizvodnje bioplina s tipičnog neuređenog odlagališta komunalnog otpada (ATSDR, 2001)

Na Slici 3-5 vidljivo je kako na neuređenom odlagalištu ne postoji pokrovni brtveni sustav već se samo postavlja geomembrana.



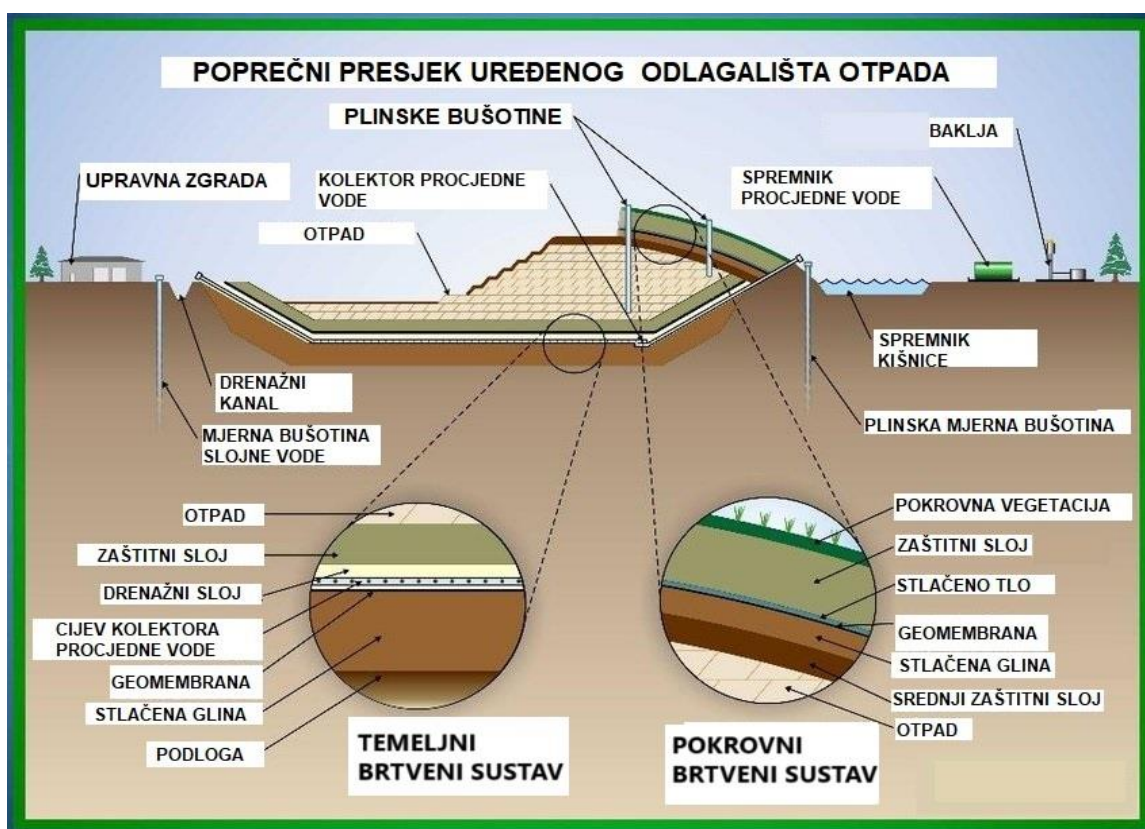
**Slika 3-5.** Bušotine za proizvodnju bioplina na neuređenom odlagalištu komunalnog otpada (ZORG, 2023)

Kod uređenog odlagališta svaki dio projekta je precizno isplaniran i doraden. Zna se dubina tijela odlagališta, vrsta otpada koja se sakuplja u određenom vremenu, izveden je temeljni brtveni sustav za postavljanje geomembrane (Slika 3-6) ili betonska izolacija koja se često koristi.



**Slika 3-6.** Postavljanje geomembrane na uređeno odlagalište komunalnog otpada (ATARFIL, 2022)

Horizontalne drenažne cijevi polažu se u korito odlagališta prilikom njegove izrade dok se vertikalne cijevi polažu prilikom postavljanja odlagališta ili se nakon nasipavanja odlagališta kroz njega izrađuju bušotine. Odlagalište je hidroizolirano sa svih strana pa tako i odozgo (Slika 3-7). U ovom slučaju nema istjecanja bioplina iz odlagališta što rezultira maksimalnim kontroliranim ispuštanjem i proizvodnjom plina. Deponije se projektiraju dovoljno duboko, od 80 do 100 metara, a otpad se prikuplja i dokumentira dnevnikom u kojem je naznačeno koji je otpad odložen na koji dio odlagališta i u koje vrijeme. Bioplin iz takvog odlagališta može se crpiti od 8 do 12 godina (ZORG, 2023).



Slika 3-7. Poprečni presjek uređenog odlagališta komunalnog otpada (Alzahrani, 2017)

### 3.4. Plinske bušotine na odlagalištu komunalnog otpada

Nastali bioplin se nakuplja unutar odlagališta i ima tendenciju migriranja prema gore, odnosno prema atmosferi. Na uređenim odlagalištima, koja su projektirana tako da je cijelo odlagalište izolirano, već spomenuto emitiranje bioplina u atmosferu je smanjeno na minimum. Međutim, i u takvim odlagalištima dolazi do određenih emisija bioplina u okolinu. Kako bi se akumulirani bioplin proizveo na učinkovit i isplativ način sa što boljim učinkom potrebno je izbušiti bušotine na samom odlagalištu komunalnog otpada.

Princip proizvodnje deponijskog plina jednak je proizvodnji prirodnog plina u konvencionalnim plinskim ležištima. Plin se proizvodi eruptivno, odnosno temeljem razlike ležišnog tlaka i tlaka u bušotini. Izradom bušotine u središnjem dijelu odlagališta stvara se zona niskog tlaka oko koje vladaju uvjeti višeg tlaka. Bioplin se kreće ka bušotini i ulazi u perforirane proizvodne uzlazne cijevi. Glavna razlika između plinske bušotine na deponiju i konvencionalne plinske bušotine je u promjeru, odnosno dubini bušotine i veličini ležišta te u materijalima koji se koriste za opremanje navedenih bušotina.

U početku su plinske bušotine na odlagalištima komunalnog otpada proizvodile bioplin da bi se spalio na baklji zbog sigurnosnih razloga, kako bi se izbjegli problemi u radu odlagališta zbog nakupljanja plina odnosno da emitirani plin ne bi negativno utjecao na ljude i okoliš. Baklja i danas postoji na svakom odlagalištu komunalnog otpada, ali većinom kao sigurnosni element u slučaju poremećaja pri proizvodnji bioplina.

Proces izrade i opremanja bušotina na odlagalištu vrlo je jednostavan. Manjim bušaćim postrojenjem, na unaprijed određenim mjestima, izradi se u masi otpada bušotina projektirane dubine. Nakon što se dosegne projektirana dubina bušotine u nju se polaže PVC (ili HDPE) cijev s prorezima.

Oko cijevi u bušotini nasipava se porozni medij, najčešće šljunak. Prostor oko bušotine se na vrhu zatvara betonom ili zbijanjem pročišćenog površinskog tla. Zatim se na PVC cijev fiksira ušće bušotine, preko kojeg se bušotina spaja na mrežu cjevovoda za deponijski plin. Nakon toga može se započeti s proizvodnjom deponijskog plina (CHAMP LANDFILL, 2016).

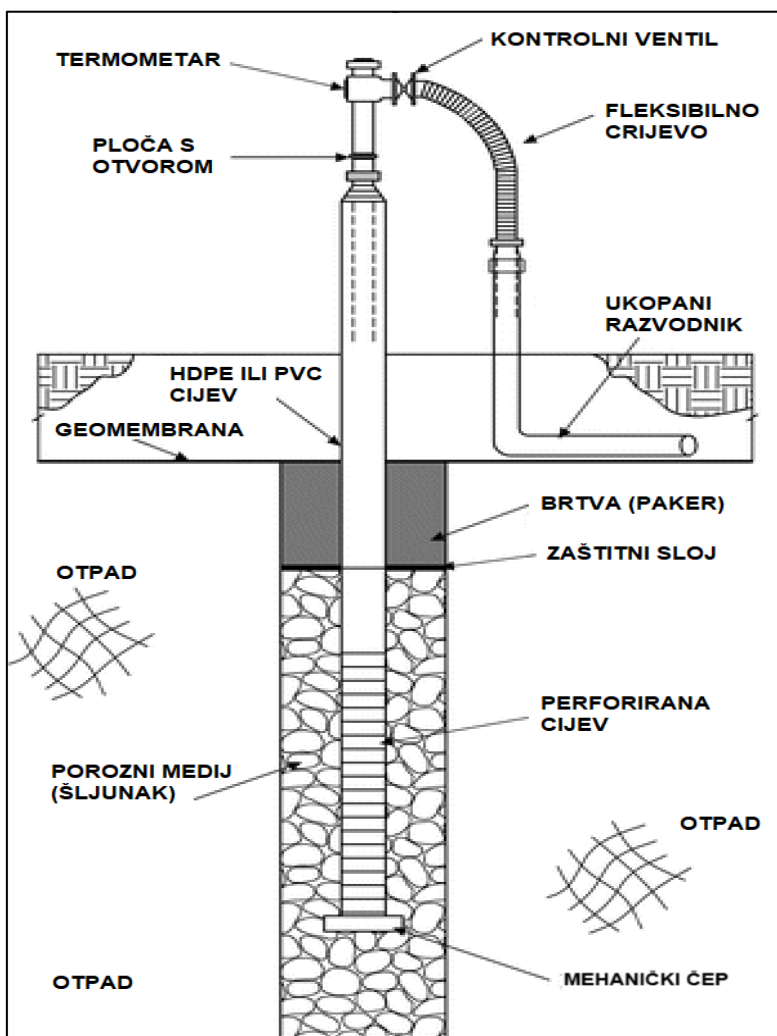
Dubina bušotina na odlagalištu komunalnog otpada ovisi o dubini samog odlagališta. Najčešće se bušotina proteže do samog dna odlagališta, samo nekoliko desetaka centimetra iznad sloja procjedne vode. Stoga uobičajena dubina bušotina varira između deset i sto metara, rijetko više od toga.

Kao što je prikazano na Slici 3-8, konstrukcija bušotine je vrlo jednostavna. Bioplin iz otpada migrira prema bušotini te prolazi kroz porozni zaštitni medij, odnosno šljunak. Zatim se plin eruptivno kreće prema površini kroz perforirane uzlazne PVC cijevi. Prostor oko uzlaznih cijevi ispod ušća bušotine je zabrtvljen pakerom i tako hermetički izoliran dio unutar bušotine te je omogućena proizvodnja plina. Paker se kod plinskih bušotina na odlagalištima komunalnog otpada, zbog male dubine bušotine, postavlja netom ispod ušća



bušotine. Kasnije se proizvedeni deponijski plin razdjelnikom usmjerava u spremnik, odnosno na daljnju obradu.

Na Slici 3-9 prikazan je izgled površinske opreme proizvodne bušotine bioplina na odlagalištu komunalnog otpada.



**Slika 3-8.** Shematski prikaz glavnih dijelova plinske bušotine na odlagalištu komunalnog otpada (Timothy et al., 2015)

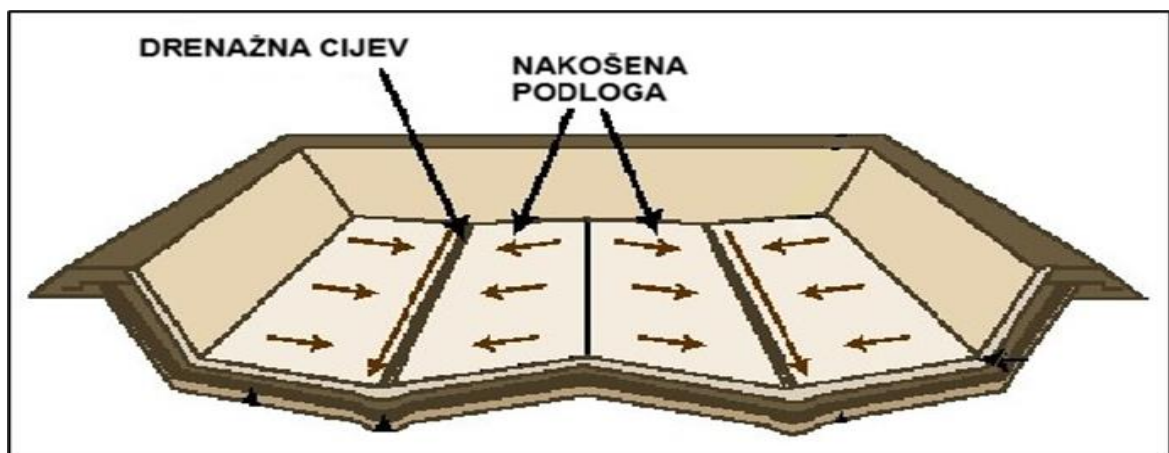


**Slika 3-9.** Bušotinska glava plinske bušotine na vrhu odlagališta komunalnog otpada (Nabavi, 2020)

### 3.5. Drenažni sustav i procjedna voda

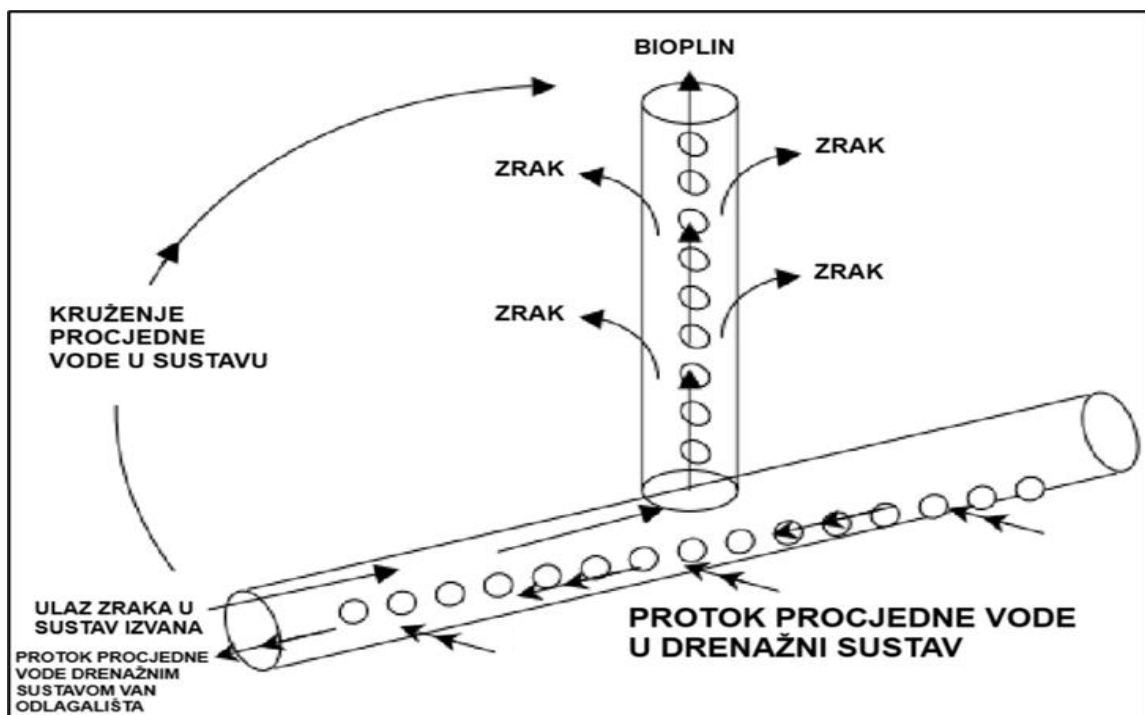
Odlagališta komunalnog otpada su pod stalnim utjecajem atmosferilija. Voda, koja u obliku kiše, snijega i ostalih padalina, natapa odlagalište, prodire u odlagalište kroz zemljani pokrov i otpad. Uz vodu koja gravitacijski migrira kroz porozni otpad, akumulira se i voda iz otpada. Miješanjem vode iz okoline i vode iz otpada nastaje procjedna voda koja se akumulira na dnu odlagališta. Sastav procjedne vode uključuje različite nečistoće među kojima je i metan koji isparava iz procjedne vode povećavajući na taj način proizvodnju bioplina na cijelom odlagalištu. Preporučena debljina sloja procjedne vode na dnu odlagališta je oko 30 cm. Ukoliko razina procjedne vode naraste iznad preporučene i dopuštene vrijednosti, dolazi do zavodnjavanja odlagališta. Pritom se zavodnjavaju i uzlazne cijevi. U takvim okolnostima, dolazi do nekontrolirane migracije bioplina kroz nanose otpada i zemljani pokrov u atmosferu. Uz već navedeni spektar kemijskih spojeva koji se nalaze u sastavu deponijskog plina prisustvo sumporovodika stvara najviše problema. Koncentracija sumporovodika u bioplinu može iznositi od 20 do 5000 ppm-a, a rekordna izmjerena koncentracija je bila čak 20 000 ppm-a. Međutim, uobičajena koncentracija sumporovodika u bioplinu iznosi od 1000 do 1850 ppm-a (ENVIRONMENTAL ENERGY RESEARCH, 2021). U takvim je slučajevima potrebna daljnja obrada kako bi navedeni bioplin bio spreman za kasniju primjenu. Metan i ugljikov dioksid zagađuju okoliš, a sumporovodik je posebno neugodan jer, uz to što je opasan za ljude i opremu, ima karakterističan, vrlo neugodan miris, koji otežava normalan život u naseljenim područjima

oko odlagališta. Da bi se spriječilo nekontrolirano akumuliranje procjedne vode, preporuča se ugradnja drenažnog sustava na dnu, odnosno sustava odvodnje procjedne vode (ZORG, 2023). Navedeni sustav se instalira na dno tijela odlagališta prije samog odlaganja (nagomilavanja) otpada. Na neuređenim odlagalištima ne postoji takav sustav, dok na uređenima postoje različiti tipovi s obzirom na razvijenost samog drenažnog sustava. Najjednostavniji sustav procjednih voda je polaganje perforiranih cijevi horizontalno na dno tijela odlagališta. U tom slučaju najčešće se dno odlagališta konstruira u obliku korita pod kutom, poput lijevka, kako bi se procjedna voda što lakše usmjerila ka drenažnim cijevima (Slika 3-10)



**Slika 3-10.** Prikaz odlagališta komunalnog otpada s nakošenim dnom u svrhu učinkovite drenaže (Querio i Nanavati, 2018)

U praksi je često i montiranje vertikalnih perforiranih cijevi povezanih s drenažnim sustavom procjedne vode. Naime, navedene vertikalne cijevi se također montiraju unaprijed, odnosno prije odlaganja otpada na odlagalište, a glavna zadaća im je dovoz zraka u sustav te kanaliziranje nastalog bioplina iz procjednih voda direktno izvan odlagališta (Slika 3-11) (Hredoy et al., 2023).



**Slika 3-11.** Prikaz protoka i kruženja procjedne vode i ostalih komponenti u sustavu procjednih voda na odlagalištu komunalnog otpada (Ramli, 2023)

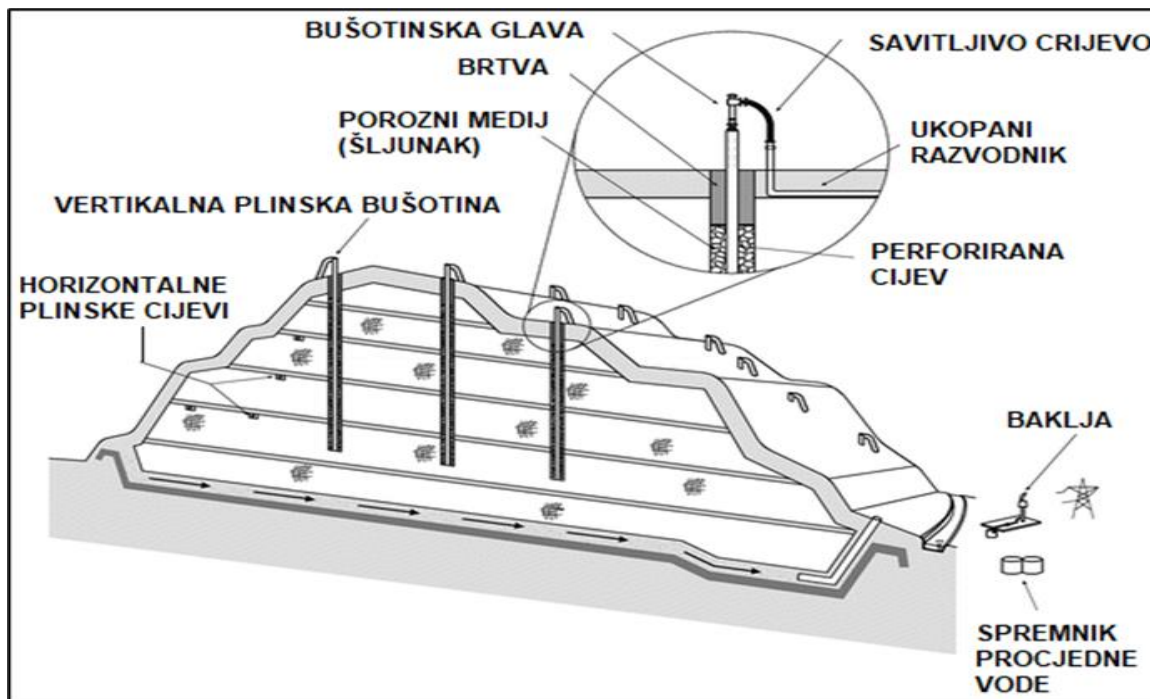
Razina procjedne vode na dnu odlagališta mora se održavati konstantnom jer optimalna količina procjedne vode na odlagalištu pospješuje nastajanje bioplina i omogućava stalnu operativnost odlagališta. Zbog različite vrste, starosti i zbijenosti otpada, razina procjedne vode se mijenja. Na tu promjenu utječu i vanjski utjecaji, odnosno količine padalina na određenom geografskom području. Stoga je ponekad potrebno drenirati, odnosno isušivati, a ponekad natapati odlagalište. Kako bi se odlagalište moglo ponovo natapati u danima suše, razvijen je sustav povrata, odnosno kruženja procjedne vode u cijelom sustavu. Upravo zato postoji spremnik procjedne vode koji akumulira i skladišti višak procjedne vode te omogućuje da se ista koristi za natapanje u danima kada je to potrebno. Cijeli drenažni sustav procjedne vode pogonjen je centrifugalnim crpkama (ZORG, 2023)

Uz plinske proizvodne bušotine, na bioplinskom postrojenju odlagališta komunalnog otpada česte su i bušotine za procjednu vodu. One služe kao utisne bušotine kako bi se bolje i preciznije regulirala razina procjedne vode na odlagalištu.

Uz vertikalne cijevi, postavljaju se i horizontalne cijevi za proizvodnju bioplina. One maksimaliziraju proizvodnju bioplina te, uz već navedene bušotine i vertikalne perforirane cijevi, doprinose većem iscrpku bioplina. Postavljaju se u slojevima na određenim dubinama



tijekom odlaganja otpada, kada se dosegne projektirana visina sloja otpada tako da se polažu na sloj otpada. Nakon toga slijedi nastavak odlaganja otpada na cijevi, sve dok se ne postigne druga visina sloja. Proces se ponavlja onoliko puta koliko je predviđeno projektom, a rezultat toga je sustav paralelnih horizontalnih perforiranih cijevi kroz cijelo odlagalište (Slika 3-12).



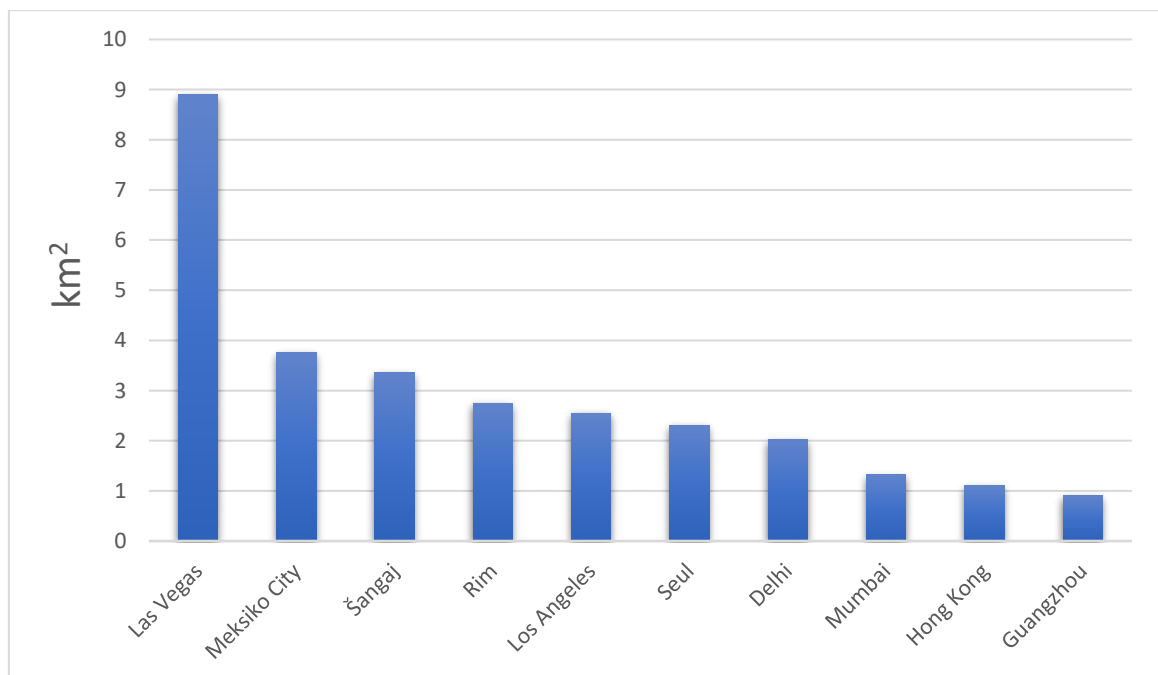
**Slika 3-12.** Shematski prikaz horizontalnih cijevi i ostalih glavnih dijelova sustava proizvodnje bioplina na uređenom odlagalištu komunalnog otpada (Timothy et al., 2015)

### 3.6. Proizvodnja bioplina na odlagalištima komunalnog otpada – primjeri

Odlagališta komunalnog otpada su raširena diljem svijeta i najčešći su oblik zbrinjavanja otpada. Na njima se odlaže i zbrinjava kruti otpad, biootpad i reciklažni otpad. Veličina odlagališta ovisi o veličini urbanog područja čiji otpad zbrinjava, ali i o vrstama otpada koji se akumulira te životnim navikama stanovnika na tom području. Na slici 3-14 prikazan je popis najvećih svjetskih odlagališta po gradovima s obzirom na površinu. Svi gradovi na dijagramu imaju nekoliko odlagališta komunalnog otpada, jedino Las Vegas ima samo jedno odlagalište koje je ujedno i najveće odlagalište komunalnog otpada na svijetu, Apex Regional Landfill (Slika 3-13).



**Slika 3-13.** Odlagalište komunalnog otpada Apex Regional Landfill u Las Vegasu (DCMP, 2021)



**Slika 3-14.** Najveća odlagališta komunalnog otpada po gradovima s obzirom na površinu (STATISTA, 2019)

Postoje mnoga druga odlagališta komunalnog otpada koja svojom veličinom mogu parirati navedenim odlagalištima, ali su neuređena i nemoguće je pronaći relevantne statističke podatke o njima. Npr. usporedbom satelitskih fotografija odlagališta „Olusosun“

u Lagosu (Nigerija) (Slika 3-15) i odlagališta „Sudokwon“ u Seulu (Južna Koreja) (Slika 3-16) jasno se uviđa razlika u načinu gospodarenja otpadom, a samim time i dokumentiranja otpada.

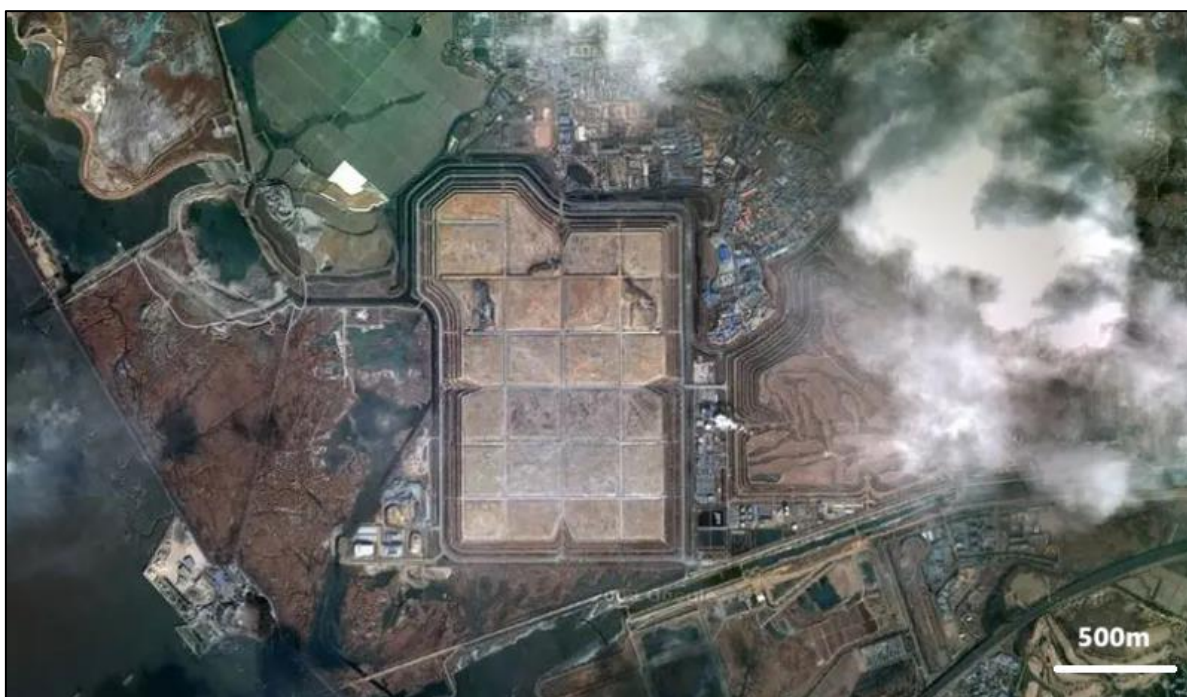
Odlagalište otpada „Sudokwon“ jedno je od najmodernijih odlagališta i postrojenja za obradu krutog otpada. Navedeno odlagalište je uređeno i sustavno proizvodi deponijski plin dulje od 10 godina. Slijedi najmoderniju praksu u rasipanju otpada i koristi najnovija inženjerska dostignuća u području gospodarenja otpadom. Kompleks od 2 km<sup>2</sup> može tretirati i zbrinjavati 18 000 tona otpada svaki dan.

Na odlagalištu Sudokwon nalazi se i jedna od najvećih svjetskih elektrana pogonjena na deponijski plin (Slika 3-17). Deponijski plin svojom ekspanzijom pokreće turbine koje pokreću generator za proizvodnju električne struje. Kapacitet elektrane iznosi 50 MW. Postrojenje svake godine proizvede oko 50 milijuna američkih dolara vrijednosti električne energije, što je dovoljno za napajanje 440 000 domaćinstava. S trenutnom proizvodnjom, ukoliko se pomiješa s naftnim plinom, bioplin može pogoniti oko 80 000 vozila svake godine (Mohanty, 2020).



**Slika 3-15.** Satelitska fotografija odlagališta komunalnog otpada „Olusosun“ u Lagosu (GOOGLE MAPS, 2023)





**Slika 3-16.** Satelitska fotografija odlagališta komunalnog otpada „Sudokwon“ u Seulu (GOOGLE MAPS, 2023)



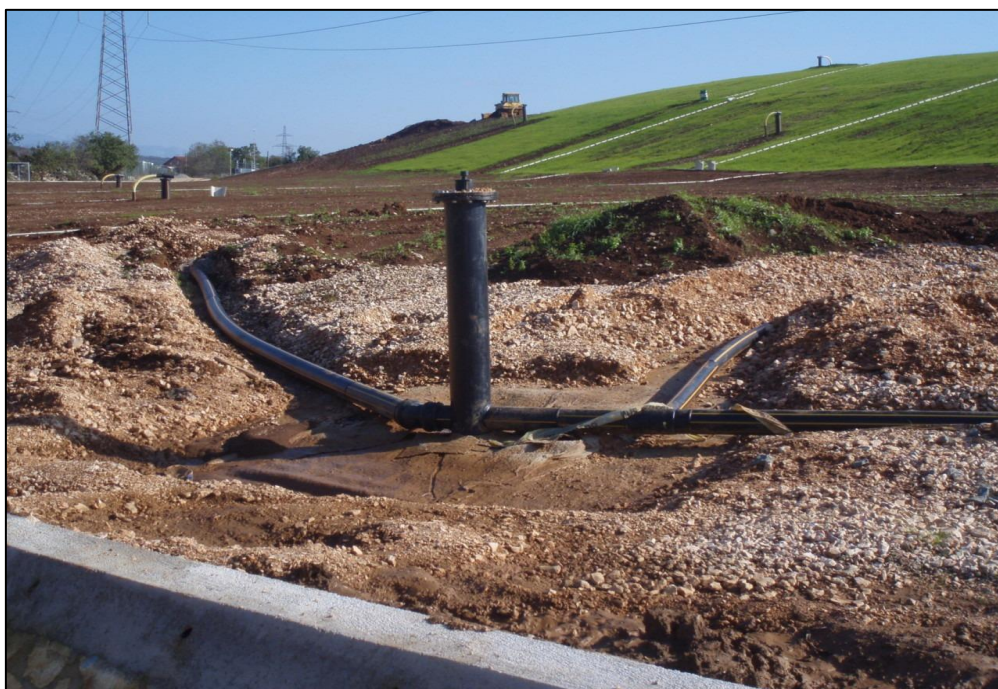
**Slika 3-17.** Bioelektrana „Sudokwon“ u blizini odlagališta komunalnog otpada (Mohanty, 2020)

Veličina globalnog tržišta odlagališnog plina procijenjena je na 1,4 milijarde američkih dolara u 2020., a predviđa se da će tržište deponijskog plina dosegnuti 2,8

milijardi američkih dolara do 2030., s očekivanom prosječnom godišnjom stopom rasta globalnog tržišta deponijskog plina od 7,4% u periodu od 2021. do 2030. godine (AMR, 2021).

U Republici Hrvatskoj aktivna su 93 odlagališta komunalnog otpada, a najveća odlagališta nalaze se u blizini najvećih hrvatskih gradova (HAOP, 2020). Bioplin komercijalno proizvodi tek nekoliko njih. Većina odlagališta u Republici Hrvatskoj ima razvijen sustav otplinjavanja isključivo kako bi se suzbili neugodni mirisi štetnih plinova sa odlagališta te kako bi se smanjio negativan utjecaj sumporovodika na neposrednu okolinu odlagališta.

U Rijeci je 2017. godine na saniranom odlagalištu „Viševac“ (Slika 3-18) izgrađeno postrojenje za proizvodnju električne energije pomoću deponijskog plina. Sanirano odlagalište nekada je bila duboka vrtača koja je korištena za odlaganje komunalnog otpada u razdoblju od 1964. pa do kraja 2011. godine. U tom je razdoblju ondje odloženo približno 2 milijuna metara kubičnih otpada. Tijekom više godina, izrađene su 52 plinske bušotine. Ovakvim korištenjem deponijskog plina, koji bi inače bio spaljivan, smanjena je emisija plinova te je postignuta energetska učinkovitost budući da se odlagališni plin koristi u proizvodnji električne energije. Postrojenje je snage 1,2 MW (ČISTOĆA, 2023).



**Slika 3-18.** Plinska bušotina na riječkom odlagalištu otpada „Viševac“ (ČISTOĆA, 2023)

Grad Split je 2017. godine krenuo s projektom sanacije odlagališta „Karepovac“ u kojem je predviđeno da se izrade 82 plinske bušotine sa svrhom aktivnog otplinjavanja odlagališta. U projektu je predviđena izgradnja plinskog postrojenja za proizvodnju električne energije. Generatori će biti spojeni na HEP-ovu električnu mrežu preko transformatorske stanice. Završetak provedbe projekta očekuje se krajem 2023. godine (GRAD SPLIT, 2021).

Na zagrebačkom se odlagalištu komunalnog otpada „Jakuševac“ proizvodi bioplin i koristi u proizvodnji električne energije još od 2002. godine (Slika 3-19). Primarna zadaća aktivnog sustava otplinjavanja uređenog odlagališta otpada je kontinuirano prikupljanje i termička obrada nastalog odlagališnog plina u cilju sigurnosti na odlagalištu i gradilištu ljudi i strojeva te lokalnog stanovništva, zaštita okoliša i zaštita od požara, a sekundarna zadaća je njegovo energetska iskorištavanje za proizvodnju električne energije iz obnovljivog izvora energije (ZAGREBAČKI HOLDING, 2023)

Danas se sustav na zagrebačkom odlagalištu „Jakuševac“ sastoji od dva glavna dijela: plinske mreže i plinskog postrojenja.

Plinska mreža ima funkciju kontinuiranog prikupljanja nastalog odlagališnog plina iz tijela odlagališta ugrađenog otpada i njegov transport do plinskog postrojenja, a sastoji se od:

- 137 trajnih plinskih bušotina s kontrolnim regulacijskim ventilima,
- oko 9,8 km mreže plinovoda s odvajačima kondenzata, sabirnih kondenznih šahtova i jama.

Plinsko postrojenje čine:

- tri visokotemperaturne baklje
- četiri plinska motora s generatorima
- četiri generatora ukupne električne snage 4,2 MW (ZAGREBAČKI HOLDING, 2023).





**Slika 3-19.** Plinsko postrojenje za proizvodnju električne energije na odlagalištu komunalnog otpada „Jakuševac“ (ZAGREBAČKI HOLDING, 2023)

#### 4. BIOREAKTORI (ANAEROBNI DIGESTORI)

Komunalni otpad se zbrinjava i na način da ga se odlaže ne samo na odlagališta otpada već i u anaerobne komore koje se zovu anaerobni digestori ili bioreaktori. Bioreaktori, također poznati i kao fermentori, su hermetički zatvorene komore u kojima se vrši kontrolirana anaerobna digestija biootpada sa svrhom proizvodnje bioplina i digestata.

Kao ulazna „sirovina“ u bioreaktorima za proizvodnju bioplina mogu se koristiti različiti izvori biootpada, među kojima su: poljoprivredni ostaci, životinjski gnoj, šumski ostaci, komunalni kruti otpad (tj. otpad od hrane, papir itd.) i komunalne otpadne vode. Danas se većina bioplina proizvodi iz poljoprivrednih ostataka u obliku usjeva i životinjskog gnojiva (CLIMATE SEED, 2022).

##### 4.1. Čimbenici koji utječu na proizvodnju bioplina u bioreaktorima

Bioplin se u bioreaktorima proizvodi kroz četiri složena biokemijska procesa, a to su: hidroliza, acidogeneza, acetogeneza i metanogeneza. Oni se podudaraju s već spomenutim fazama bakterijskog razlaganja na odlagalištima komunalnog otpada. Međutim, u anaerobnim digestorima svaki od tih procesa može se pratiti i regulirati. Zbog mogućnosti regulacije brzine reakcija i procesa može se ubrzati proizvodnja bioplina. Na navedene procese utječe nekoliko parametara, a najbitniji uključuju: koncentraciju vodikovih iona (pH), temperaturu, omjer ugljika i dušika, vrstu i veličinu čestica u supstratu te koncentraciju inokuluma, odnosno bakterija koje kroz navedene procese biokemijskim putem razlažu biootpad u bioplin i digestat (Banerjee et al., 2022).

###### a) Koncentracija vodikovih iona (pH)

Na anaerobnu digestiju utječe koncentracija vodikovih iona (pH) prisutnih u supstratu namijenjenom za digestiju. Budući da povećana kiselost sprječava digestiju, koncentracija vodikovih iona direktno utječe na rast mikroba, odnosno metanogenih bakterija. Navedene bakterije uspijevaju u neutralnim do blago alkalnim uvjetima, a u kiselim sredinama odumiru. Optimalni pH uvjeti za stabilan proces anaerobne digestije su od 7 do 8,5, s poželjnim vrijednostima bližim neutralnosti (7).

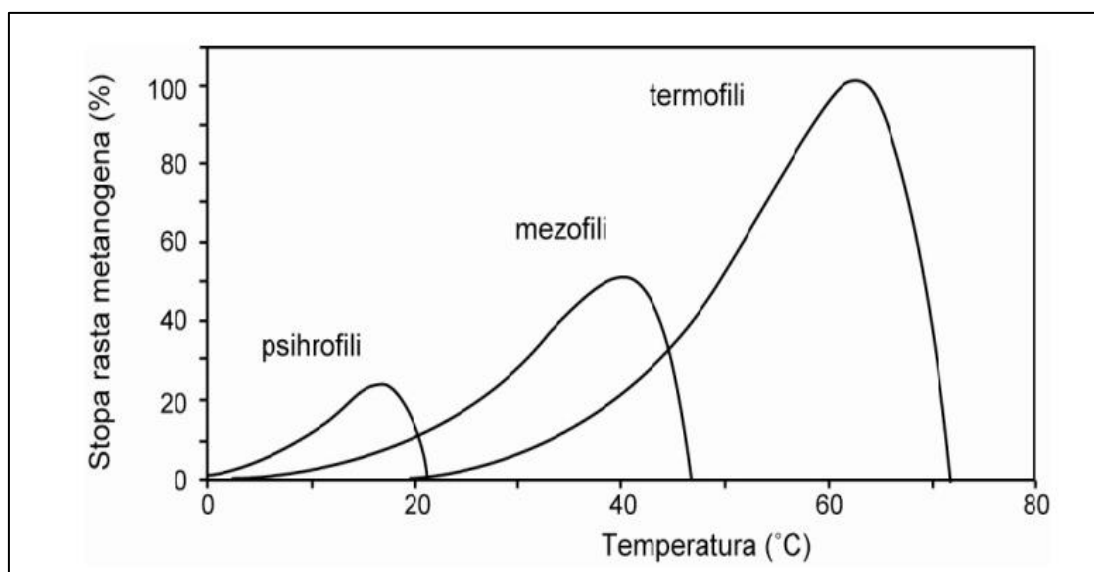
###### b) Temperatura



Temperatura u digestoru i temperatura supstrata utječu na proces digestije jer su anaerobne bakterije koje uzrokuju razgradnju osjetljive na temperaturu. Tri su opća temperaturna raspona u procesu anaerobne digestije.

- i) Psihrofilno: oko 10-30 °C,
- ii) mezofilno: oko 30-40 °C, i
- iii) termofilno: oko 50-55 °C (može doseći 60 °C)

Svaki tip temperaturnog raspona favorizira točno određenu i jedinstvenu vrstu mikroorganizama koji razgrađuju supstrat. Za razliku od anaerobne digestije na odlagalištima komunalnog otpada, u bioreaktorima je moguće održavati točno određenu temperaturu u digestoru. Empirijski je dokazano, ali nije nužno pravilo, da su bakterije najaktivnije u mezofilnom i termofilnom rasponu (Slika 4-1). Ekstremne temperature, bilo vrlo visoke ili vrlo niske, uništavaju metanogene bakterije, što za rezultat ima neuspješnu digestiju, odnosno odsustvo bioplina. Reguliranje temperature u sustavu se ostvaruje procesnim biokemijskim reakcijama, miješanjem i izmjenjivačima topline.



**Slika 4-1.** Dijagram ovisnosti brzine rasta metanogenih bakterija s obzirom na temperaturu (Al Seadi et al., 2008)

c) Omjer ugljika i dušika

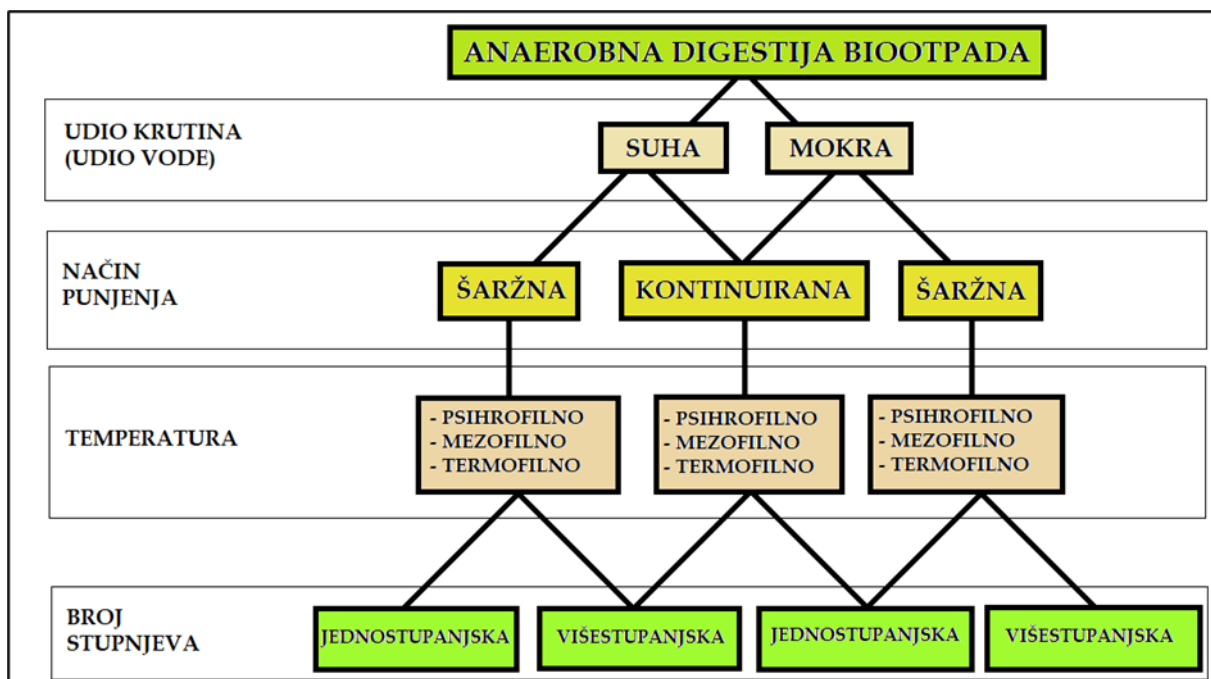
Učinkovitost anaerobne digestije ovisi o koncentraciji ugljika i dušika. Optimalni omjer ugljika i dušika za anaerobnu digestiju je između 20:1 i 30:1. Omjer ugljika i dušika u sirovini trebao bi biti oko 30:1 za optimalnu učinkovitost. Metanogene bakterije koriste

dušik kako bi zadovoljile svoje potrebe za proteinima. Ugljik služi kao izvor energije za mikrobe, dok dušik potiče razvoj mikroba. Manjak dušika rezultira populacije mikroba su male, a razgradnja preostalog ugljika traje duže. Stoga, kada je omjer ugljika i dušika viši od idealnog raspona, bakterije brzo iskorištavaju dušik, sprječavajući reakciju dodatnog ugljika u sirovini i smanjenje prinosa bioplina. Kada su omjeri niži od navedenog raspona, višak dušika koristi se za sintezu amonijaka (jaka baza), što podiže radni pH preko 8,5; dakle, inhibirajući bakterije i na kraju smanjujući brzinu stvaranja plinova. Bakterije u procesu probave iskorištavaju prisutni ugljik od 30 do 35 puta brže nego što pretvaraju dušik. Zbog visokog sadržaja dušika u životinjskom gnojivu, njegova je upotreba u anaerobnoj digestiji za proizvodnju bioplina ograničena. Da bi se riješio ovaj problem, koristi se sirovina bez dušika ili izvor bogat ugljikohidratima za povećanje sadržaja ugljika u životinjskom gnojivu prije procesa anaerobne digestije.

#### d) Veličina čestica supstrata

Biomasu treba prethodno obraditi kako bi se smanjila veličina čestica, a zatim bi trebalo izvršiti kodigestiju kako bi se potaknulo stvaranje bioplina. Anaerobna digestija zahtijeva supstrat sastavljen od probavljivih čestica. Manje čestice povećavaju površinu dostupnu metanogenim bakterijama za djelovanje mikroba, povećavajući biorazgradivost sirovine, a time i brzinu stvaranja bioplina, dok veće čestice mogu začepiti digester.

Proizvodnja bioplina anaerobnom digestijom moguća je na više načina (Slika 4-2). Svi čimbenici koji utječu na brzinu i kvalitetu stvaranja metana pomoću metanogenih bakterija mogu varirati u određenom spektru vrijednosti. Tehnologija pridobivanja bioplina stoga ovisi o potrebama proizvođača bioplina te financijskim i prostornim mogućnostima. Upravo je ta širina mogućnosti pridobivanja bioplina razlog zašto se bioplin može proizvoditi na razini jednog kućanstva, na razini ruralnog gospodarstva, na razini postrojenja za proizvodnju energije ili pak na razini općine ili grada u svrhu boljeg gospodarenja otpadom.



**Slika 4-2.** Grafički prikaz mogućih različitih načina anaerobne digestije u bioreaktoru

Razvoj različitih anaerobnih digestora u zadnjih desetak godina znatno je unaprijedio tehnologiju anaerobne digestije. Bioplinska postrojenja prikladna su za ekonomičnu obradu komunalnih i agroindustrijskih organskih ostataka, kao i za proizvodnju teritorijalno decentralizirane električne i toplinske energije.

Prilikom proizvodnje bioplina prisutni su i određeni problemi i izazovi s kojima se današnja tehnologija proizvodnje bioplina susreće. To su najčešće dugo vrijeme zadržavanja, prisutnost štetnih komponenti, smanjen prinos bioplina i ograničenja dizajna bioreaktora zbog uvjeta okoline. Dizajn i tehnološke karakteristike anaerobnih digestora nisu univerzalni te se moraju konstruirati s obzirom na vrstu supstrata koji se koristi. Također, bitni su i okolni uvjeti proizvodnje s obzirom na lokaciju, razvijenost i krajnji cilj primjene bioplina. Rezultat svega toga je više osnovnih tipova bioreaktora koji su danas u funkciji diljem svijeta.

Cijene, građevinski materijali i složenost dizajna digestora variraju. Da bi se izgradio bilo kakav anaerobni digestor, prvo treba ispuniti sljedeće uvjete (Banerjee et al., 2022):

- i) proizvoditi zadovoljavajuće količine bioplina visoke kvalitete;
- ii) kontinuirano upravljati visokom stopom organskog opterećenja;
- iii) održavati kratko hidrauličko razdoblje zadržavanja biomase unutar bioreaktora kako bi se smanjio volumen supstrata reaktora, drugim riječima, ne nagomilavati supstrat unutar bioreaktora.

## 4.2. Podjela bioreaktora

Postoji više podjela anaerobnih digestora, a jedna od najbitnijih i najpreglednijih je ona koja se temelji na načinu rada, a prema kojoj postoje (Banerjee et al., 2022):

- Šaržni anaerobni digestor
- Anaerobni digestor s čepolikim protokom
- Bioreaktor kontinuiranog protoka s miješalicom
- Anaerobni kontaktni digestor
- Membranski anaerobni digestori s biofilmom
- Anaerobni digestor s pregradama

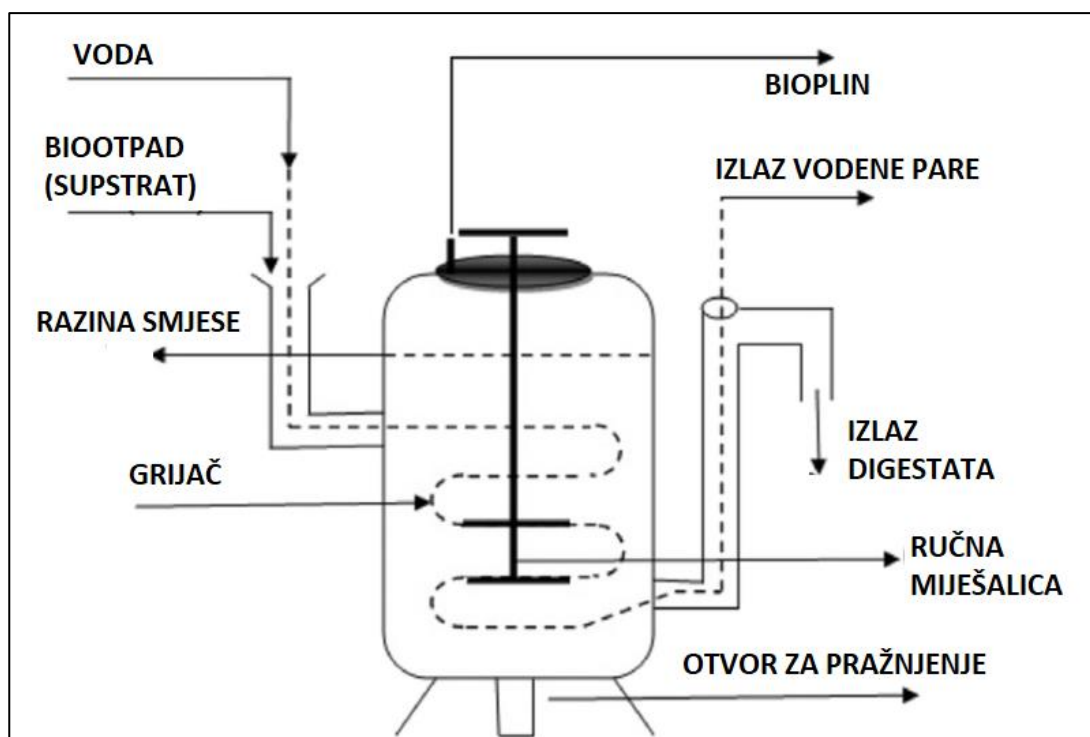
### a) Šaržni anaerobni digestor (*engl. Batch Reactor, BR*)

Šaržni bioreaktori najjednostavniji su primjer anaerobnih digestora. Mogu varirati od vrlo jednostavnih, koji se koriste u kućnoj proizvodnji bioplina (Slika 4-3), do složenijih, koji se koriste na bioplinskim postrojenjima. Međutim, princip rada je isti, razlika je samo u količini supstrata te proizvedenog bioplina i digestata. Bez obzira na opseg proizvodnje bioplina, svaki šaržni digestor funkcionira tako da se digestor napuni supstratom u jednom obroku bez prisustva bilo kakve mehaničke intervencije miješalicama ili stvaranjem protoka od ulaza u digestor do izlaza digestata. Digestor je hermetički zatvoren te nakon određenog vremena metanogene bakterije probavom biootpada koji se nalazi u digestoru stvaraju i akumuliraju bioplin. Bioplin je lakši te se akumulira pri vrhu digestora. Mnoga kućanstva na taj način osiguravaju određene količine prirodnog plina koje zatim koriste za vlastite potrebe. Takav način dobivanja bioplina čest je u ruralnim područjima gdje su obiteljska poljoprivredna gospodarstva udaljena od priključka na plinsku mrežu.



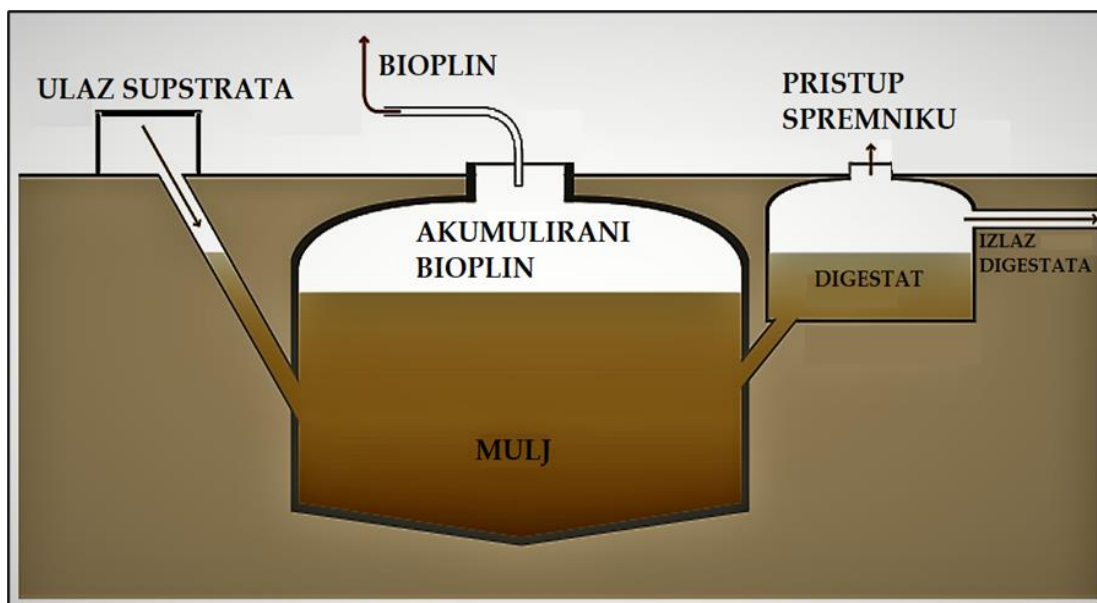
**Slika 4-3.** Tipično kućno šaržno postrojenje za proizvodnju bioplina (Darby, 2016)

Na Slici 4-4 prikazana je shema jednostavnog kućnog šaržnog anaerobnog digestora koji kao dodatak ima ručnu miješalicu koja se koristi isključivo na početku procesa kako bi se smjesa homogenizirala. Međutim, tijekom procesa anaerobne digestije miješalica miruje.



**Slika 4-4.** Shematski prikaz kućnog šaržnog postrojenja za proizvodnju bioplina s dodatkom ručne miješalice za bolju homogenizaciju smijese (Rahaman, 2014)

Isti princip proizvodnje bioplina, samo u većem opsegu, primijenjen je u državama u razvoju koje nemaju razvijenu energetska mrežu. Za male lokalne zajednice u slabo razvijenim zemljama Afrike, Azije i Južne Amerike, bioplinsko postrojenje je od velike važnosti i pomoći. Prvenstveno radi pridobivanja bioplina kao glavne sirovine za ogrjev i kuhanje, ali i za ostale energetske potrebe koje si stanovništvo u tim lokalnim zajednicama do tada nije moglo osigurati. Naime, radi se o podzemnom digestoru većih dimenzija i vrlo jednostavnog dizajna (Slika 4-5).



**Slika 4-5.** Podzemni šaržni bioreaktor (Mudlambuzi, 2019)

Na površini se nalazi otvor, odnosno odlagalište za sav supstrat koji lokalna zajednica prikuplja. Takav supstrat se sastoji od biljnog i životinjskog otpada, mulja, fekalija te otpada općenito. Odlagalište je podzemnim tunelom povezano s glavnim spremnikom, odnosno bioreaktorom u kojemu vladaju anaerobni uvjeti. Sav biootpad se akumulira u bioreaktoru te počinje proces anaerobne digestije pomoću metanogenih bakterija. Pri vrhu digestora nalazi se ventil koji po potrebi propušta proizvedeni bioplin, a digestat izlazi u drugu komoru koja je ujedno i spremnik za digestat. Navedeni proizvedeni digestat lokalna zajednica upotrebljava kao gnojivo u poljoprivredi.

Na Slici 4-6 prikazan je šaržni anaerobni digestor u izgradnji koji sadrži četiri komore. Prva komora je ulaz supstrata, odnosno mjesto gdje zajednica odlaže otpad. Druga komora je šaržni digestor na vrhu kojega će se postaviti ventil kroz koji će se puštati proizvedeni bioplin. U treću komoru se izliva digestat, a u četvrtu se nakuplja u većim količinama te se po potrebi koristi kao gnojivo.

Anaerobni digestor sličnih dimenzija, ali s tri komore prikazan je na Slici 4-7. Razlika je jedino u tome što je na Slici 4-7 vidljiv postavljeni ventil na vrhu bioreaktora te što navedeni anaerobni digestor nema komoru za skladištenje digestata.





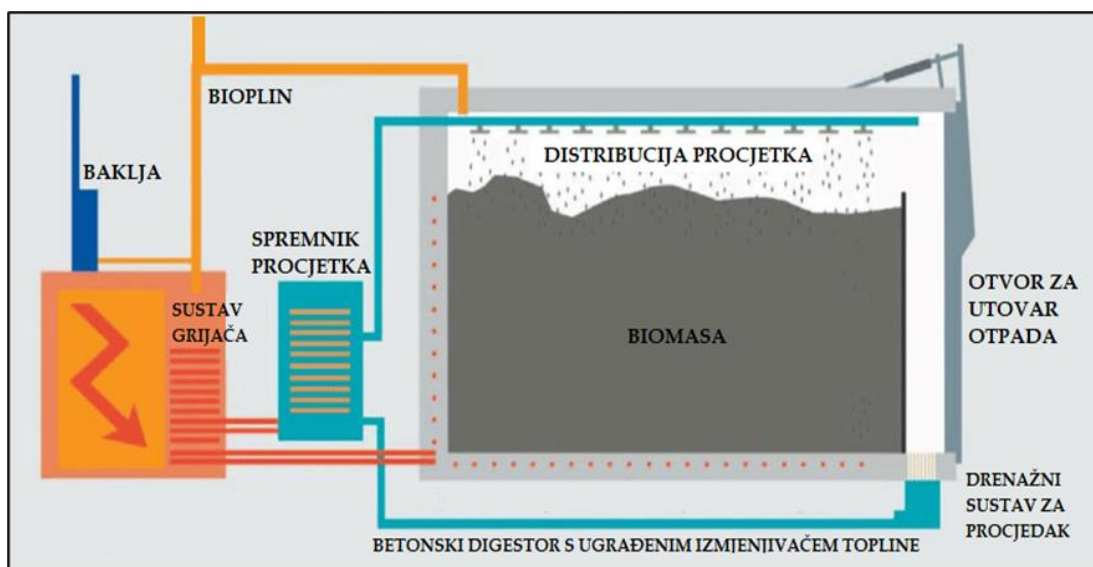
Slika 4-6. Podzemno šaržno postrojenje za proizvodnju bioplina s četiri komore (SOLAREYES, 2023)



Slika 4-7. Podzemno šaržno postrojenje za proizvodnju bioplina s tri komore (Charles et al., 2006)



Za još veći opseg proizvodnje bioplina šaržnim anaerobnim digektorima koriste se veliki armiranobetonski spremnici. Naime, ovaj se način proizvodnje bioplina također naziva i suha šaržna anaerobna digestija (*engl. „dry batch method“*) te se primjenjuje u razvijenim zemljama kao jedan od češćih načina pridobivanja veće količine bioplina. U navedenom sustavu koristi se isključivo suhi kruti otpad, kao na primjer komunalni, životinjski i biljni otpad. Za prebacivanje i utovar otpada u digektor koristi se bager koji u jednom obroku unese određenu veću količinu otpada u spremnik digestora koji se nakon toga hermetički zatvara (Slika 4-9). Za svaku anaerobnu digestiju je potrebna određena količina vlage, a u šaržnom digektoru ovoga tipa ona se postiže puštanjem eluata, odnosno puštanjem vodene pare iz već procesuiranog otpada koja u sebi sadrži razne nečistoće kroz cjevčice koje su postavljene unutar bioreaktora. Na taj se način vlaga jednoliko raspoređuje kroz biomasu. Za to vrijeme sustav izmjenjivača topline grije biomasu i procjedak što pogoduje procesu izdvajanja bioplina i stvaranja digestata. Kada se postignu povoljni uvjeti za anaerobnu digestiju, počinje akumuliranje bioplina pri vrhu spremnika. Cijelo to vrijeme, procjedak kruži sustavom. Akumulira se na dnu spremnika te se odvodom i sustavom crpki ponovno vraća u spremnik za procjedak (Slika 4-8).



**Slika 4-8.** Shematski prikaz modernog šaržnog postrojenja za proizvodnju bioplina sa svim glavnim dijelovima sustava (Patinvoh, 2017)

Proizvedeni bioplin može se koristiti kao energent za grijanje cijelog sustava, dobivanje električne energije u sustavu, akumuliranje u sustavu za daljnju obradu i

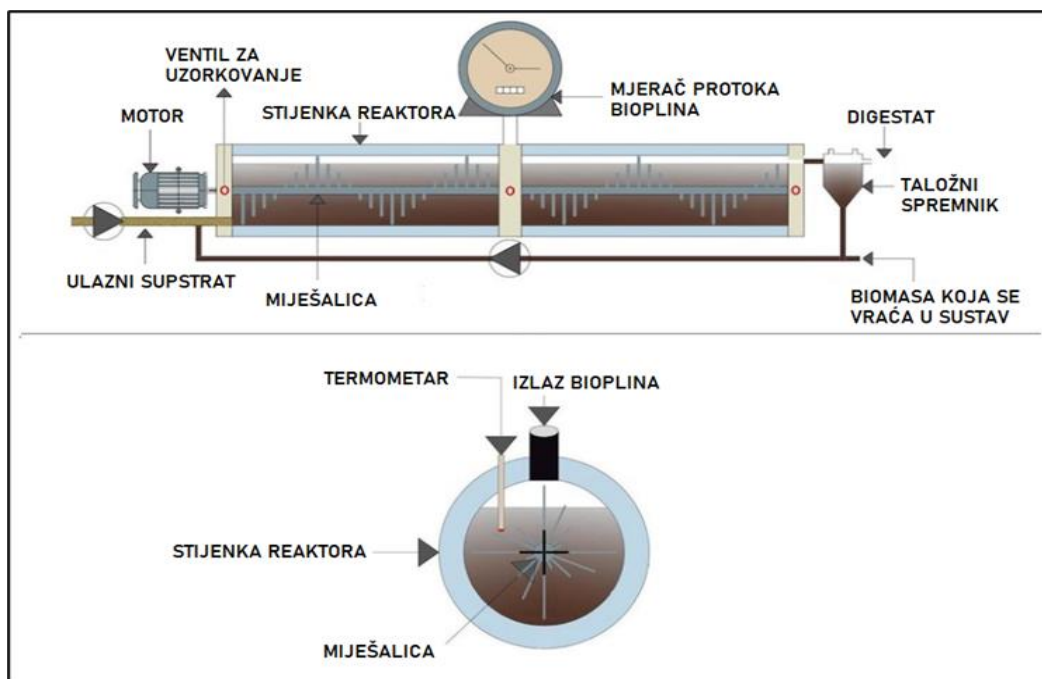
primjenu ili se u nuždi može spaliti na baklji. Proizvodnja bioplina obično je najveća na početku procesa i smanjuje se kako se supstrat „troši“.



**Slika 4-9.** Otvor za utovar otpada na šaržnom bioplinskom postrojenju (BEKON, 2011)

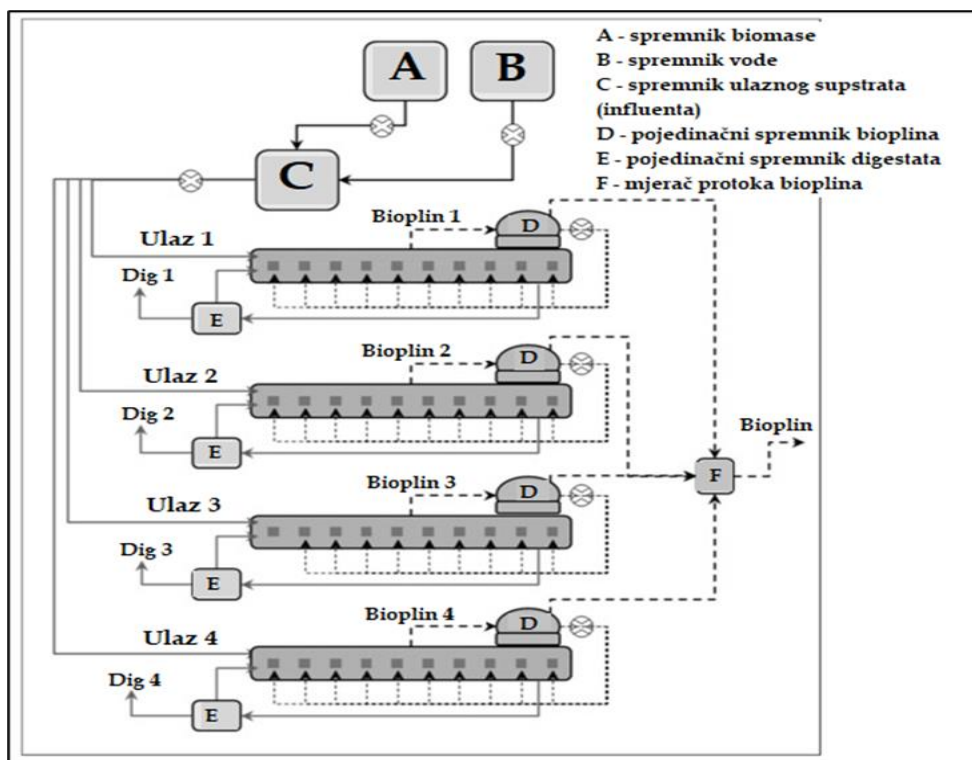
b) Anaerobni digester s čepolikim protokom (*engl. Plug-flow Reactor, PFR*)

Digestori s čepolikim protokom (Slika 4-10) su bioreaktori koji se vjerojatno najčešće koriste. Glavna karakteristika im je jednostavnost i u smislu dizajna i načina rada što je i razlog široke primjenjivosti. Najčešće su vodoravni, cilindričnog oblika te skoro uvijek nadzemni. Na jednom kraju digestora nalazi se ulaz supstrata kroz koji supstrat ulazi periodično, u obrocima (čepoliko). Na drugoj strani nalazi se izlaz kroz koji protječe digestat koji se kasnije dodatno obrađuje. U samom digesteru nalazi se i miješalica koja potpomaže homogenizaciji supstrata koji se obrađuje. Volumen supstrata koji se digestira nešto je manji od volumena cijelog bioreaktora kako bi se bioplin, koji nastaje digestijom, mogao akumulirati. Na gornjem dijelu digestora nalazi se otvor za prolaz proizvedenog bioplina i mjerač protoka bioplina. U šupljnoj čeličnoj stijenci bioreaktora nalazi se sustav cijevi koji služi kao izmjenjivač topline cijelog sustava, odnosno kao grijač ili rashlađivač.



**Slika 4-10.** Pregledni i poprečni prikaz anaerobnog digestora s čepolikim protokom i svim relevantnim dijelovima sustava (Diamantis i Eftaxias, 2021)

U anaerobnom digestoru s čepolikim protokom, proces digestije može biti i mezofilni i termofilni, a preferira se način suhe digestije. Ovaj digestor omogućuje također i digestiju širokog spektra različitih ulaznih supstrata kao što su: različite vrste organskog otpada, životinjski gnoj, otpadne vode te organski dio krutog komunalnog otpada. Bitno je naglasiti da u reaktorima s čepolikim protokom ne dolazi do aksijalnog miješanja mase unutar spremnika, već se radi isključivo o radijalnom miješanju.



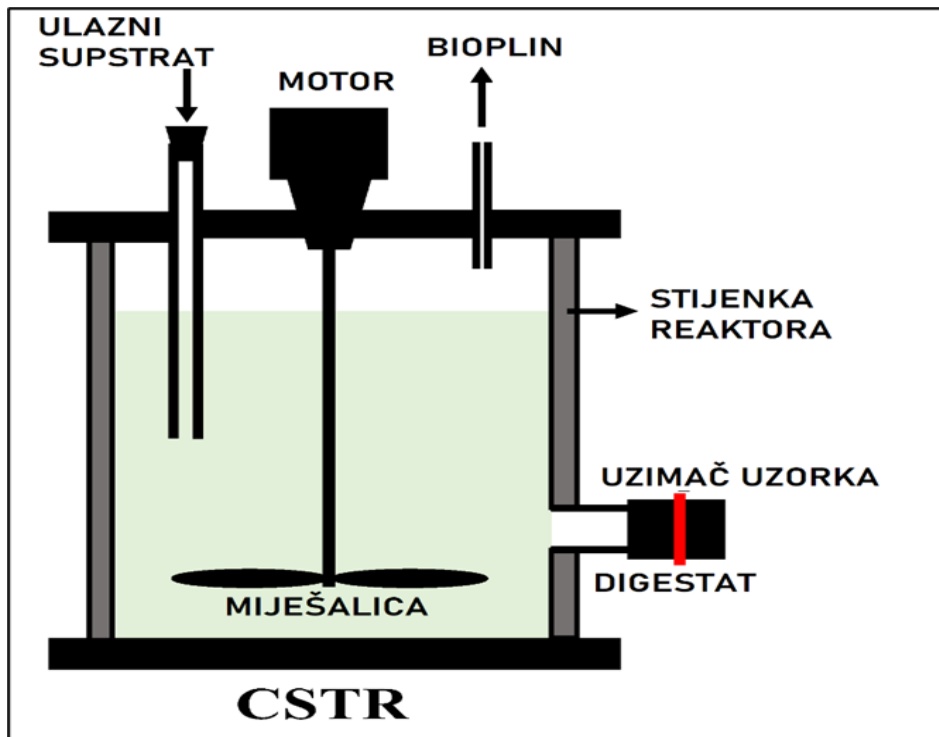
**Slika 4-11.** Shematski prikaz paralelnog spajanja anaerobnih digestora s čepolikim protokom u praksi (Ramos-Suárez, 2019)

Reaktori s čepolikim protokom najčešće su paralelno povezani kako bi se maksimalizirao njihov učinak na bioplinskom postrojenju. Na Slici 4-11 prikazana je shema rada jednog paralelno spojenog bioplinskog postrojenja. U glavnom spremniku za ulazni supstrat (C) miješaju se voda (spremnik B) i biomasa (komunalni otpad, kanalizacijski mulj, gnojnice, stajnjak...) (spremnik A). To je samo jedna od mnogo varijanti obrade ulaznog supstrata prije procesa anaerobne digestije kako bi se poboljšao njen učinak. Iz navedenog spremnika supstrat se transportira u bioreaktore u obrocima te ulaskom supstrata započinje anaerobna digestija. Anaerobnom digestijom se proizvodi bioplin (D), a digestat se akumulira u spremnicima (E). Sav proizvedeni bioplin prolazi kroz mjerač protoka te je spreman za daljnju obradu.

c) Bioreaktor kontinuiranog protoka s miješalicom (*engl. Continuous Flow Stirred-tank Reactor, CSTR*)

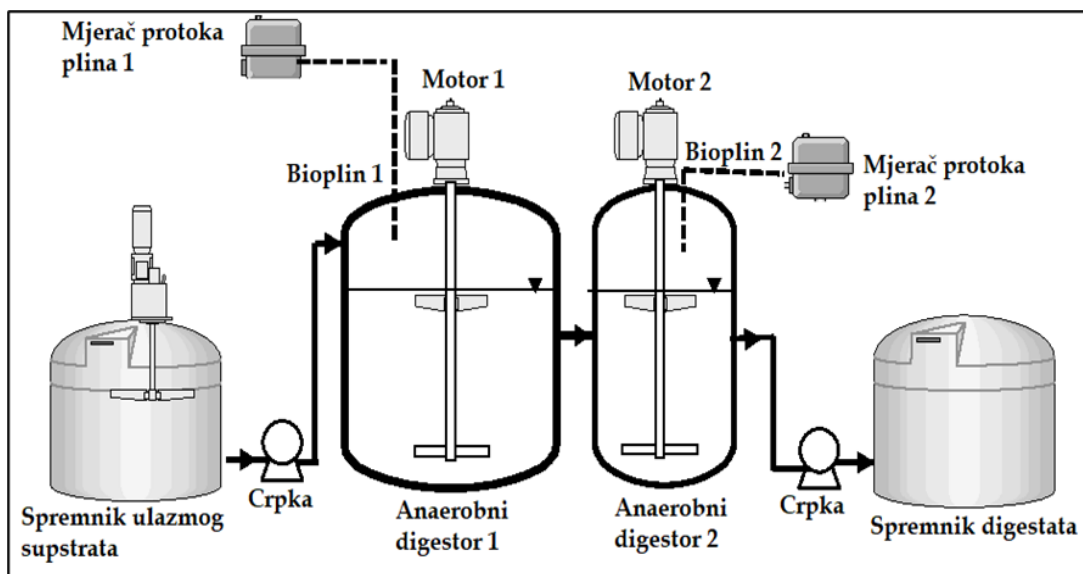
Primjena reaktora kontinuiranog protoka s miješalicom za proizvodnju bioplina (Slika 4-12) raširena je u cijelom svijetu. Uz bioreaktore s čepolikim protokom, najviše se koriste, a glavna prednost im je još jednostavniji dizajn i operativnost u

usporedbi s bioreaktorom s čepolikim protokom. Za razliku od PFR reaktora, u kojima se odvija suha digestija s visokim sadržajem krutine, u CSTR se najčešće odvija mokra digestija. CSTR kao supstrat koristi razne vrste gnojnica, otpadne vode i kanalizacijski mulj. Supstrati poput komunalnog otpada se ne koriste u bioreaktorima ovog tipa, upravo zbog spomenute preferencije korištenja mokre digestije. Nedostatak CSTR-a je produljeno vrijeme zadržavanja i veća potrošnja energije u usporedbi s drugim bioreaktorima.



**Slika 4-12.** Ilustracija tipičnog anaerobnog digestora s kontinuiranim protokom i miješalicom (Yong et al., 2022)

Postoje razne varijante konačne izvedbe CSTR-a, međutim sve ih karakterizira isti princip rada. Supstrat, koji je dodatno obrađen prije ulaska u reaktor, ulazi u spremnik gdje se vrši anaerobna digestija. Za to vrijeme grijači koji se nalaze u stijenci reaktora optimiraju temperaturu u spremniku. Miješalice su postavljene vertikalno i/ili koso te konstantno miješaju cijelu smjesu sa svrhom homogenizacije mase unutar spremnika. Cijeli proces se odvija simultano i kontinuirano. Stanke i prekidi cijele operacije vrše se samo u slučaju kvara ili servisa digestora. Bioplina se gravitacijski akumulira u gornjem dijelu spremnika, a digestat pri dnu bioreaktora.

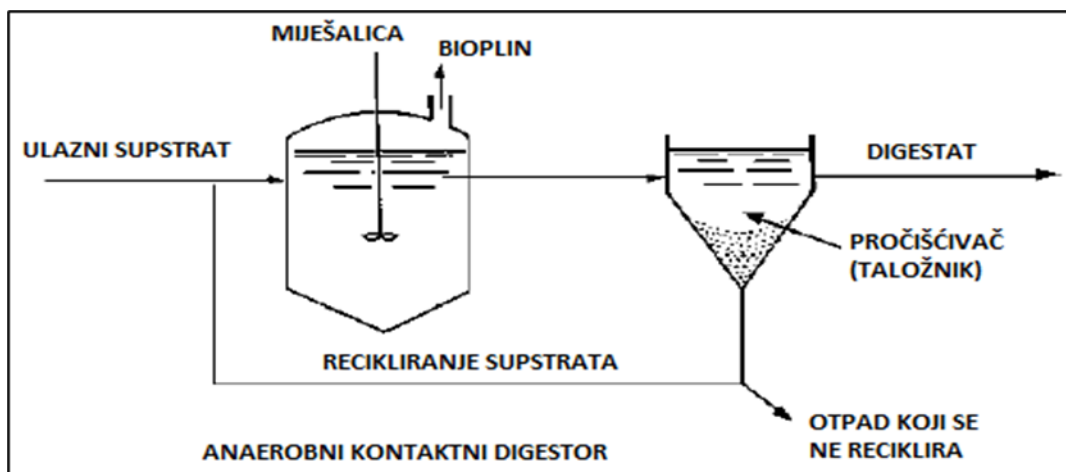


**Slika 4-13.** Shematski prikaz serijskog spajanja anaerobnih digestora s kontinuiranim protokom i miješalicom u praksi (Kaparaju et al., 2009)

Na Slici 4-13 prikazana je shema rada jednog tipskog postrojenja s kontinuiranim protokom i miješalicom za proizvodnju bioplina. U praksi se ovakvi digestori zbog povećanja učinkovitosti povezuju serijski, za razliku od digestora s čepolikim protokom koji se spajaju paralelno.

d) Anaerobni kontaktni digestor (*engl. Anaerobic Contact Reactor, ACR*)

Anaerobni kontaktni digestor (Slika 4-14) ima dodatnu komoru, odnosno separator kruto-tekuće (kao što je gravitacijski taložnik, uređaj za flotaciju mulja ili lamelni taložnik), gdje se krutine prikupljaju i ponovno uvode u anaerobni digestor. To je i osnovna razlika ovog digestora u odnosu na ostale. Princip proizvodnje bioplina i digestata je u biti jednak kao i u već navedenim bioreaktorima - razgradnja supstrata od strane metanogenih bakterija.

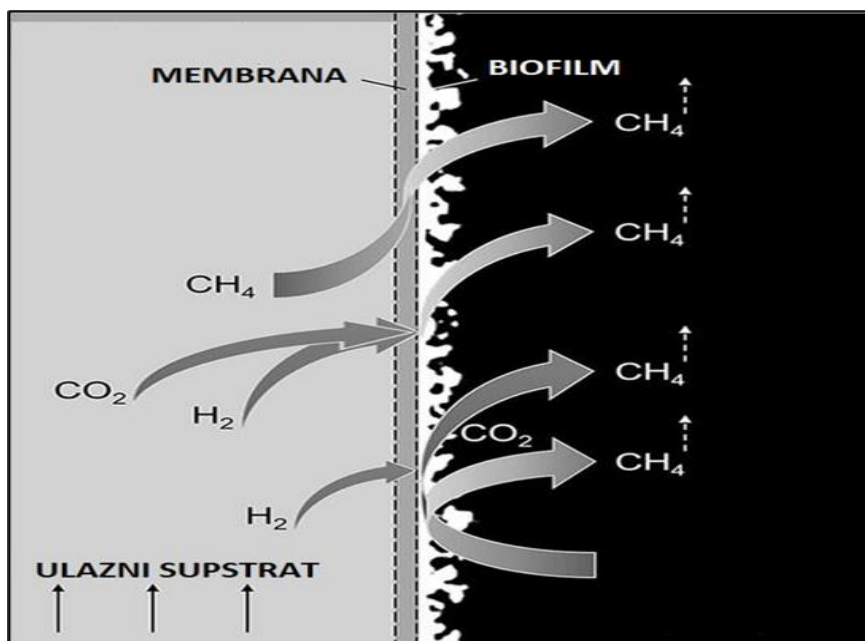


**Slika 4-14.** Shematski prikaz tipičnog anaerobnog kontaktnog digestora (Banerjee et al., 2022)

e) Membranski anaerobni digestori s biofilmom (*engl. Membrane Biofilm Reactor, MBfR*)

Bakterije, pa tako i već spomenute metanogene bakterije, su mikroskopski sitni jednostanični organizmi s prokariotskom građom stanice. Imaju tendenciju grupiranja u manje ili veće skupine kako bi se lakše hranile i preživjele. Takve nakupine bakterija nazivaju se biofilmovi.

Anaerobni digestor s biofilmom (Slika 4-15) konstrukcijski se razlikuje od ostalih bioreaktora jer ima instaliranu membranu vertikalno sredinom digestora. Na toj membrani nalazi se velika količina metanogenih bakterija koje formiraju anaerobni mikrobnji biofilm. Biofilm se sastoji od inertnog unutarnjeg dijela i vanjskog aktivnog dijela. Unutarnji dio zbog svoje kemijske tromosti služi kao baza za stabilizaciju biofilma na membrani, a vanjski dio obavlja anaerobnu digestiju.



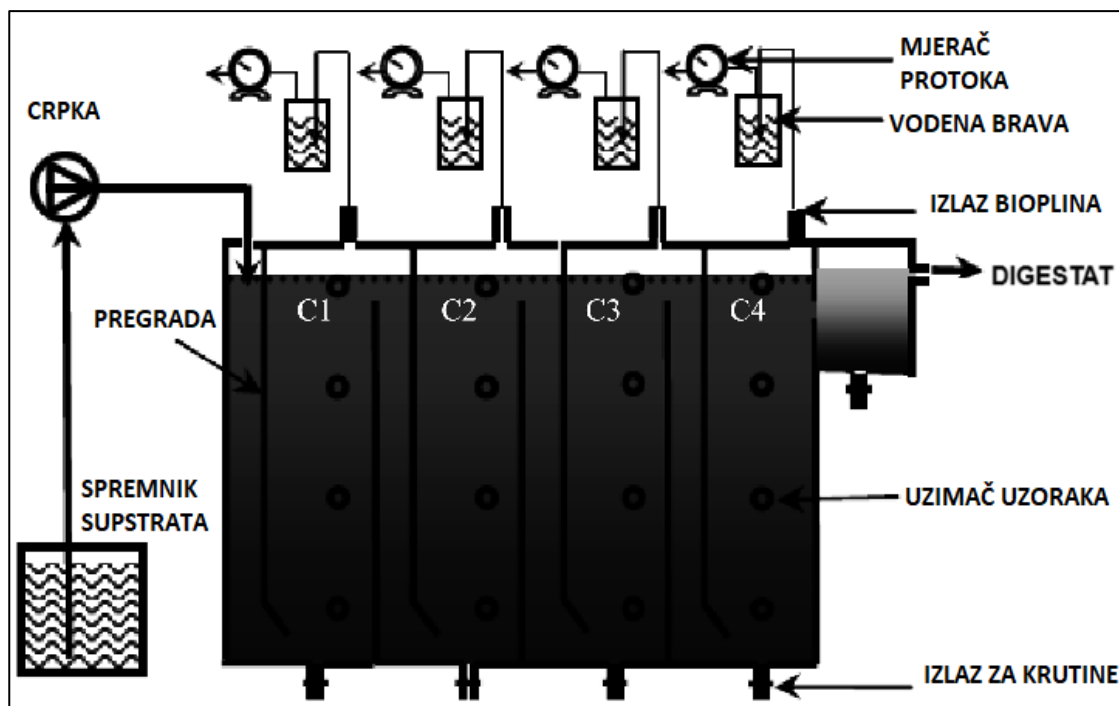
**Slika 4-15.** Uvećani i pojednostavljeni grafički prikaz djelovanja membrane i biofilma na proizvodnju bioplina (Miehle et al., 2021)

Za razliku od kaotičnog razlaganja supstrata u ostalim tipovima bioreaktora, membranski anaerobni digestori s biofilmom puno kvalitetnije i brže generiraju bioplin s većim udjelom metana u odnosu na ostale bioreaktore. Razlog tome je kanalizirani protok supstrata u digestoru. Bioplin proizveden u membranskom digestoru s biofilmom ima visoki udio metana, međutim vrlo je skup i nije primjenjiv na većim postrojenjima već isključivo u laboratorijima.

f) Anaerobni digestor s pregradama (*engl. Anaerobic Baffled Reactor; ABR*)

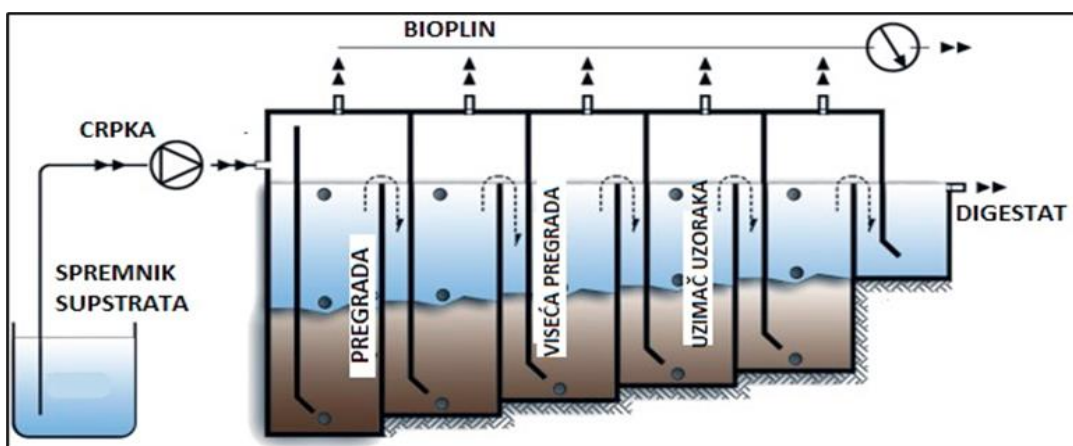
Anaerobni reaktori s pregradama (Slika 4-16) su digestori nadograđeni nizom pregrada duž komore za obradu. Komore uzlaznog toka omogućuju poboljšano uklanjanje i digestiju organske tvari. Digestori s pregradama temelje se na fizičkoj obradi, odnosno taloženju te ovise o aktivnosti metanogenih bakterija.





Slika 4-16. Shematski prikaz tipičnog anaerobnog digestora s pregradama s četiri komore (Jianzheng, 2013)

Organska frakcija krutog komunalnog otpada dovodi se u anaerobni bioreaktor s pregradama, koji zatim razgrađuje materijale i stvara bioplin kroz mikrobnu aktivnost. Ovaj tip reaktora može tretirati otpad s visokim sadržajem krutine. Tretman se poboljšava kako se produljuje vrijeme kontakta s muljem (aktivnom biomasom). Također, anaerobni digestori s pregradama mogu se koristiti za pročišćavanje širokog spektra otpadnih voda. Međutim, preostale otpadne vode i mulj zahtijevaju dodatnu obradu prije ispuštanja ili ponovne upotrebe.



Slika 4-17. Shematski prikaz tipičnog anaerobnog digestora s pregradama s pet komora (Elreedy i Tawfik, 2015)

Za razliku od većine ostalih anaerobnih digestora, bioreaktor s pregradama u svom dizajnu ima više komora, odnosno više manjih digestora (Slika 4-17). U svakoj sljedećoj komori tijekom procesa, omjer mulja, digestata i bioplina je drugačiji. Također, kemijski sastav navedenih komponenti je drugačiji. Stoga, svaka komora ima konstruirane uzimače uzoraka kako bi završni rezultati anaerobne digestije bili zadovoljavajući i kako bi se provodio monitoring procesa.

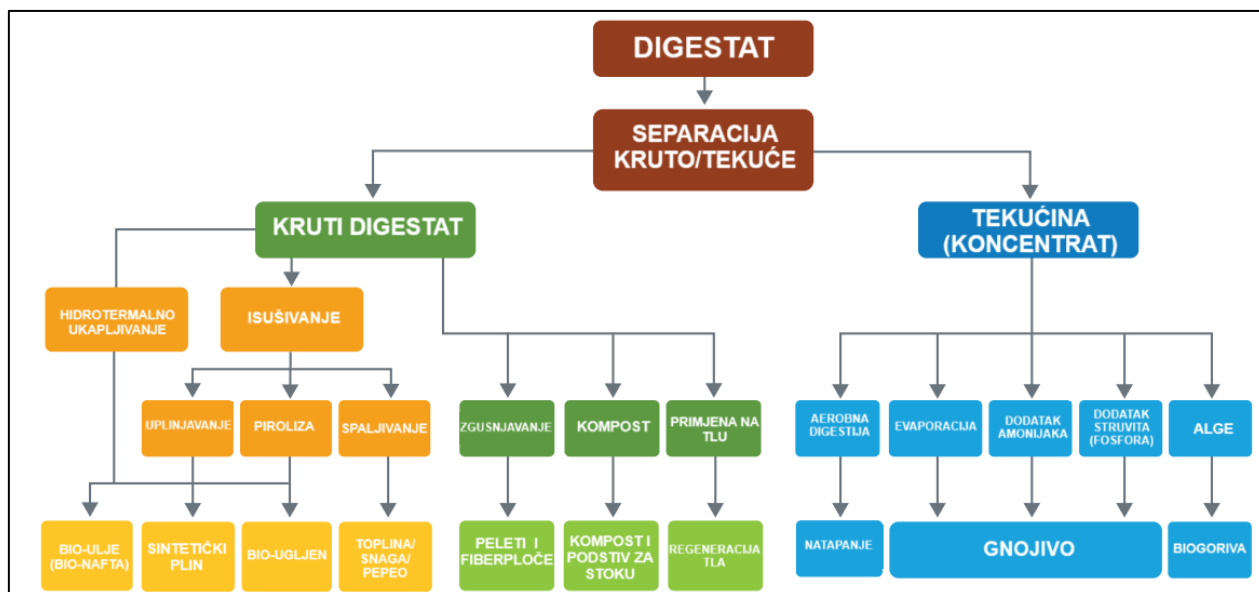
Anaerobna digestija može se provoditi u jednom ili u više stupnjeva. Svi navedeni tipovi anaerobnih digestora mogu biti jednostupanjski i višestupanjski. Iako je jednostupanjska obrada neučinkovitija, ona je najčešće korištena metoda zbog svoje jednostavnosti i primjenjivosti. Tradicionalni jednostupanjski digestori često su veći te zahtijevaju više energije za miješanje i zagrijavanje biomase nego dvostupanjski digestori. Međutim, njihova jednostavnost i primjenjivost ih profilira u najčešći dizajn bioreaktora s obzirom na broj stupnjeva. Jednostupanjski digestori imaju osnovni dizajn i manja je vjerojatnost kvara zbog tehničkih problema. S druge strane, imaju duže vrijeme zadržavanja i stvaraju više pjene i više mulja, što može dovesti do komplikacija u procesu digestije. Dvostupanjski i višestupanjski sustavi razvijeni su kako bi se osigurali optimalni uvjeti za različite skupine mikroorganizama uključenih u razgradnju, što rezultira većim brzinama reakcije, a time i većom proizvodnjom bioplina.

Proizvodnja bioplina u anaerobnim digestorima nije nova tehnologija, ali je tehnologija koja se u zadnjih desetak godina raširila diljem svijeta. Neki od načina pridobivanja bioplina iz anaerobnih digestora, kao i njihov konstrukcijski dizajn već su nabrojani i objašnjeni. Međutim, u praksi postoje razni tipovi bioreaktora koji se mogu konstruirati kombinacijom više tipova digestora. Niti jedna specifična vrsta anaerobnog digestora ne može se smatrati prikladnom za univerzalnu upotrebu.

### 4.3. Digestat

Digestat čine kombinirane tekuće i čvrste frakcije, preostale nakon procesa anaerobne digestije. Čvrsti dio sastoji se od neprobavljene sirovine i mikrobne biomase nastale kao rezultat rasta u digestoru. Anorganski sadržaj u digestatu je isti kao i kod sirovine koja je bila supstrat prije fermentacije odnosno, iste su razine kalija, fosfora i dušika, budući da većina gubitka mase dolazi od organske razgradnje, odnosno razgradnje ugljika. Kemijski sastav varira, prvenstveno zbog različitih čimbenika prilikom svake digestije, ali uobičajeno uključuje visoke udjele celuloze, lignina i nešto proteina. Zbog zadržane hranjive vrijednosti

najčešće se koristi kao gnojivo, iako je primjena u određenim područjima ograničena (NREL, 2022). Široka primjena digestata prikazana je na Slici 4-18.



**Slika 4-18.** Grafički prikaz širine primjene digestata (NREL, 2022)

Omjer kruto-tekuće kod digestata nakon procesa anaerobne digestije najviše ovisi o ulaznom supstratu i ima veliki utjecaj na dizajn, rad i troškove rukovanja digestora. Općenito, anaerobna digestija se može okarakterizirati kao "mokra" (<10% ukupnih krutih tvari), "polusuha" (10%-15% ukupnih krutih tvari) ili "suha" (>15% ukupnih krutih tvari). S digestatom u kojem dominira kruta faza može se rukovati u manjim digestorima uz niže kapitalne troškove, a nizak sadržaj vlage u digestatu znači manji volumen za transport i preradu. S druge strane, miješanje je lakše kod digestata s većim sadržajem vode, a za njegov transport se mogu koristiti pumpe. Veći sadržaj vode također osigurava niže koncentracije lakih masnih kiselina i amonijaka u usporedbi s visokim udjelom krutine, pružajući bolje uvjete za metanogene bakterije. Na Slici 4-19 prikazan je izgled digestata nakon anaerobne digestije.



**Slika 4-19.** Digestat nakon anaerobne digestije (Hofmann, 2021.)

Održavanje optimalnog omjera kruto/tekuće zahtjeva separaciju digestata na krutu i tekuću fazu, odnosno odvodnjavanje. Odvodnjavanje, također poznato i kao ugušćivanje, je glavna operacija obrade digestata nakon anaerobne digestije. Procesi koji se koriste za separaciju digestata na krutu i tekuću fazu uključuju (NREL, 2022):

- taloženje,
- mikrobnu ili kemijsku flokulaciju i/ili koagulaciju,
- centrifugiranje,
- kemooksidaciju ili elektrooksidaciju,
- zakiseljavanje,
- sušenje zrakom,
- hidrotermalnu obradu,
- ultrazvuk,
- elektrokemijsko taloženje,
- prešanje i
- filtraciju.

Najčešća uporaba digestata je primjena na tlu. Digestat ima visoku vrijednost gnojiva, a organski sadržaj koristan je u obnavljanju zemljišta s kojih je gornji sloj tla uklonjen, poput rudarskih lokaliteta i iskrčenih šuma. Manje primjene uključuju kompost, gnojivo za dom i vrt, malč za uređenje krajolika, pa čak i kao ekološki prihvatljive razgradive žardinjere.

Krutine digestata iz otpada hrane obrađuju se na sličan način. Primarno ograničenje za kopnenu primjenu su troškovi prijevoza pa se primjena samog digestata najčešće provodi u blizini mjesta proizvodnje. Nakon što se proizvede količina digestata potrebna na nekom području, sav višak se transportira na drugu lokaciju ili se upotrebljava na drugi način. (NREL, 2022).

Kemijski sastav digestata varira, a o njemu ovise karakteristike za gnojenje. Ovisno o procesu anaerobne digestije, digestat može biti bogatiji ili siromašniji količinom dušika i fosfora koji su bitni prilikom gnojenja. Kod digestata koji je bogat dušikom i fosforom može se specifičnim uklanjanjem hranjivih tvari ukloniti amonijak (dušik) i struvit (fosfor) kako bi se proizvelo gnojivo s ujednačenom koncentracijom dušika i fosfora. Također, ponekad je potrebno i oplemenjivanje digestata amonijakom i struvitom kako bi se dobilo gnojivo zadovoljavajuće kvalitete. Dokazano je da koncentriranje i kasnija obrada u procesu troše približno 10% ukupne energije koju proizvede anaerobni digester. Budući da su fosfor i dušik glavne komponente u mnogim digestatima, postoji veliki interes za industrijski oporavak ovih resursa iz više razloga. Koncentrirani fosfor i amonijak mogu se koristiti kao gnojivo i transportirati u udaljena područja koja su osiromašena fosforom i dušikom (NREL, 2022).

#### *4.3.1. Izravno gorivo*

Krutine iz digestata, a potencijalno i digestat otpadne hrane, može se koristiti kao gorivo na više načina. Nakon sušenja, krutina se može spaliti izravno, obično u spalionici, stvarajući toplinu i potencijalno energiju. Slično spaljivanju, zajedničko izgaranje krutina u postojećim elektranama na ugljen ili biomasu daje energiju iz digestata i iskorištava postojeću infrastrukturu za izgaranje, proizvodnju i kontrolu emisija. Veliki potencijal je suspaljivanje krutina iz digestata u cementnim pećima. Trenutno je to nova praksa u Europi te predstavlja iskorak u gospodarenju odlaganja i primjene krutina iz digestata, zamjene fosilnih goriva koja se koriste u proizvodnji cementa i miješanja dobivenog pepela u cement.

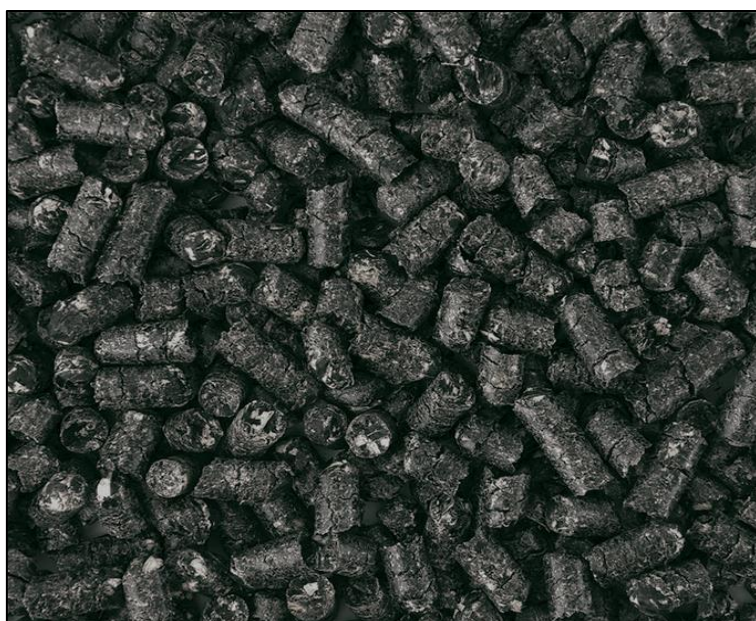
Biogorivo u obliku peleta (Slika 4-20) dobiva se dodatnim isušivanjem digestata i kao gorivo se koristi zajedno s ugljenom ili drvenim peletima. Međutim, dugo godina nije bilo komercijalno prihvaćeno. Suspaljivanje s tradicionalnim gorivima je učinkovito, ali komercijalna implementacija nije provedena u većem opsegu. Glavna prepreka je visoka cijena odvajanja krute i tekuće faze u digestatu, a proces isušivanja je presudan u proizvodnji biogoriva u obliku peleta. U manjim postrojenjima za proizvodnju bioplina i digestata, teško



je ostvariti ekonomičnu proizvodnju peleta zbog njihove male količine. Međutim, veliki komunalni objekti mogu znatno smanjiti ovaj trošak. Uz visoku ogrjevnu vrijednost, prednost ovog procesa je u tome što se fosfor može izdvojiti u pelete. Kada se spali, dobiveni pepeo s visokim sadržajem fosfora može se koristiti u proizvodnji gnojiva. Peleti digestata (Slika 4-21) se također mogu koristiti kao gnojivo, ali, pokazalo se da u tom slučaju stvaraju značajne emisije dušikovog oksida (NREL, 2022).



**Slika 4-20.** Biogorivo u obliku peleta dobiveno iz komunalnog otpada (Zafar, 2022)



**Slika 4-21.** Peleti dobiveni anaerobnom digestijom iz otpada namijenjeni za fertilizaciju (Fletcher, 2014)

#### 4.3.2. Neizravno gorivo

Tekući koncentrat koji nastaje separacijom digestata može se neizravno koristiti na više načina. Jedan od načina je obogaćivanje i pospješivanje rasta algi koje se kasnije koriste kao sirovina za biogorivo.

Također, nedavno zanimanje za preusmjeravanje ugljika iz bioplina prema tekućim gorivima i proizvodima naginje prema proizvodnji alkohola. Odvajanje lakih masnih kiselina iz središta pomoću mehaničkih, fizičkih, elektrokemijskih ili drugih sredstava oponaša metanogenezu i omogućuje nastavak hidrolize, acidogeneze i acetogeneze uz pružanje toka lakih masnih kiselina veće vrijednosti koje služe kao kemijske sirovine za katalitičku ili biološku nadogradnju do ugljikovodičnog goriva, više alkohole ili druge bioproizvode (NREL, 2022).

Tekuća frakcija digestata sadrži i topive spojeve i vodu. Aerobna obrada vode često se koristi za biološko "sagorijevanje" otopljenih organskih tvari u otpadnoj vodi kako bi oksidacijom prešli u CO<sub>2</sub>. U kombinaciji s taloženjem i filtracijom te drugim koracima obrade, može se proizvesti pitka voda i voda za navodnjavanje. Isto tako, koncentrat se također može reciklirati natrag u proces anaerobne digestije kako bi se osigurala procesna voda ako je potrebno.

Biokrutine se mogu transformirati u tekuća i plinovita goriva pomoću toplinske ili termokatalitičke obrade. Piroliza, uplinjavanje i hidrotermalno ukapljivanje predloženi su načini pretvaranja biokrutina u takve proizvode, ali piroliza zaostaje u razvoju tehnologije. Primarne razlike između ovih tehnologija su u korištenim parametrima (vlaga, temperatura i tlak), koji određuju nastale produkte, udio svakog od njih i stupanj pretvorbe.

Procesom uplinjavanja (pri temperaturi višoj od 800°C, uz prisutnost malo O<sub>2</sub>) proizvodi se općenito sintetički plin (CO i H<sub>2</sub>) i katran (Slika 4-22), koji je glavni problematični nusproizvod. Biokrutine se također prvo moraju sušiti. Procesom piroliza (temperature od 400°C do 600°C, bez O<sub>2</sub>) proizvode se uglavnom H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, bioulje i ugljen. Piroliza zahtijeva nisku vlažnost, srednje temperature i niže tlakove u usporedbi s hidrotermalnim ukapljivanjem, za koje su karakteristične niže temperature, ali viši tlak i može podnijeti velike količine vode (NREL, 2022).





**Slika 4-22.** Katran kao nusprodukt (Richardson, 2013)

Hidrotermalna obrada toplinski je proces koji pretvara organski otpad u nekoliko goriva, a to je prvenstveno bio-ulje (*engl. bio-oil, bio-crude*), sintetički plin i vodik. Biougljen se također proizvodi i može se koristiti kao sredstvo za poboljšanje tla, odnosno kao gnojivo i mehanizam za vezivanje ugljika. Pokazalo se da biougljen povećava proizvodnju metana u digestorima s visokim udjelom krutine, potičući interakciju mikroba i povećavajući frakcijski sadržaj metana adsorpcijom CO<sub>2</sub>.

Kao dodatak tlu, biougljen može osigurati sporo otpuštanje fosfora i pomoći izdvajanju dušika. Naposljetku, brojne su studije ispitivale upotrebu biougljena za adsorpciju metala, hranjivih tvari i kontaminanata iz digestata.

Proces termokatalitičke promjene koji razvija Europska unija u svom projektu „*TO-SYN-FUEL*“ koristi osušene biokrutine kao sirovinu, ali digestat otpadne hrane također bi trebao biti prihvatljiv. Primarni proizvodi termokatalitičke promjene su sintetički plin, bio-ulje i vodik.

Hidrotermalna obrada obrađuje mokri organski materijal, jer je voda dio reakcije, a može se podijeliti na hidrotermalno ukapljivanje (od 200°C do 400°C) i hidrotermalnu karbonizaciju (od 180°C do 250°C). Hidrotermalno ukapljivanje proizvodi bioulje, sintetički plin i biougljen, dok hidrotermalna karbonizacija proizvodi uglavnom CO<sub>2</sub> i biougljen (Slika 4-23). Za bilo koji od ovih procesa, sintetički plin se može spaliti izravno ili koristiti za proizvodnju goriva poput dizela. Bioulje također može sagorijevati u teškim motorima ili se može rafinirati u dizel, mlazna goriva i goriva slična benzinu. Bioulje općenito zahtijeva čišćenje i obradu prije upotrebe i nije optimalno za standardne motore s unutarnjim

izgaranjem, iako se to može riješiti različitim dizajnom motora. Voda dobivena iz bilo kojeg procesa može se ponovno obraditi u postrojenju za obnovu vodnih resursa ili vratiti u digestor (NREL, 2022).



**Slika 4-23.** Biougļjen (Spears, 2018)

#### *4.3.3. Ostala primjena*

Nakon odvodnjavanja i sušenja, digestat se često koristi kao podstiv za stoku. Drugi primjeri uključuju korištenje digestata otpadne hrane za uzgoj jestivih gljiva. Također, moguće je proizvoditi i građevinski materijal poput fiber-ploča srednje gustoće (NREL, 2022).

## 5. OBRADA BIOPLINA I BIOMETAN

Proizvedeni se bioplin, kao produkt anaerobne digestije, može izravno i bez dodatne obrade koristiti za:

- pogon i grijanje kotlova i digestora,
- kogeneraciju toplinske i električne energije te
- izravnu pretvorbu u električnu energiju pomoću: motora s unutrašnjim izgaranjem, gorivnih članaka te plinske turbine, pri čemu se dobivena električna energija koristi „in situ“ ili šalje u strujnu mrežu (EESI, 2017)

Jedino bi velika koncentracija sumporovodika mogla biti razlog dodatne obrade bioplina prije no što bi se bioplin koristio kao energent navedenih zadaća.

Sve ostale energetske aktivnosti koje inače koriste prirodni plin kao energent nisu ostvarive s neobrađenim bioplinom. Za aktivnosti poput stlačivanja (CNG), ukapljivanja (LNG), pogona osobnih vozila, transporta plinskom mrežom, grijanje kućanstva te „miješanje“ s konvencionalnim prirodnim plinom potrebno je obraditi bioplin u biometan.

U Tablici 5-1 su prikazani i uspoređeni uobičajeni udjeli određenih komponenti u bioplinu, biometanu i konvencionalnom prirodnom plinu. Shodno navedenoj tablici, moguće je zaključiti da se prilikom obrade bioplina najviše potrebne obrade koncentrira na izdvajanje kiselih plinova i sumpora te na dehidraciju bioplina.

**Tablica 5-1.** Tablični prikaz sastava bioplina, biometana i prirodnog plina te volumnih udjela određenih komponenti u navedenim plinovima (Sinaga, 2018)

<i>Sastav plina</i>	Bioplin	Biometan	Prirodni plin (u mreži)
Metan	45 – 60%	94 – 99,9%	93 – 98%
Ugljikov dioksid	40 – 60%	0,1 – 4%	1%
Dušik	2 – 5%	0 – 3%	1%
Kisik	0,1 – 1%	0 – 1%	-
Vodik	0 – 0,2%	U tragovima	-
Sumporovodik	0 – 0,5% (<5000 ppm)	0 – 0,001% (<10 ppm)	-
Amonijak	0,1 – 1%	U tragovima	-

Etan	-	-	0 – 3%
Propan	-	-	0 – 2%
Siloksani	U tragovima	-	-
Voda	2 – 7%	-	-

### 5.1. Izdvajanje kiselih plinova i sumpora iz bioplina

Obrada bioplina u biometan prvenstveno se bazira na uklanjanju ugljikovog dioksida koji čini do 60% bioplina. Također, izdvaja se i sumporovodik kao vrlo štetna komponenta bioplina koja se ponekad pojavljuje u vrlo velikim koncentracijama. Danas se za izdvajanje ugljikovog dioksida i sumporovodika koriste različite metode (Vrbova i Ciahtony, 2017).

Kod izdvajanja ugljikovog dioksida, među najčešće korištenim tehnologijama su apsorpcija i adsorpcija. Navedeni procesi spadaju u procese indirektno konverzije te se primjenjuju i na izdvajanje kiselih plinova pri obradi konvencionalnog prirodnog plina. Kod odabira metode potrebno je uzeti u obzir: iznos parcijalnog tlaka ugljikovog dioksida, prisustvo viših ugljikovodika, dobavu, tlak i temperaturu plina te ekonomičnost cijelog procesa.

Proces apsorpcije se temelji na kemijskoj reakciji između kiselih komponenata u plinu i otopine. Kao apsorbeni koriste se vodene otopine amina i anorganskih soli. Apsorpcija se temelji na međudjelovanju plina i otopine u apsorberu pod velikim tlakom te na kasnijoj regeneraciji otopine u niskotlačnom sustavu. Kiseli plinovi se vežu za otopinu te se na taj način povećava udio metana u očišćenom plinu, dok se udio ugljikovog dioksida smanjuje. Nakon procesa u apsorberu, ugrijana zasićena otopina ulazi u desorber te protječe prema dolje i zagrijava se uslijed čega se izdvaja ugljikov dioksid. Ukoliko se koristi tehnologija primjene vodene otopine amina, u slučaju neki konkretnih amina poput MEA i DEA, moguće je zajedno s ugljikovim dioksidom izdvojiti i sumporovodik.

Za izdvajanje ugljikovog dioksida može se primijeniti i adsorpcija pri promjeni. Metoda podrazumijeva korištenje sintetičkih zeolita – molekularnih sita kroz koja prolazi plin zasićen ugljikovim dioksidom. Molekularna sita pritom na sebe vežu ugljikov dioksid. Regeneriraju se propuhivanjem vrućeg zraka. Tipičan sustav sastoji se od četiri komore u nizu koje su napunjene adsorbentom koji je sposoban vezati ne samo ugljikov dioksid već i

vodu paru, dušik i kisik iz bioplina. Proces adsorpcije odvija se kroz četiri faze: povišenje tlaka, adsorpcija, smanjenje tlaka i regeneracija (ANAEROBIC DIGESTION, 2023).

Procesi adsorpcije i adsorpcije su skupi te si ih mogu priuštiti samo veća postrojenja. Ostale tehnologije izdvajanja kiselih plinova uključuju: metodu suhog leda i izdvajanje željeznom vunom (ANAEROBIC DIGESTION, 2023).

Kao tehnologija uklanjanja sumporovodika iz bioplina najčešće se koristi jedna od sljedećih (Rashed Al Mamun i Torii, 2015):

- adsorpcija u tekućinu, ili vodu ili kaustičnu otopinu;
- adsorpcija na čvrste tvari kao što su materijali na bazi željezovog oksida, aktivnog ugljena ili impregniranog aktivnog ugljena i
- biološka pretvorba kojom se spojevi sumpora pretvaraju u elementarni sumpor pomoću mikroorganizama koji oksidiraju sulfide uz dodatak zraka, odnosno kisika .

## 5.2. Izdvajanje vode iz bioplina (dehidracija)

Dehidracija (sušenje) je nužan korak obrade prije no što se bioplin počne koristiti. Sušenje plina završni je korak u optimizaciji bioplina kao izvora goriva i poboljšanju njegove korisnosti u različitim primjenama. Bioplin sadrži značajne količine vlage, što ga čini neprikladnim za neposrednu upotrebu. Što je veći sadržaj vlage, niža je kalorijska, odnosno toplinska vrijednost (COLD, 2023).

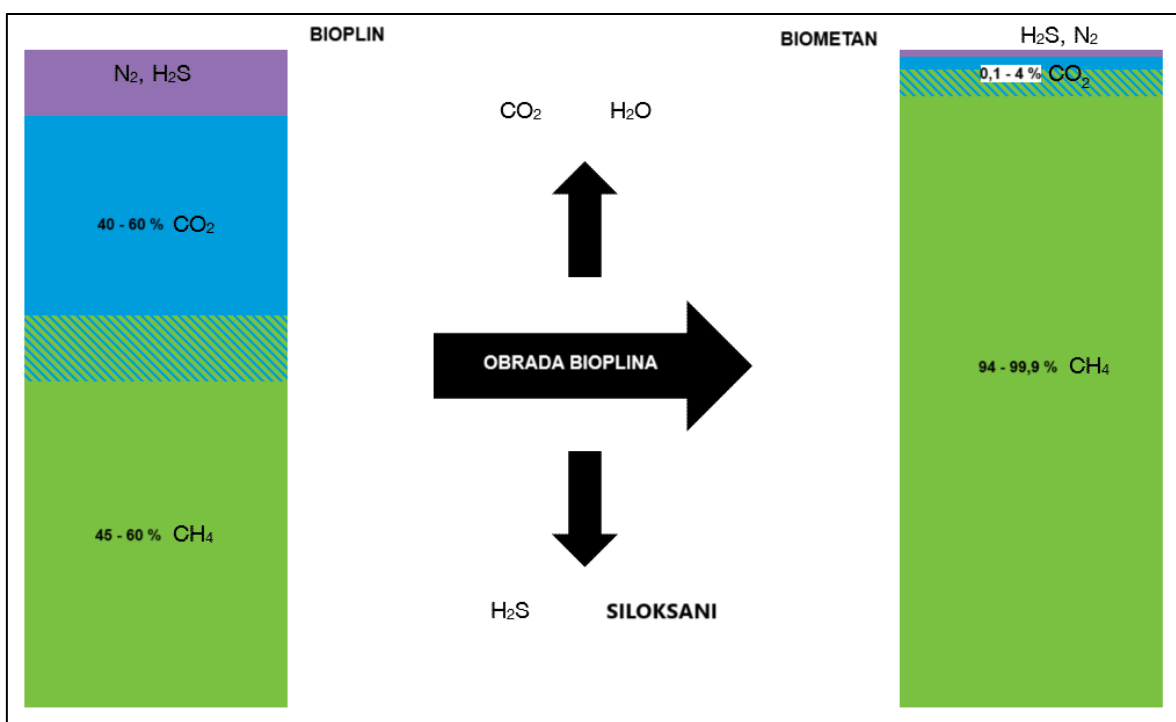
Proces dehidracije bioplina zahtijeva specijalizirane izmjenjivače topline i rashladne sustave za pravilno uklanjanje viška vlage. Koristi se nekoliko konfiguracija sustava za sušenje plina, ali temeljni proces je jednak u svakome od njih.

Bioplin proizveden na odlagalištima otpada i digestorima preusmjerava se u rashladno postrojenje koje se sastoji od izmjenjivača topline i rashladne jedinice. Najčešće korištene varijante industrijskih rashladnih uređaja su modeli hlađeni zrakom ili vodom. Hlađenje bioplina unutar sustava za dehidraciju je omogućeno rashladnim sustavom spojenim na izmjenjivač topline u kojem se temperatura bioplina bitno smanjuje. Jedinica za hlađenje spojena na postrojenje za sušenje smanjuje temperaturu bioplina, što rezultira kondenzacijom vlage koja u obliku kapljica pada u sabirne spremnike. U međuvremenu,

osušeni bioplin nastavlja dalje u zasebne komore za skladištenje ili ide u direktnu upotrebu (COLD, 2023).

### 5.3. Biometan

Nakon obrade, udio metana u sastavu bioplina se povećava na više od 94%. Takav se bioplin naziva biometan, u stranoj literaturi poznat kao „*biomethane*“ ili „*renewable natural gas, RNG*“. Za razliku od bioplina, biometan ima veći udio metana, veću ogrjevnu vrijednost i koncentraciju nečistoća u tragovima. Bioplin se tek nakon dodatne obrade u biometan može priključiti na plinsku mrežu ili primijeniti u vozilima koja koriste plinske motore. Na Slici 5-1 prikazan je grafički pojednostavljeni prikaz obrade bioplina u biometan te udjeli pojedinih komponenti sastavu.



**Slika 5-1.** Grafički prikaz obrade bioplina u biometan (CLARKE ENERGY, 2023)

Biometan se može koristiti i u plinskim turbinama namijenjenima za pokrivanje vrše potrošnje. Budući da je obnovljivo gorivo, biometan se koristi za proizvodnju električne energije u periodu visoke potražnje, odnosno za uravnoteženje električne mreže. Na taj način, u kombinaciji s proizvodnjom energije iz ostalih obnovljivih izvora, teoretski je moguće u potpunosti zadovoljiti potrebe za energijom isključivo obnovljivim izvorima.

## 6. ZAKLJUČAK

Proizvodnja bioplina na odlagalištima komunalnog otpada i bioplina nastalog anaerobnom digestijom u bioreaktorima ima potencijal uvelike pridonijeti poboljšanju cjelokupnog energetskog sustava. Učinkovitost proizvodnje i primjene bioplina na lokalnoj i globalnoj razini najbolje se očituje u činjenici da se njegovom proizvodnjom i primjenom povećava energetska sigurnost i neovisnost, dok se u isto vrijeme povećava kvaliteta gospodarenja otpadom.

Organiziranim projektiranjem odlagališta komunalnog otpada i izradom potrebne infrastrukture za proizvodnju nastalog bioplina povećava se kvaliteta odlaganja otpada te u isto vrijeme maksimalizira količina proizvedenog bioplina. Postrojenja za proizvodnju bioplina u bioreaktorima pridonose decentralizaciji energetskog sustava, a razne varijante tehnološkog dizajna digestora omogućavaju isplativu proizvodnju bioplina u svim uvjetima okoline. Također, kasnijom obradom i pročišćavanjem bioplina u biometan širi se njegov spektar primjene. Kao takav, biometan može uvelike zamijeniti prirodni plin u mnogim procesima te na taj način smanjiti potrebu za uvozom prirodnog plina.

Također, kao nusprodukt anaerobne digestije nastaje digestat, odnosno sirovina široke primjene koja nakon obrade daje široki spektar produkata. Međutim, gnojivo se ističe kao jedan od najvažnijih i najčešće korištenih načina primjene digestata, a to znači da je proizvodnja bioplina anaerobnom digestijom od velike važnosti za poljoprivredu, ne samo radi zbrinjavanja operativnog otpada prilikom proizvodnje hrane, već i za obogaćivanje tla gnojom.

Proizvodnja i primjena bioplina iz otpada pridonosi energetske samostalnosti, doprinosi borbi protiv klimatskih promjena na način da smanjuje ugljični otisak, povećava kvalitetu gospodarenja otpadom te omogućuje lakšu tranziciju na obnovljive izvore energije.



## 7. LITERATURA

1. AL SEADI, T., RUTZ, D., PRASSL, H., KOTTNER, M., FINSTERWALDER, T., VOLK, S., JANSSEN, R., 2008. Bioplin priručnik.
2. ALZHRANI S., 2017., Effect of Time on Soil-Geomembrane Interface Shear Strength.
3. ANTHONY K. W., MACINTYRE S., 2016. Nocturnal escape route for marsh gas.
4. BANERJEE S., PRASAD N., SELVARAJU S., 2022. Reactor Design for Biogas Production-A Short Review.
5. BAUTISTA J., CALVIMONTES J., 2017. Evaluation of landfill biogas potential in Bolivia to produce electricity.
6. CHARLES W., CORD-RUWISCH R., HO G., COSTA M., SPENCER P. , 2006. Solutions to a combined problem of excessive hydrogen sulfide in biogas and struvite scaling. *Water science and technology*, str. 203-211.
7. DIAMANTIS V., EFTAXIAS A., 2021. Performance of an anaerobic plug-flow reactor treating agro-industrial wastes supplemented with lipids at high organic loading rate.
8. ELREEDY A., TAWFIK A., 2015. Effect of Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from the Dark Fermentation of Petrochemical Effluents Contaminated with Ethylene Glycol.
9. FLETCHER K., 2014. Waste-derived pellet fuel manufacturing facility planned for 2015.
10. HOFMANN P., 2021. *Connections: A Digestate Primer*.
11. HREDOY R. H., SIDDIQUE A. B., AKBOR A., ALI SHAIKH A., RAHMAN M., 2022. Impacts of Landfill Leachate on the Surrounding Environment: A Case Study on Amin Bazar Landfill, Dhaka
12. JIANZHENG L., 2013. Diversity and Distribution of Methanogenic Archaea in an Anaerobic Baffled Reactor (ABR) Treating Sugar Refinery Wastewater.
13. KAPARAJU P., ELLEGAARD L., ANGELIDAKI I., 2008. Optimisation of biogas production from manure through serial digestion: lab-scale and pilot-scale studies.

14. MIEHLE M., HACKBARTH M., GESCHER J., HORN H., HILLE-REICHEL A., 2021., Biological biogas upgrading in a membrane biofilm reactor with and without organic carbon source.
15. MOHANTY S., 2020. Eco-friendly approach in Korea's Sudokwon Landfill
16. MUDLAMBUZI T., 2019. Fertiliser value of biogas slurry for maize and dry bean production and its effect on soil quality and carbon dioxide emissions.
17. NABAVI T., 2020. Collection And Processing Landfill Gas Collection System.
18. PATINVOH R. J., 2017. Biological pretreatment and dry digestion processes for biogas production.
19. QUERIO A., NANAVATI C., 2018. Landfill Leachate Collection Systems Reviewing the Basics.
20. RAHAMAN M., 2014. Anaerobic Digestion of Kitchen Waste to Produce Biogas.
21. RAMLI S., 2023. Recent development in sanitary landfilling and landfill leachate treatment in Malaysia.
22. RAMOS-SUÁREZ J. L., 2019. Development of a Modified Plug-Flow Anaerobic Digester for Biogas Production from Animal Manures.
23. RASHED AL MAMUN M., TORII S., 2015. Removal of Hydrogen Sulfide (H<sub>2</sub>S) from Biogas Using Zero-Valent Iron.
24. RICHARDSON M., 2013. Making Birch Bark Tar
25. ROBINSON N., 2017. Landfill methane oxidation techniques.
26. SINAGA N., 2018. Design of Liquefaction Process of Biogas using Aspen HYSYS Simulation.
27. SPEARS S., 2018. What is Biochar?
28. TANIGAWA S., 2017. Biogas: Converting Waste to Energy.
29. TIMOTHY G. T., POWELL J., JAIN P, XU Q., TOLAYMAT T., REINHART D., 2015. Landfill Gas.

30. VRBOVA V., CIAHTONY K., 2017. Upgrading Biogas to Biomethane Using Membrane Separation.
31. YERGIN. D., 2020. The New Map, Energy, Climate, and The Clash of Nations.
32. YONG H., HAIYUAN H., JIANG W., KOBAYASHI T., KAI-QIN X., 2022. Performance Comparison of CSTR and CSFBR in Anaerobic Co-Digestion of Food Waste with Grease Trap Waste.
33. ZAFAR S., 2022. Pelletization of Municipal Solid Waste.

Internetski izvori:

34. AMR, 2021. (URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/landfill-gas-marketA06375>) (20.8.2023.)
35. ANAEROBIC DIGESTION, 2023. (URL: <https://blog.anaerobic-digestion.com/how-to-eliminate-co2-from-biogas/>) (10.9.2023.)
36. ATARFIL, 2022. (URL: <https://www.atarfil.com/en/application/landfills-liner-geomembrane/>) (12.9.2023.)
37. ATSDR, 2001. (URL: <https://www.atsdr.cdc.gov/hac/landfill/html/ch2.html>) (20.8.2023.)
38. BEKON, 2011. (URL: <https://www.bekon.eu>) (25.8.2023.)
39. CHAMP LANDFILL, 2016. (URL: <https://www.champlandfill.com/news/article/landfill-gas-wellfield-expansion-893/>) (7.9.2023.)
40. CLARKE ENERGY, 2023. (URL: <https://www.clarke-energy.com/applications/biomethane-renewable-natural-gas-rng/>) (19.9.2023.)
41. CLIMATE SEED, 2022. (URL: <https://climateseed.com/blog/biogas-and-biodigesters-what-are-they>) (12.9.2023.)
42. COLD, 2023. (URL: <https://waterchillers.com/blog/post/biogas-chilling-dehydration-process>) (12.9.2023.)
43. ČISTOĆA, 2023. (URL: <https://cistocarijeka.hr/projekti/postrojenje-za-proizvodnju-elektricne-energije-iz-odlagalishnog-plina/>) (12.9.2023.)

44. DARBY D., 2016. (URL: <https://www.lowimpact.org/posts/home-made-biogas-anaerobic-digester>) (10.9.2023.)
45. DCMP, 2021. (URL: <https://dcmp.org/media/15292-overview-how-five-billion-pounds-of-las-vegas-garbage-powers-a-city>) (20.9.2023.)
46. EBA, 2023. (URL: <https://www.europeanbiogas.eu/about-biogas-and-biomethane/>) (10.9.2023.)
47. EEA, 2023. (URL: <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/biogas>) (10.9.2023.)
48. EESI, 2017. (URL: <https://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-biogasconverting-waste-to-energy>) (11.9.2023.)
49. ENVIRONMENTAL ENERGY RESEARCH, 2021. (URL: <https://www.eeer.org/upload/eer-2019-343.pdf>) (8.9.2023.)
50. EPA, 2023. (URL: <https://www.epa.gov/anaerobic-digestion/basic-information-about-anaerobic-digestion-ad>) (19.8.2023.)
51. GOOGLE MAPS, 2023. (URL: <https://www.google.com/maps/@45.5105595,18.6829408,11z?entry=ttu>)
52. GRAD SPLIT, 2021. (URL: <https://split.hr/gradska-uprava/gradski-projekti/detalj-projekta/sanacija-odlagalista-komunalnog-otpada-karepovac>) (19.9.2023.)
53. HAOP, 2020. (URL: [https://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/dokumenti/021\\_otpad/Izvjesca/komunalni/OTP\\_2020\\_IZVJE%C5%A0%C4%86E\\_ODLAGALI%C5%A0TA\\_web.pdf](https://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/dokumenti/021_otpad/Izvjesca/komunalni/OTP_2020_IZVJE%C5%A0%C4%86E_ODLAGALI%C5%A0TA_web.pdf)) (19.9.2023.)
54. NREL, 2022. (URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/81676.pdf>) (2.9.2023.)
55. SOLAREYES, 2023. (URL: <https://solareyesinternational.com/benefits-of-owning-a-biogas-digester-for-your-home/>) (3.9.2023.)
56. STATISTA, 2019. (URL: <https://trashcansunlimited.com/blog/biggest-landfill-in-the-world/>) (17.9.2023.)
57. ZAGREBAČKI HOLDING, 2023. (URL: <https://www.cistoca.hr/gospodarenje-otpadom-8/plinsko-postrojenje/4208>) (17.9.2023.)

58. ZORG, 2023. (URL: <https://zorg-biogas.com/production-technology>) (20.8.2023.)

## IZJAVA

Izjavljujem da sam diplomski rad pod nazivom „Proizvodnja bioplina iz komunalnog otpada“ izradio samostalno na temelju znanja i vještina stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.



---

Jure Romić



KLASA: 602-01/23-01/182  
URBROJ: 251-70-12-23-2  
U Zagrebu, 06.10.2023.

**Jure Romić, student**

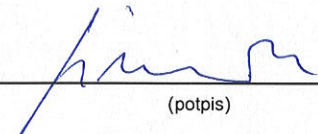
## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/182, URBROJ: 251-70-12-23-1 od 04.10.2023. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### PROIZVODNJA BIOPLINA IZ KOMUNALNOG OTPADA

Za mentoricu ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada prof. dr. sc. Katarina Simon nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i komentoricu dr. sc. Katarina Žbulj.

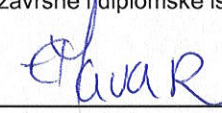
Mentorica:

  
\_\_\_\_\_  
(potpis)

prof. dr. sc. Katarina Simon

\_\_\_\_\_  
(titula, ime i prezime)


Predsjednica povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

  
\_\_\_\_\_  
(potpis)

izv. prof. dr. sc. Karolina  
Novak Mavar


\_\_\_\_\_  
(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

  
.....  
(potpis)

dr. sc. Katarina Žbulj

.....  
(titula, ime i prezime)

  
\_\_\_\_\_  
(potpis)

izv. prof. dr. sc. Borivoje  
Pašić

\_\_\_\_\_  
(titula, ime i prezime)