

Anaerobna digestija biorazgradivog komunalnog otpada

Matić, Patrik

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:726163>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-25**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Patrik Matić

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Slaven Dobrović, dipl. ing.

Student:

Patrik Matić

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem mentoru prof.dr.sc. Slavenu Dobroviću na pruženoj pomoći prilikom izrade diplomskog rada, a posebno na danim savjetima napisanim iz bolničkog kreveta.

Zahvaljujem direktoru tvrtke Croteh d.o.o., prof.dr.sc. Mariu Panjičku i svim djelatnicima koji su sudjelovali u provedbi laboratorijskih ispitivanja potrebnih za izradu ovog rada.

Zahvaljujem direktoru tvrtke Rappresentanze Industriali Maintenance & Construction Division d.o.o., gospodinu Sanelu Hadžiću na prenesenom znanju i iskustvu iz područja proizvodnje bioplina.

Najveću zahvalu želim iskazati majci Nives i ocu Robiju na razumijevanju i velikoj podršci tijekom studija. Hvala Vam za sve!

Također, hvala djevojci Tei na potpori tijekom studiranja te pomoći pri izradi diplomskog rada i prijateljima koji su studentske dane učinili nezaboravnima.

Patrik Matic



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602-04/21-6/1	
Ur. broj: 15-1703-21	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **PATRIK MATIĆ**

Mat. br.: 0035208573

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Anaerobna digestija biorazgradivog komunalnog otpada**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Anaerobic digestion of biodegradable municipal waste**

Opis zadatka:

Uspostava kružnog gospodarenja otpadom važan je dio europskog zelenog plana kojim se želi postići klimatska neutralnost i poboljšati odnos prema resursima i okolišu. U tom kontekstu, veliku ulogu ima ispravno postupanje s biorazgradivim otpadom, čime se istovremeno izbjegavaju štete poput emisija stakleničkih plinova i komunalnog nereda, a ujedno stvaraju koristi poput obnovljive energije i nutritivno vrijednog komposta ili digestata.

U okviru diplomskog rada je potrebno obraditi sljedeće:

1. Uvodno obrazložiti važnost i načine postupanja biorazgradivim otpadom.
2. Idejno razraditi postrojenje za anaerobnu digestiju za odabrano područje u Republici Hrvatskoj.
3. U idejnu razradu uključiti opis procesa, dimenzioniranje glavne opreme, bilancu mase i energije, dijagram toka i osnovnu tehnološku shemu.
4. Proračunati financijsku isplativost sustava, sa i bez eksternalija.
5. Posebno utvrditi utjecaj udaljenosti transporta na rentabilnost sustava.
6. Zaključak.

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

Zadatak zadan:
30. rujna 2021.

Rok predaje rada:
2. prosinca 2021.

Predviđeni datum obrane:
13. prosinca do 17. prosinca 2021.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Slaven Dobrović

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	VII
POPIS OZNAKA	VIII
POPIS KRATICA	X
SAŽETAK.....	XII
SUMMARY	XIII
1. UVOD.....	1
1.1. Globalno zatopljenje i staklenički plinovi	1
1.2. Povijesni pregled i pravni kontekst.....	5
1.3. Gospodarenje otpadom	6
1.4. Praksa zbrinjavanja komunalnog otpada u zemljama EU.....	7
2. KOLIČINE I PROBLEMATIKA KOMUNALNOG OTPADA U RH.....	8
2.1. Ciljevi RH.....	8
2.2. Utjecajni parametri na sastav KO	8
2.3. Trendovi proizvodnje otpada u RH.....	9
2.4. Specifična proizvodnja KO	11
2.5. Prikupljanje podataka o otpadu.....	12
2.6. Odlaganje KO	13
2.7. Biorazgradivi KO u RH	13
2.7.1. Računanje količine biorazgradive komponente	14
2.7.2. Biomasa.....	19
2.8. Manipulacija biorazgradivim otpadom	21
3. PROCES DOBIVANJA BIOPLINA POSTUPKOM ANAEROBNE DIGESTIJE (AD) 23	
3.1. Otkriće i razvoj proizvodnje bioplina	23
3.2. Osnove procesa AD	23
3.2.1. Hidroliza	24
3.2.2. Acidogeneza.....	25
3.2.3. Acetogeneza.....	25

3.2.4. Metanogeneza	26
3.3. Procesni parametri AD.....	27
3.4. Supstrat za AD u bioplinskom postrojenju	30
3.5. Bioplin.....	33
4. POSTROJENJE ZA PROIZVODNJU BIOMETANA PROCESOM ANAEROBNE DIGESTIJE.....	35
4.1. Predobrada	35
4.2. Pred-digestor	38
4.3. Digestor.....	41
4.4. Post-digestor.....	48
4.5. Dekantiranje – sustav isušivanja digestata.....	50
4.6. Pročišćavanje otpadnih voda.....	52
4.7. Aerobno kompostiranje.....	53
4.8. Sustav grijanja.....	54
4.9. Pročišćavanje bioplina	55
4.10. Pобољшanje bioplina.....	57
5. STUDIJA SLUČAJA – BIOPLINSKO POSTROJENJE	60
5.1. Otpad u Istarskoj županiji	60
5.2. Odabir lokacije postrojenja	61
5.3. Transport otpada	62
5.4. Laboratorijsko ispitivanje bioplinskog potencijala biootpada	64
5.5. Proračun idejnog rješenja bioplinskog postrojenja na području Istre	66
5.5.1. Postrojenje kapaciteta 15.000 t/god biootpada (P1).....	73
5.5.2. Postrojenje kapaciteta 50.000 t/god biorazgradivog KO (P2)	76
5.6. Usporedba proračunskih slučajeva i odabir	79
5.7. Financijska analiza odabranog slučaja (P1).....	80
5.7.1. Financijska analiza odabranog slučaja (P1) bez eksternalija	81
5.7.2. Financijska analiza odabranog slučaja (P1) s uračunatim eksternalijma	84
5.8. Ukupno smanjenje emisija CO ₂ (P1)	86
5.9. Posljedice izgradnje bioplinskog postrojenja.....	87
5.9.1. Prednosti	87
5.9.2. Nedostaci.....	87
6. ZAKLJUČAK.....	88

LITERATURA.....	89
PRILOZI.....	93

POPIS SLIKA

Slika 1.	Prosječne koncentracije glavnih stakleničkih plinova na globalnoj razini [1].....	1
Slika 2.	Sustav kruženja neutralnog CO ₂	3
Slika 3.	Trendovi i ciljevi emisija stakleničkih plinova u EU [4]	4
Slika 4.	Grafički prikaz prekomjernog povećanja količine CO ₂ u atmosferi nakon industrijske revolucije [2].....	5
Slika 5.	Količine proizvedenog KO u EU po stanovniku [12]	7
Slika 6.	Količine nastalog otpada u RH po godinama [14]	10
Slika 7.	Trendovi odvojenog prikupljanja otpada po godinama [14]	10
Slika 8.	Kretanje specifične proizvodnje KO u RH po godinama [14]	12
Slika 9.	Usporedba nastalog i odloženog KO u RH za 2020. godinu sa željenim vrijednostima [14]	14
Slika 10.	Sastav sirovine.....	16
Slika 11.	Dijagram tijeka provedbe ispitivanja sastava otpada	19
Slika 12.	Dijagram toka razgradnje organske materije tijekom procesa AD	24
Slika 13.	Transformacije tijekom hidrolize	25
Slika 14.	Transformacije tijekom metanogeneze	26
Slika 15.	Ovisnost prinosa bioplina o temperaturnoj zoni.....	28
Slika 16.	Spremnik za sakupljanje biootpada iz kućanstava (20 01 08).....	32
Slika 17.	Dijagram tijeka pretvorbe sirovine u konačni proizvod - biometan.....	33
Slika 18.	Trgač vrećica u radu [29]	36
Slika 19.	Ukrcavanje sirovine u usipni lijevak [29]	36
Slika 20.	Turbo separator [29].....	37
Slika 21.	Filtar teške frakcije (pjeskolov) [29]	38
Slika 22.	Potopna miješalica [30]	39
Slika 23.	Bio-macerator [31]	40
Slika 24.	Lobi pumpa [29].....	41
Slika 25.	Nanošenje epoksidnog premaza na unutarnju stijenku digestora [29]	42
Slika 26.	Vertikalna miješalica u digestoru [29]	43
Slika 27.	Kontrolno okno integrirano u nosač miješalice [29]	45
Slika 28.	ATEX oznaka [29]	45
Slika 29.	Eksplozivna zona bioplina [3]	46

Slika 30.	Oznaka Xn: Štetno po zdravlje.....	46
Slika 31.	Spremnik bioplina [29].....	49
Slika 32.	Sigurnosni ventil spremnika bioplina [29]	50
Slika 33.	Presjek vijčano-ekscentrične pumpe [31].....	51
Slika 34.	Dekanter [29].....	52
Slika 35.	Cijevi izmjenjivača topline u digestoru [29]	55
Slika 36.	Shematski prikaz mokrog odsumporavanja [29].....	57
Slika 37.	Sankeyev dijagram poboljšanja bioplina.....	58
Slika 38.	Membranska tehnologija poboljšanja bioplina [37].....	59
Slika 39.	Schema tro-stupanjskog membranskog sustava poboljšanja bioplina [37].....	59
Slika 40.	Cestovna infrastruktura u Istri [38]	62
Slika 41.	Krivulja $BPP1=400NL/kg$ ST	65
Slika 42.	Krivulja $BPP2=380NL/kg$ ST	65
Slika 43.	Krivulja $BPP3=450NL/kg$ ST	66
Slika 44.	P1 – dijagram tijekom predobrade sirovine.....	74
Slika 45.	P1 – masena bilanca procesa AD	75
Slika 46.	P2 – dijagram tijekom predobrade sirovine.....	77
Slika 47.	P2 – masena bilanca procesa AD	78
Slika 48.	P1 – Udjeli u prihodu	81
Slika 49.	P1 – kumulativni tijek novca.....	83

POPIS TABLICA

Tablica 1. Ukupna količina proizvedenog KO po županijama u RH za 2020. godinu [14]..	11
Tablica 2. Trend pada broja stanovnika RH [15]	12
Tablica 3. Primjer izračuna biorazgradive komponente miješanog KO (20 03 01) [14]	15
Tablica 4. Fizikalno – kemijski parametri otpada s normama za provođenje ispitivanja [17]	18
Tablica 5. Količine odloženog biorazgradivog KO u RH po godinama [14].....	20
Tablica 6. Temperaturne zone procesa AD	27
Tablica 7. Ključni brojevi nekih vrsta otpada pogodnih za proces AD [28].....	31
Tablica 8. Sastav sirovog bioplina [29].....	34
Tablica 9. Količine otpada iz turizma u RH po godinama	60
Tablica 10. Prometne udaljenosti gradova u Istri do Pazina	63
Tablica 11. P1 - Ulazne vrijednosti	73
Tablica 12. P1 – procesne vrijednosti	75
Tablica 13. P1 – izlazne vrijednosti postrojenja.....	76
Tablica 14. P1 – dimenzioniranje glavnih elemenata postrojenja.....	76
Tablica 15. P2 - Ulazne vrijednosti	76
Tablica 16. P2 – procesne vrijednosti	78
Tablica 17. P2 – izlazne vrijednosti postrojenja.....	79
Tablica 18. P1 – dimenzioniranje glavnih elemenata postrojenja.....	79
Tablica 19. Usporedba glavnih proračunskih elemenata za promatrane slučajeve	80
Tablica 20. P1 – investicijski troškovi [29].....	81
Tablica 21. P1 – Financijska bilanca [29]	83
Tablica 22. P1 - Uštede emisija CO ₂	84
Tablica 23. P1 - Usporedba financijskih analiza	85
Tablica 24. P1 - Teoretski ukupno smanjenje emisija CO ₂	86

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

BP-0001 Bioplinsko postrojenje – 3D model

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
BM_{pr}	Nm^3	proizvedeni biometan iz tone biootpada
BPP	NL/kg TS	bioplinski potencijal
d_D	m	promjer digestora
E	kWh	energija
$E_{bioplin}$	kWh/Nm^3	energija normnog kubnog metra bioplina
E_{jed}	kWh	jedinična energija bioplina
f_B	/	koeficijent biorazgradive komponente
G_{jed}	Nm^3	supstituirani utrošak biometana po toni prevezenog biootpada
GPR	$Nm^3/m^3_{digestor}$	stopa prinosa bioplina
h_D	m	visina digestora
HRT	d	vrijeme hidraulične retencije
K	t	godišnji kapacitet postrojenja
m	kg	ukupna masa pojedine vrste KO odloženog na odlagalištu
m_B	kg	masa biorazgradive komponente pojedine vrste KO odloženog na odlagalištima
$m_{digestat}$	kg	masa smjese digestata
m_{H_2O}	kg	masa vode u smjesi digestata
$m_{sirovina}$		masa sirovine u smjesi digestata
m_{ST}	kg	masa suhe tvari
n_d	/	broj dana u pogonu godišnje
n_D	m^3	broj digestora
n_{do}	d	broj dana opskrbe digestora iz pred-digestora
n_i	/	broj ispitivanja
n_R	/	broj relacija
OLR	$kgvs/m^3_{digestat} \times$ dan	stopa organskog opterećenja digestora
P	kW	snaga
$Q_{m, digestat}$	t/d	ukupan dnevni maseni protok u digestor

Q_{m, H_2O}	t/d	dnevni maseni protok vode
$Q_{m, sirovina}$	t/d	dnevni kapacitet postrojenja – maseni protok sirovine
$Q_{m, TS}$	t/d	dnevni maseni protok suhe tvari
$Q_{m, VS}$	t/d	dnevni maseni protok hlapljive suhe tvari
$Q_{v, bioplin}$	Nm ³ /d	dnevni volumni protok bioplina
S	km	udaljenost relacije
SGP	Nm ³ /kg vs	specifična proizvodnja bioplina
S_{sr}	km	prosječna udaljenost relacije
$ST_{x, sirovina}$	%	udio suhe tvari u sirovini
$ST_{x, digestat}$	%	udio suhe tvari u smjesi digestata
t	h	vrijeme
$V_{bioplin}$	Nm ³	ukupni efektivni volumen digestora
$V_{D, uk}$	m ³	ukupni efektivni volumen digestora
V_{D1}	m ³	efektivni volumen jednog digestora
V_{PD}	m ³	efektivni volumen pred-digestora
$VS_{x, sirovina}$	%	udio hlapljive suhe tvari u ukupnoj suhoj tvari sirovine
X_p	%	udio utroška energije za transport

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
AD	anaerobna digestija
AT ₄	respiracijska aktivnost
BDP	bruto domaći proizvod
BPK	biološka potrošnja kisika
BPP	bioplinski potencijal
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CSTR	<i>Continous Stirred - Tank Reactor</i> – digestor s kontinuiranim punjenjem
d	dan
E1	eksternalije 1
E2	eksternalije 2
EK	Europska komisija
EU	Europska unija
FIFO	<i>First In First Out</i>
g	godina
GO	gospodarenje otpadom
h	sat
HAOP	Hrvatska agencija za okoliš i prirodu
HHV	<i>Higher Heating Value</i> – gornja ogrjevna vrijednost
HRT	<i>Hydraulics Retention Time</i> – vrijeme hidraulične retencije
JLS	jedinica lokalne samouprave
KO	komunalni otpad
KPK	kemijska potrošnja kisika
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LEL	<i>Lower Explosive Limit</i> – donja granica eksplozivnosti
LHV	<i>Lower Heating Value</i> – donja ogrjevna vrijednost
N ₂ O	dušični oksid
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NN	Narodne Novine
OLR	<i>Organic Loading Rate</i> – stopa

P1	proračun, slučaj 1
P2	proračun, slučaj 2
PE	polietilen
ppb	<i>parts per billion</i>
ppm	<i>parts per million</i>
PSA	<i>Pressure Swing Adsorption</i>
PTFE	politetrafluoretilen
PUR	poliuretan
PVC	polivinilklorid
RDRI	realni dinamički respiracijski faktor
RH	Republika Hrvatska
SRF	<i>Solid Recovered Fuel</i>
TC	<i>Total Carbon</i> – ukupni ugljik
TOC	<i>Total Organic Carbon</i> – ukupni organski ugljik
TS	<i>Total Solids</i> – ukupna suha tvar
UEL	<i>Upper Explosive Limit</i> – gornja granica eksplozivnosti
UV	<i>ultravioletne</i> - ultraljubičasto
VOC	<i>Volatile Organic Compound</i> – hlapljivi organski spojevi
VS	<i>Volatile Solids</i> – hlapljiva suha tvar
ZOGO	Zakon o održivom gospodarenju otpadom
ŽCGO	županijski centar za gospodarenje otpadom

SAŽETAK

Ovim radom razrađuje se bioplinsko postrojenje za obradu biorazgradivog otpada za područje Istarske županije na idejnoj razini. Prvi dio rada opisuje problematiku zbrinjavanja otpada, kako u Europskoj uniji tako i u Hrvatskoj. Naglasak je na nesrazmjeru između proizvodnje otpada naspram njegove uporabe; prevelike količine otpada bivaju odloženo na odlagalištima umjesto da se odvajanjem na mjestu nastanka ili naknadnom separacijom dobiva čista frakcija, spremna za daljnju obradu i dobivanje proizvoda više vrijednosti poput komposta ili biometana. Središnji dio rada opisuje tehnologiju proizvodnje biometana iz biorazgradivog otpada procesom anaerobne digestije. Navedene su komponente postrojenja uz okvirno dimenzioniranje glavnih elemenata s obzirom na nastale količine otpada na promatranom području te na rezultate laboratorijskih ispitivanja sirovine. Rad je zaključen ekonomskom analizom isplativosti te analizom dobiti bioplinskog postrojenja za komunalni sektor gospodarenja otpadom u cjelini.

Glavna, ali na prvu nevidljiva, dobit uporabe otpada bioplinskim postrojenjem jest kruženje ugljikovih tvari na način da se ne remeti prirodna ravnoteža stakleničkih plinova u atmosferi. Drugim riječima, kružna ekonomija biorazgradivim otpadom pridonosi klimatskoj neutralnosti i zaustavljanju negativnih klimatskih promjena.

Ključne riječi: biometan, bioplin, anaerobna digestija, bioplinsko postrojenje, biorazgradivi otpad

SUMMARY

This paper elaborates a biogas plant for the treatment of biodegradable waste for the area of Istria County at a conceptual level. The first part of the paper describes the waste disposal issue, both in the European Union and in Croatia. The emphasis is put on the disproportion between waste production versus its recovery; excessive amounts of waste are disposed of in landfills instead of being separated at the place of origin or subsequently, to obtain a pure fraction, which is ready for further processing and obtaining higher value products such as compost or biomethane. The central part of the paper describes the technology of biomethane production from biodegradable waste in the process of anaerobic digestion. Components of the plant are listed with an approximate sizing of the main elements in regard to the amount of waste produced in the observed area and the results of laboratory tests of raw materials. The paper concludes with an economic cost-effectiveness analysis and an analysis of the biogas plant's advantages for the municipal waste management sector as a whole.

The main, but at first invisible, benefit of waste recovery by a biogas plant is the circulation of carbon in a way that does not disturb the natural balance of greenhouse gases in the atmosphere. In other words, the circular economy of biodegradable waste contributes to climate neutrality and halting negative climate change.

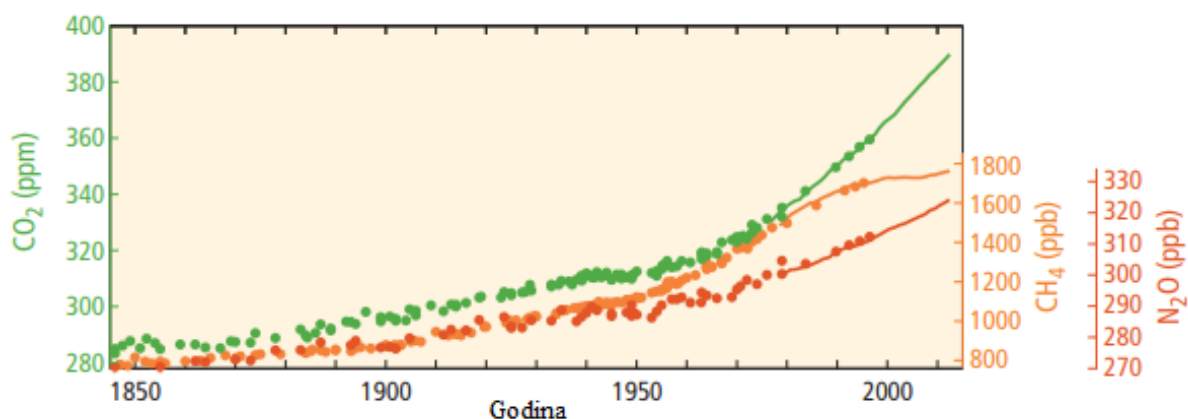
Key words: biomethane, biogas, anaerobic digestion, biogas plant, biodegradable waste

1. UVOD

Kao dio čovječanstva, odgovorni smo svjedoci klimatskih promjena i njihovih negativnih posljedica na okoliš i nas same. Egzaktan razlog nastanka istih dan danas nije potvrđen, no postoji opći konsenzus 90% znanstvenika u svijetu kojim se porast koncentracije stakleničkih plinova u sastavu troposfere, a posljedično i globalno zatopljenje, pripisuje antropogenim aktivnostima [1]. Odgovornost je na svakom pojedincu da posveti dio svojega vremena zaustavljanju klimatskih promjena. Međutim, ekološko je rješenje ponekad neekonomično u usporedbi s ne-ekološkom varijantom. Usprkos navedenom, sve je veći broj direktiva koje ograničavaju stvaranje stakleničkih plinova ili ih ograničavaju na minimalnu razinu, dok su za one koji ih nisu u stanju poštivati, predviđeni financijski penali koji svakog danas sve više rastu.

1.1. Globalno zatopljenje i staklenički plinovi

Najznačajniji plinovi koji pojačavaju učinak stakleničkih plinova su: ugljični dioksid (CO_2) - 81%, metan (CH_4) – 11%, dušični oksid (N_2O) – 5% i ostali u manjoj mjeri. Omjer njihovih količina je prikazan grafom na Slici 1.



Slika 1. Prosječne koncentracije glavnih stakleničkih plinova na globalnoj razini [1]

Značaj stakleničkih plinova leži u činjenici da uzrokuju efekt staklenika u atmosferi Zemlje koji pak funkcionira kao nepovratni ventil za sunčevu energiju i toplinu koju Zemlja prisilno zadržava. Posljedično, temperature vode, tla i zraka su u konstantnom porastu te kao takve mijenjaju ekosustav. Neki od pokazatelja promjena ekosustava prema [2] su:

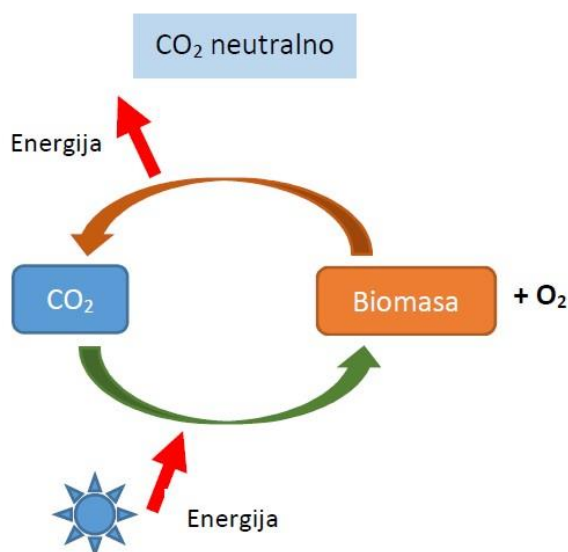
- Globalni porast temperature; prosječna temperatura Zemljine površine narasla je za 1,18°C od kraja 19. stoljeća do danas; najveća stopa zatopljenja je u posljednjih 40 godina, a godine 2016. i 2020. su najtoplije u povijesti mjerenja.
- Zatopljenje oceana; temperatura mora 100 metara ispod razine porasla je za 0,6°C od 1969. godine.
- Smanjivanje ledenjaka; Grenland gubi prosječno 279 milijardi tona leda godišnje prema mjerenjima NASA-e od 1993. do 2019. godine; Antarktika gubi 148 milijardi tona leda godišnje.
- Podizanje razine mora; globalna razina mora je porasla za 20 centimetara u posljednjem stoljeću.
- Porast kiselosti mora; od početka prve industrijske revolucije (kraj 18. stoljeća) po do danas, kiselost morske vode porasla je za 30%, najviše zbog naglog povećanja ispuštenog CO₂ koji stvara kisele kiše koje, kao što je poznato iz ciklusa vode, ponovo vraćaju na tlo i u vode.

Ugljikov dioksid je glavni generator efekta staklenika, ali i glavni nusprodukt gotovo svih aktivnosti ljudi. Međutim, CH₄ je znatno jači na molekularnoj razini od CO₂. Jedan kilogram emitiranog CH₄ u atmosferu, ekvivalentan je 25 kilograma emitiranog CO₂. Nadalje, usporedbe radi, emitiranjem kilograma N₂O u atmosferu utjecaj na globalno zatopljenje je 298 puta veći u odnosu na CO₂. Stoga, jedan vid smanjenja efekta staklenika je usmjerenost na smanjenje emisije CH₄ i N₂O.

Efekt staklenika jest svojstvo atmosfere da zadržava energiju predanu od strane Sunca. Bez njega život za Zemlji ne bi bio moguć jer bi se planet ohladio na temperature u kojima nije moguć opstanak živih vrsta. U slučaju izostanka prirodnog efekta staklenika, prosječna temperatura planete Zemlje bila bi oko -18°C, što je značajno ispod današnjih +15°C. Sunčeva energija ulazi u atmosferu kratkovalnim zračenjem visoke energije kroz ozonski omotač, dok s druge strane taj isti omotač prema van ne propušta dugovalno odbijeno zračenje od Zemlje nego ga reflektira natrag prema planetu. Problem nastaje kada antropogena aktivnost prekomjerno pojača utjecaj staklenika te višak topline ostaje zarobljena u atmosferi čime se posljedično podiže temperatura iznad optimalne vrijednosti [3].

Dušični oksidi dolaze iz raznih procesa izgaranja te iz poljoprivrednog sektora. Metan se pak, za razliku od dušičnih oksida, može dalje upotrijebiti za dobivanje energije zbog svojstva

eksplozivnosti i zapaljivosti. Postrojenja za kontrolirano generiranje biometana se zovu bioplinska postrojenja te predstavljaju primjer kružnog gospodarenja otpadom. Sirovina im prilikom proizvodnje plina može biti, među ostalim, organska frakcija miješanog komunalnog otpada ili pak uzgojena silaža i ostaci organskih poljoprivrednih i stočarskih aktivnosti. Spadaju u obnovljive izvore energije jer nemaju fosilni karakter već potječu od netom izrasle biomase koje je svojim rastom crpila CO₂ iz atmosfere. Primjerice, izgaranjem fosilnih goriva nastaje CO₂ koji je do tada bio zarobljen u zemljinoj kori u obliku nafte, ugljena i plina, daleko ispod površine te kao takav nije uopće utjecao na atmosferske prilike. Spaljivanjem fosilnih goriva se putem ispušnih plinova izravno povećava sadržaj stakleničkih plinova, dok se spaljivanjem biometana generira emisija CO₂ koja se smatra neutralnom u pogledu bilance stakleničkih plinova. Drugim riječima, oslobođeni CO₂ izgaranjem biometana odgovara onome koji je apsorbiran biološkim rastom biljaka. Biljke “ugrađuju” CO₂ u organsku tvar tijekom fotosinteze i tako zatvaraju krucijalan dio ugljikova ciklusa. Fotosinteza je iz tog razloga jedan od najvažnijih procesa na Zemlji jer tim putem pomoću svjetlosne energije i klorofila u biljkama dolazi do stvaranja organske tvari iz CO₂ i vode, uz istovremeno izlučivanje kisika. Pojednostavljeni dijagram kružnog tijeka neutralnog CO₂ prikazuje Slika 2.



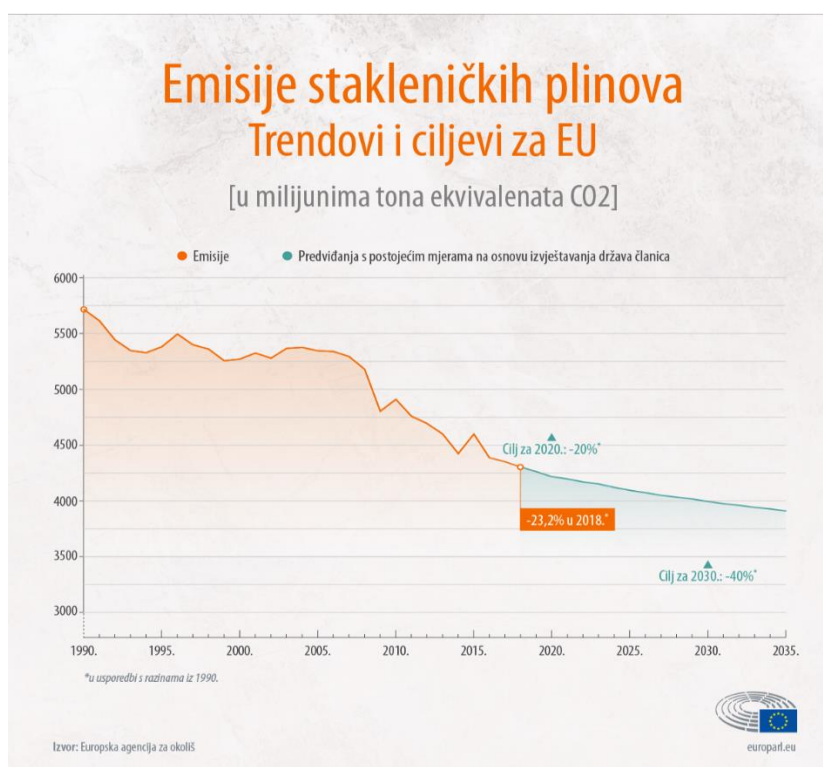
Slika 2. Sustav kruženja neutralnog CO₂

Za rješavanje problema, potrebno je razmišljati i reagirati globalno, što je vidljivo po smjernicama i direktivama Europske unije kojima je cilj postizanje klimatske neutralnosti do 2050. godine. Klimatska neutralnost podrazumijeva smanjenje emitiranja stakleničkih plinova na najmanju moguću razinu.

Potrebno je uzeti u obzir činjenicu kako, na globalnoj razini, oko 41% emitiranog metana ipak dolazi iz prirodnih izvora poput močvara i požarišta, a ostalih 59% ljudskom (antropogenom) aktivnošću. U EU, 53% antropogenih emisija potječe iz poljoprivrede, 26% iz otpada te 19% iz energetskeg sektora. Fokusom na navedene grane, moguće je smanjiti emisiju metana i tako doći do cilja smanjenja globalne promjene temperature za 0,18°C do 2050. godine.

Nadalje, prema planu za klimatske ciljeve EU-a, u energetskeg se sektoru može postići troškovno najučinkovitije smanjenje emisije metana; prvenstveno pri početku proizvodnog procesa naftnih i plinskih djelatnosti. Kvantitativno, najveće smanje emisije antropogenog metana može se postići proizvodnjom bioplina iz poljoprivrednih materija i organskog otpada, no to zahtijeva visoke investicijske troškove, ali je dugoročno isplativo prodajom ili korištenjem proizvedenog biometana [4].

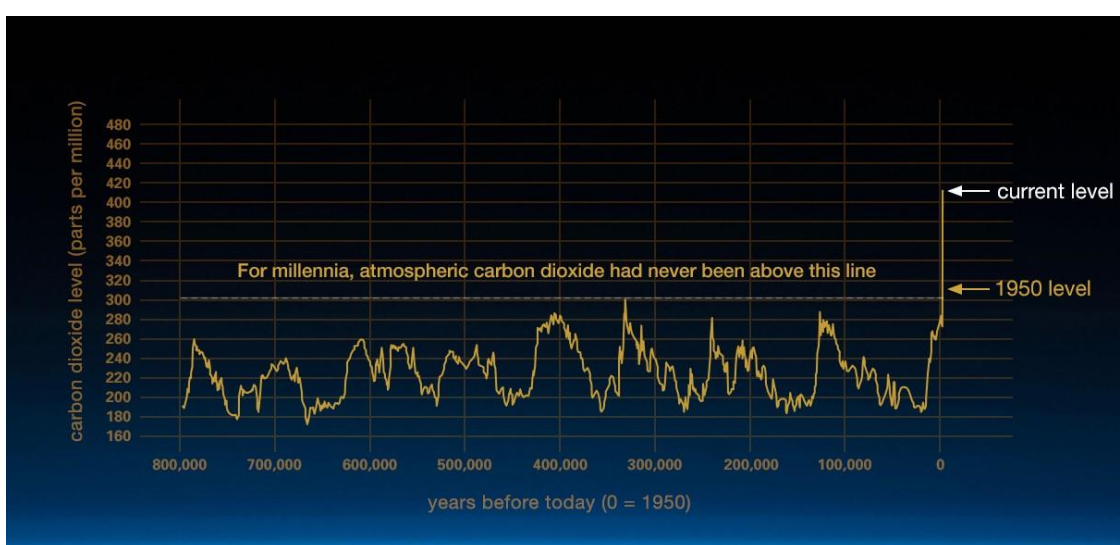
Konkretne mjere smanjenja emisija stakleničkih plinova zaživjele su od 1990. godine, koja se često spominje kao referenca cilja i uspješnosti provođenja mjera. Slijedeći graf koji prikazuje Slika 3 potvrđuje trend pada emisija u Europskoj uniji te daje prikaz željenog trenda u budućnosti do 2030. godine, a to je smanjenje od 40% emisija u odnosu na 1990. godinu [5].



Slika 3. Trendovi i ciljevi emisija stakleničkih plinova u EU [4]

1.2. Povijesni pregled i pravni kontekst

Zemlja je kroz povijest prošla nekoliko razdoblja promjene klime globalnih razmjera koje su uzrokovane prirodnim procesima u unutrašnjosti same zemlje, ali i vanjskim utjecajima, u koje spada i djelovanje čovjeka. Samo u posljednjih 650.000 godina izmijenilo se sedam ciklusa rasta i povlačenja ledenjaka, pri čemu je nagli kraj posljednjeg ledenog doba prije oko 11.700 godina označio početak moderne klimatske ere - i ljudske civilizacije. Većina ovih klimatskih promjena pripisuje se vrlo malim varijacijama u Zemljinoj orbiti koje mijenjaju količinu solarne energije koju naš planet prima [2].



Slika 4. Grafički prikaz prekomjernog povećanja količine CO₂ u atmosferi nakon industrijske revolucije [2]

Smatra se da je čovjekovo djelovanje uzrok značajnijeg povećanja temperature koje je prisutno od 19. stoljeća pa do danas, a započelo je netom nakon pojave industrijske revolucije odnosno industrijske proizvodnje u 18. stoljeću. Ovako se povećanje temperature naziva globalno zatopljenje i posljedica je prvenstveno povećanja količine ugljičnog dioksida (Slika 4) te ostalih stakleničkih plinova u atmosferi zbog sagorijevanja fosilnih goriva, uništavanja šuma, poljoprivrednih aktivnosti i drugih načina ljudskog djelovanja [5].

Pojavom industrijske proizvodnje dolazi do masovnih migracija iz ruralnih u urbana područja te se samim time javlja i pitanje zbrinjavanja otpada. Gomilanje industrijskog i kućanskog otpada predstavljalo je opasnost kako za okoliš, tako i za ljude i njihovo zdravlje. Spomenuto se pitanje nastojalo riješiti spaljivanjem otpada te su prve spalionice otpada izgrađene u

Nottinghamu 1874. godine te 1885. godine u New Yorku. Korištenje otpada kao sirovine za nove proizvode predstavlja začetak modernog recikliranja otpada – para iz spalionica koristila se za pogon strojeva i grijanja, a pepeo se miješao u beton i korišten je za izgradnju nogostupa, od otpadnih masnoća i ulja proizvodilo se sapun i svijeće i slično [6].

Gotovo 100 godina nakon izgradnje prvih spalionica, počelo se pridavati pažnju i međunarodnopravnoj regulaciji otpada i zagađenja te je tako 1979. održana Prva svjetska konferencija o klimi u Ženevi gdje je usvojen Svjetski klimatski program [7]. Za cilj ima odrediti fizičku osnovu klimatskog sustava koja omogućava sve preciznija klimatska predviđanja i projekcije, razvija operativne strukture za pružanje klimatskih usluga te razvija i održava bitan globalni sustav promatranja u potpunosti sposoban zadovoljiti potrebe za informacijama o klimi. Navedeni događaj predstavlja prekretnicu istraživanja o klimi.

Uslijedio je The Earth Summit 1992. godine na kojem je donesena okvirna konvencija Ujedinjenih naroda o promjeni klime te Kyotski protokol iz 1992. godine čiji je cilj bio smanjiti emisije stakleničkih plinova i to njih šest, među koje spada i metan, a upravo je to plin čijom se problematikom bavi ovaj rad [8], [9].

Jedan od novijih dokumenata jest Pariški sporazum koji je stupio na snagu 2016. godine, a riječ je o globalnom sporazumu čiji je glavni cilj jačanje globalne svijesti o opasnosti klimatskih promjena [10].

1.3. Gospodarenje otpadom

Gospodarenje otpadom (u nastavku teksta GO) definira se kao skup aktivnosti, odluka i mjera koje su usmjerene na sprječavanje nastanka otpada te pripremu za ponovnu uporabu i recikliranje, ali u to spadaju i drugi postupci uporabe kao što je npr. energetska uporaba.

Nadalje, GO se mora provoditi na način da ne dovodi u opasnost ljudsko zdravlje i bez uporabe postupaka i/ili načina koji bi mogli štetiti okolišu, a posebice kako bi se izbjegao rizik onečišćenja mora, voda, tla i zraka, pojava buke i neugodnih mirisa, ugrožavanje biljnog i životinjskog svijeta, štetan utjecaj na područja kulturno-povijesnih, estetskih i prirodnih vrijednosti, nastajanje eksplozije ili požara [11].

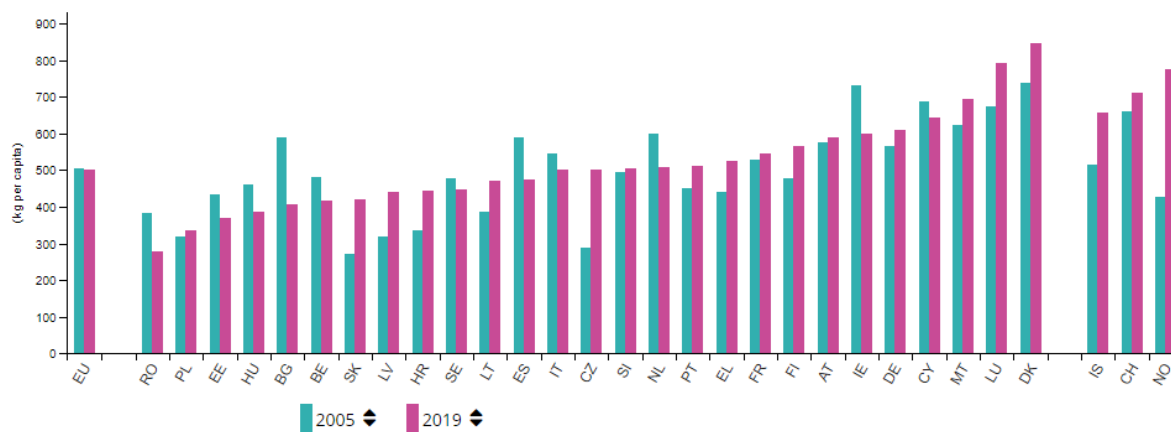
1.4. Praksa zbrinjavanja komunalnog otpada u zemljama EU

Tijekom posljednja dva desetljeća, europske su zemlje u pogledu komunalnog otpada (u nastavku teksta KO) naglasak stavile na metode prevencije njegova nastanka te recikliranje, maknuvši fokus s dotad dominantnih metoda odlaganja spomenutog otpada. Navedeno doprinosi većem udjelu iskorištavanja resursa i smanjenja pritiska na okoliš. Unatoč tome što sam KO zauzima tek oko 10% unutar ukupne količine otpada kojeg proizvodi EU, on je veoma vidljiv te potencijalno opasan zbog velikog broja konstituenata.

Nadalje, važno je spomenuti da Europska unija donosi politike i ciljeve koji vrijede za sve zemlje članice, a među najvažnijima u pogledu KO ističu se ciljevi preusmjerenja odlagališta biorazgradivog komunalnog otpada iz Direktive o odlagalištima (EK, 1999), ciljevi recikliranja iz Direktive o ambalaži i ambalažnom otpadu (EK, 1994) te cilj Okvirne direktive o otpadu (EK, 2008) o recikliranju i pripremi za ponovnu uporabu.

Također, 2015. godine Europska komisija (EK) je predložila nove ciljeve za KO sukladno kojima bi se do 2025. godine trebalo dostići postotak od 60% recikliranja i pripreme za ponovnu uporabu, a 65 % do 2030 godine. Također predloženi su i novi ciljevi za smanjenje KO koji se odlaže na odlagališta te revidirani ciljevi za ambalažni otpad [12].

Slika 5 prikazuje graf ukupne proizvedene količine KO po stanovniku (*per capita*) u zemljama Europske unije od 2005. do 2019. godine.



Slika 5. Količine proizvedenog KO u EU po stanovniku [12]

2. KOLIČINE I PROBLEMATIKA KOMUNALNOG OTPADA U RH

Članstvom u Europskoj uniji, Republika Hrvatska se obavezala preuzeti i provoditi europske pravne stečevine. U sektoru gospodarenja otpadom, pojavile su se rigorozne obveze poput zatvaranja i/ili saniranja sadašnjih neuređenih odlagališta otpada, tendencije smanjenja odlaganja otpada i udjela odloženog biorazgradivog otpada iz miješanog komunalnog otpada. Također, potrebno je povećati infrastrukturu za odvojeno sakupljanje otpada te njegovu obradu, i niz drugih odredbi navedenih u Zakonu o održivom gospodarenju otpadom (NN94/13).

2.1. Ciljevi RH

Republika Hrvatska je dužna slijediti Paket kružnog gospodarstva donesenog od strane EU 2015. godine čiji su glavni elementi:

- recikliranje 65% KO te 80% ambalažnog otpada do 2030. godine
- promoviranje gospodarskih instrumenata za odmak od odlaganja
- poticaji proizvodnje ekološki prihvatljivih proizvoda.

Statistika pokazuje kako su zemlje s uvedenim obaveznim odvojenim prikupljanjem KO postigle visoke stope recikliranja istog. Najbolje se pokazao sustav prikupljanja „od vrata do vrata“ koji podiže stopu recikliranja pa tako i prihoda za izvođače radova. Također, pozitivan trend manipulacije otpadom pospješuje se radom sve većeg broja reciklažnih dvorišta, gdje građanstvo može besplatno predati veće količine otpada. Najbolje rezultate u EU bilježi grad Ljubljana s gotovo 60% odvojeno prikupljenog otpada.

U RH je trenutno aktualan Plan gospodarenja otpadom za razdoblje od 2017. do 2022. godine, koji prema [13] određuje sljedeće ciljeve:

- smanjenje ukupne količine proizvedenog KO za 5%
- odvojeno prikupljanje 60% mase proizvedenog KO
- odvojeno prikupljanje 40% mase proizvedenog biootpada kao sastavnog dijela KO
- odlaganje mase KO smanjiti na manje od 25% proizvedene količine.

2.2. Utjecajni parametri na sastav KO

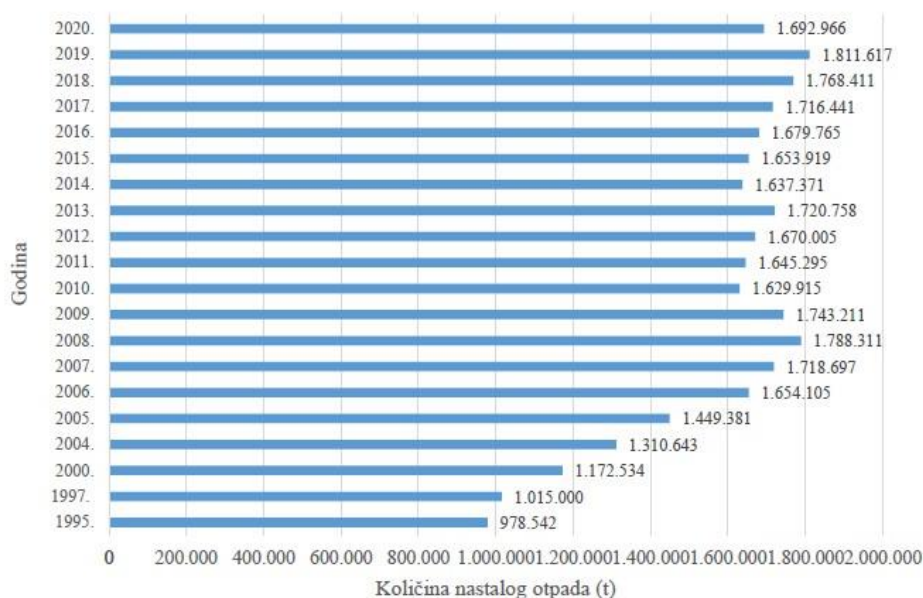
Prosječni sastav miješanog KO iz kućanstava gotovo je nemoguće egzaktno odrediti, međutim moguće je definirati utjecajne faktore za prosječan sastav i količinu, a to su:

- Postojeće stanje – trenutne količine proizvedenog otpada te razina organizacije sakupljanja i odvoza otpada. U Hrvatskoj, 99% stanovništva ima osigurano organizirano sakupljanje i odvoz otpada, a godišnje biva odloženo oko 1.700.000 tona otpada na odlagalištima.
- Broj stanovnika – predviđa se blagi pad broja stanovnika u Hrvatskoj .
- Bruto domaći proizvod (BDP) – orijentacijska procjena je kako svaka promjena BDP-a od $\pm 1\%$ utječe na promjenu specifične količine otpada od $\pm 0,45\%$.
- Indeks potrošnje – razmjerno je povezan s nastalom količinom otpada. Promjena potrošnje od 1% mijenja nastalu količinu otpada za 3%.
- Dodatni faktori za smanjenje proizvodnje otpada – urbanizacija, starenje stanovništva, kultura trošenja i kupovanja, pooštavanje zakonskih regulativa vezanih za gospodarenje otpadom, razvoj tehnologija reciklaže. Kumulativno, svi dodatni faktori će kroz desetak godina pridonijeti smanjenju proizvodnje otpada do 0,7%.
- Sezonske varijacije – Hrvatska je turistička destinacija koja je svake godine sve posjećenija. Stopa rasta broja noćenja kao mjerne jedinice uspješnosti turističke sezone je procijenjena na 5,5% do 2025. godine. Prosječna specifična količina otpada po noćenju iznosi 1,4 kg/noćenju.
- Tip područja – tri su glavna tipa područja stanovanja: urbano, ruralno i otočno.

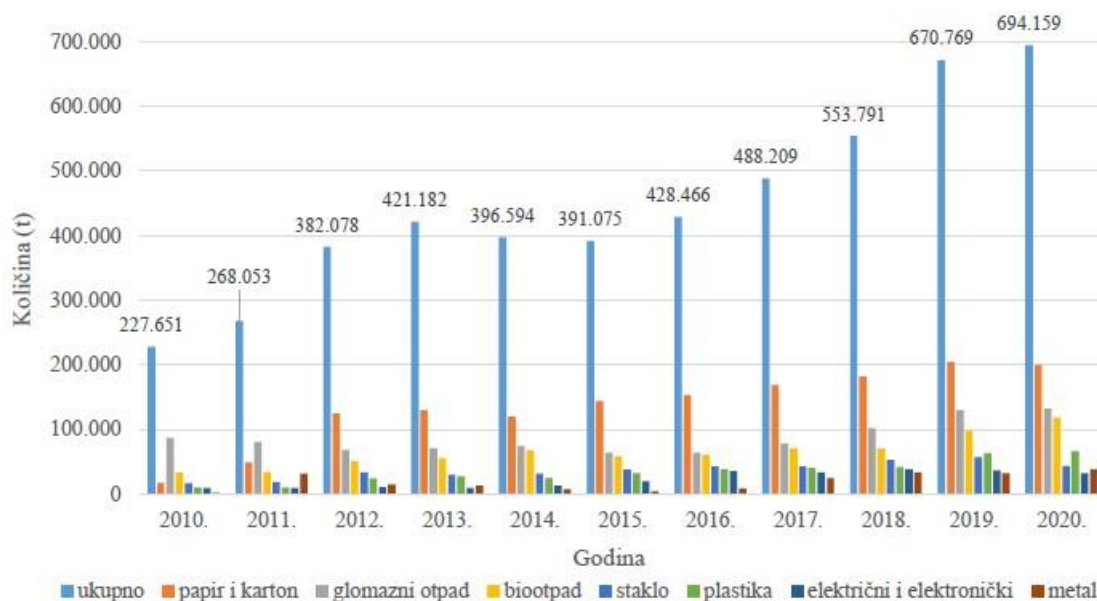
Sagledavanjem navedenih čimbenika, za Republiku Hrvatsku se procjenjuje blagi porast proizvedenog KO do 2030. godine, s trenutnih 1.700.000 t/godišnje na 2.000.000 t/godišnje. Slika 6 prikazuje trend porasta proizvodnje otpada u RH do 2008. godine i daljnju stagnaciju [14].

2.3. Trendovi proizvodnje otpada u RH

Pozitivan pomak u RH se da naslutiti iz činjenice kako se, usprkos smanjenju proizvodnje otpada 2020.-e godine naspram prethodne za 6,55 %, udio odvojeno sakupljenog otpada povećao za 3%. Miješani KO je 2019. godine činio 63% u ukupnoj količini KO. Također, stope uporabe i recikliranja su porasle za 5% u istom razdoblju čemu svjedoči graf kojeg prikazuje Slika 7.



Slika 6. Količine nastalog otpada u RH po godinama [14]



Slika 7. Trendovi odvojenog prikupljanja otpada po godinama [14]

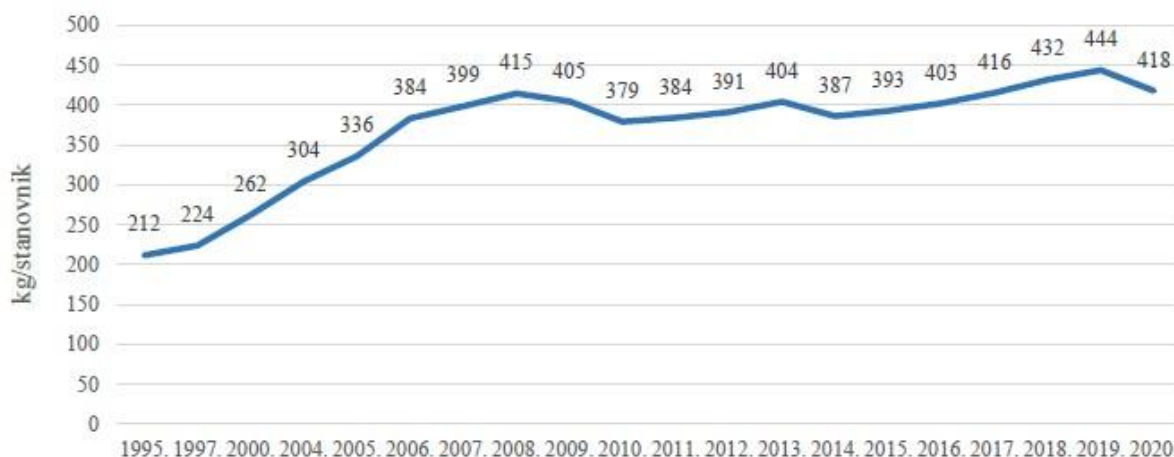
U 2020. godini sve su jedinice lokalne samouprave (JLS) provodile organizirano sakupljanje KO čime su spomenute usluge obuhvatile 99% stanovništva RH. Djelatnosti prikupljanja je obavljalo 196 tvrtki diljem RH, a prikupljeno je 1.692.966 tona KO. U sljedećoj je tablici (Tablica 1) je prikazana ukupna količina proizvedenog KO po županijama za 2020. godinu [14].

Tablica 1. Ukupna količina proizvedenog KO po županijama u RH za 2020. godinu [14]

ŽUPANIJA	UKUPNA KOLIČINA PROIZVEDENOG KO / t	POPIS STANOVNIKA IZ 2011. GODINE (DZS)	KOLIČINA OTPADA PO STANOVNIKU / kg/stanovnik
Zagrebačka	108.186	317.606	341
Krapinsko-zagorska	30.753	132.892	231
Sisačko-moslavačka	42.484	172.439	246
Karlovačka	45.228	128.899	351
Varaždinska	42.678	175.951	243
Koprivničko-križevačka	30.214	115.584	261
Bjelovarsko-bilogorska	25.704	119.764	215
Primorsko-goranska	171.063	296.195	578
Ličko-senjska	24.566	50.927	482
Virovitičko-podravska	22.786	84.836	269
Požeško-slavonska	16.853	78.034	216
Brodsko-posavska	38.138	158.575	241
Zadarska	97.490	170.017	573
Osječko-baranjska	83.694	305.032	274
Šibensko-kninska	53.119	109.375	486
Vukovarsko-srijemska	48.737	179.521	271
Splitsko-dalmatinska	243.639	454.798	536
Istarska	111.045	208.055	534
Dubrovačko-neretvanska	59.483	122.568	485
Međimurska	41.511	113.804	365
Grad Zagreb	355.639	790.017	450
UKUPNO RH:	1.692.966		Prosječno: 364

2.4. Specifična proizvodnja KO

Specifična količina KO po stanovniku koju prikazuje Slika 8 ima rastući trend; iako broj stanovnika RH opada (Tablica 2), količina otpada se povećava. U 2018. godini svaki je Hrvat prosječno proizveo 432 kg otpada, a u 2019. ta se brojka povećala za 2%, odnosno na 444 kg po stanovniku.



Slika 8. Kretanje specifične proizvodnje KO u RH po godinama [14]

Pad u 2020. godini na 418 kg po stanovniku nije bio očekivan. Anomaliju je uzrokovala pandemija COVID-19; budući da je došlo do osjetnog smanjenja rada uslužnog sektora, koji je u RH odgovoran za proizvodnju velike količine otpada [14].

Tablica 2. Trend pada broja stanovnika RH [15]

Godina	2014.	2015.	2016.	2017.	2018.
Broj stanovnika	4.238.389	4.203.604	4.174.349	4.124.531	4.087.843

2.5. Prikupljanje podataka o otpadu

Prikupljanje podataka o sastavu i količini KO osiguravaju komunalne tvrtke i pravne osobe koje obavljaju djelatnosti gospodarenja otpadom na pojedinim jedinicama lokalnih samouprava. Podatke su dužni dostaviti u Informacijski sustav zaštite okoliša koji je predvođen Hrvatskom agencijom za okoliš i prirodu radi vođenja evidencije.

Za potrebe ovog rada, od posebnog su značaja podaci o biorazgradivom KO. Oni također služe za nadzor provođenja ciljeva propisanih Zakonom o održivom gospodarenju otpadom (NN 94/13) i Direktivom o odlaganju 1999/31/EC. Sukladno članku 24. Zakona održivom gospodarenju otpadom (NN 94/13), određene su granične masene vrijednosti biorazgradivog KO koji smije biti odložen na odlagalištima u odnosu na masu biorazgradivog KO proizvedenog 1997. godine. Slika 9 grafički prikazuje slijedeće zahtjeve smanjenja:

- 75%, odnosno 567.131 tona do 31.12.2013.
- 50%, odnosno 378.088 tona do 31.12.2016.
- 35%, odnosno 264.661 tona do 31.12.2020..

Sukladno stavku 4. članka 24. Zakona o održivom gospodarenju otpadom (NN 94/13), upravitelj odlagališta mora dostaviti podatke o masi biorazgradivog KO odloženog na odlagalište Hrvatskoj agenciji za okoliš i prirodu (HAOP) na propisanim obrascima, dva puta godišnje u roku od 30 dana od isteka polugodišta [14].

2.6. Odlaganje KO

Odlaganje otpada najmanje je poželjna opcija zbrinjavanja istog. Deponij predstavlja spor proces digestije kojim se uništava maksimalno 65% hlapljivih tvari tijekom vremena. Odloženi organski otpad postaje stanište patogenih bakterija poput salmonele koja uzrokuje infekcije i zarazne bolesti. Također, pored bakterija, izvor hrane pronalaze i štetne vrste glodavaca, insekata i ptica. Primjerice, muhe nisu izravno štetne već mogu prenositi uzročnike bolesti koje su tijelom mehanički i nenamjerno pokupile prilikom kretanja po otpadu [16]. Procjenjuje se kako nastaje 9,2 kg ekvivalenta ugljičnom dioksidu po kubnom metru deponijskog plina, a koji se raspršuje u atmosferu. Iz tog se razloga deponiji prekrivaju brtvenim pokrivačem kako bi se metan iz smjese deponijskih plinova izgorio na baklji i tako u atmosferu bio pušten u obliku staklenički neutralnog ugljičnog dioksida koji je produkt njegova izgaranja.

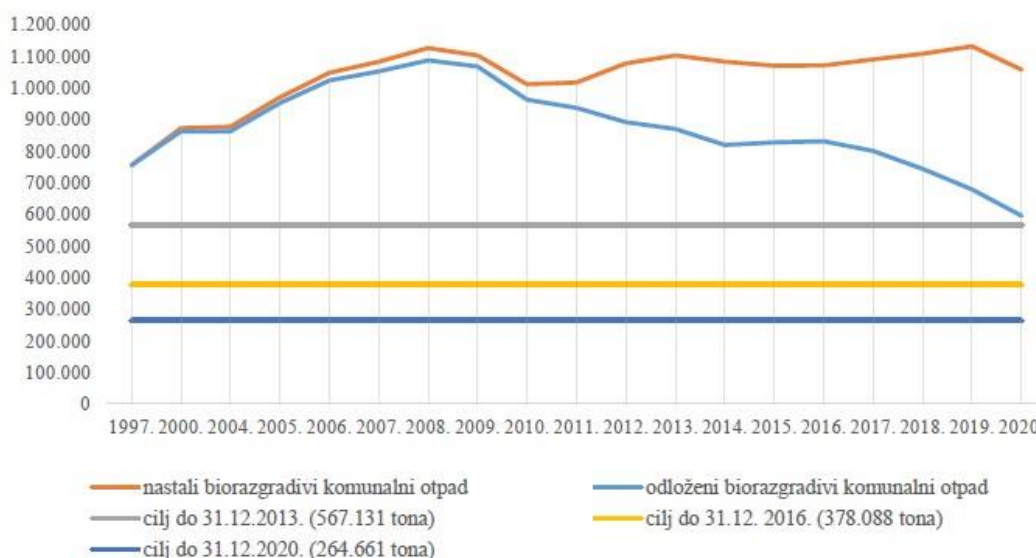
2.7. Biorazgradivi KO u RH

Jedna od frakcija odvojeno prikupljenog otpada jest biootpad koji je kao takav idealna sirovina za bioplinsko postrojenje kojim se bavi ovaj rad. Udio biootpada u odvojeno prikupljenom KO je 17,1%, odnosno 118.692 tona što je 24,3% od ukupno proizvedenog biorazgradivog KO. Godina 2020. bilježi nastanak biorazgradivog KO od 488.850 tona, dok je odloženo 596.013 tona.

Količina oporabljenog (kompostiranje, AD) biootpada od 102.265 tona u 2020. godini ulijeva nadu za napretkom, te se očekuje njen daljnji porast.

Prikupljanje podataka je ključno za praćenje uspješnosti provođenja korektivnih mjera. Grafički prikaz (Slika 9) jasno daje do znanja kako niti jedan od zadanih ciljeva Zakona o održivom gospodarenju otpada, u smislu nastale količine KO, nije postignut.

Trendovi proizvodnje otpada imaju silaznu putanju, što je dobro no jasno je kako se nastajanje otpada ne može apsolutno izbjeći. Stoga, neizbježan otpad je potrebno ponovno upotrebljavati i smatrati ga sirovinom, a ne problemom. Misao vodilja pri izradi ovog rada jest što veća uporaba biorazgradivog otpada implementacijom tehnologije proizvodnje bioplina koja smanjuje količine odloženog otpada te usmjeruje krivulje nastanka biootpada (Slika 9) u željenom smjeru.



Slika 9. Usporedba nastalog i odloženog KO u RH za 2020. godinu sa željenim vrijednostima [14]

2.7.1. Računanje količine biorazgradive komponente

Podatci o masi odloženog biorazgradivog KO dostavljaju se putem Obrasca o odlagalištima i odlaganju otpada (Obrazac OOO). Potrebno je ispuniti sljedeće stavke: količina odloženog otpada svake pojedine vrste s pripadajućim ključnim brojem, koeficijent udjela biorazgradive komponente svake vrste KO i količina biorazgradive komponente svake vrste KO koja se računa primjenom sljedeće formule:

$$m_B = m \times f_B \quad (1)$$

Gdje je:

m_B	kg	masa biorazgradive komponente pojedine vrste KO odloženog na odlagalištima
m	kg	ukupna masa pojedine vrste KO odloženog na odlagalištu
f_B	/	koeficijent biorazgradive komponente.

Vrste otpada su podijeljene u skupine prema sličnosti, a svakoj podvrsti otpada je pridodana oznaka poznatija pod nazivom „ključni broj“. Tablica 3 prikazuje vrijednosti koeficijenata potrebnih za izračun biorazgradive komponente za nacionalni miješani KO ključnog broja 20 03 01.

Tablica 3. Primjer izračuna biorazgradive komponente miješanog KO (20 03 01) [14]

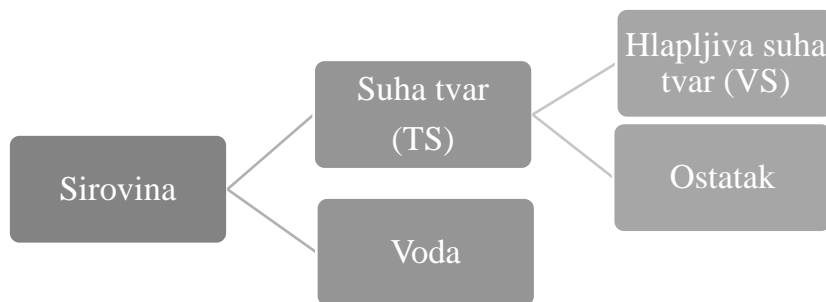
(1) Sastavnica	(2) Udio u miješanom komunalnom otpadu / %	(3) Koeficijent za računanje biorazgradive komponente	(2) x (3) Udio biorazgradive komponente u miješanom komunalnom otpadu / %
Metal	2,07	0,00	0,00
Drvo	0,98	0,50	0,49
Tekstil/odjeća	3,71	0,50	1,855
Papir i karton	23,19	1,00	23,19
Staklo	3,65	0,00	0,00
Plastika	22,87	0,00	0,00
Guma	0,22	0,00	0,00
Koža/kosti	0,45	1,00	0,45
Kuhinjski otpad	30,93	1,00	30,93
Vrtni otpad	5,68	1,00	5,68
Problematični	3,97	0,50	1,985
Ostali otpad	2,28	0,00	0,00
UKUPNO	100,00	64,58	UKUPNO

Unaprjeđenje sustava gospodarenja otpadom moguće je isključivo uz dobro poznavanje količina i vrsta otpada kojima se raspolaže. Fizikalno-kemijske karakteristike i biorazgradivost KO definiraju smjer razvoja te omogućuju procjenu potencijala materijalne i energetske uporabe KO. Parametri navedenih karakteristika prema [17] su slijedeći:

- a) Ogrjevna vrijednost – je kemijska energija pohranjena u materijalu, a oslobađa se izgaranjem u obliku topline. Ogrjevna se vrijednost se mjeri u kalorimetru, a proporcionalna je toplini koju primi kalorimetarska voda nakon spaljivanja promatranog materijala. Ogrjevna vrijednost goriva je ona količina topline koja se dobije kad se jedinica količine (mase) goriva s potrebnim kisikom, sve na početnoj temperaturi 20°C, zapali i potpuno izgori, a nastali se dimni plinovi ohlade opet na 20°C predajući toplinu kalorimetarskoj vodi, u uvjetima pod stlačenim kisikom.

Slijedeći definiciju, određuju se dvije ogrjevne vrijednosti; gornja ogrjevna vrijednost (HHV) jest količina topline dobivena potpunim izgaranjem i naknadnim hlađenjem dimnih plinova do potpune kondenzacije pare dimnih plinova, a donja ogrjevna vrijednost (LHV) je umanjena za energiju kondenzacije vodne pare nastale izgaranjem vodike i one unesene gorivom.

- b) Udio suhe tvari – Ukupna suha tvar (TS) jest masa uzorka kojoj je oduzeta masa vode tog uzorka. Označava se kao maseni udio cijelog uzorka.



Slika 10. Sastav sirovine

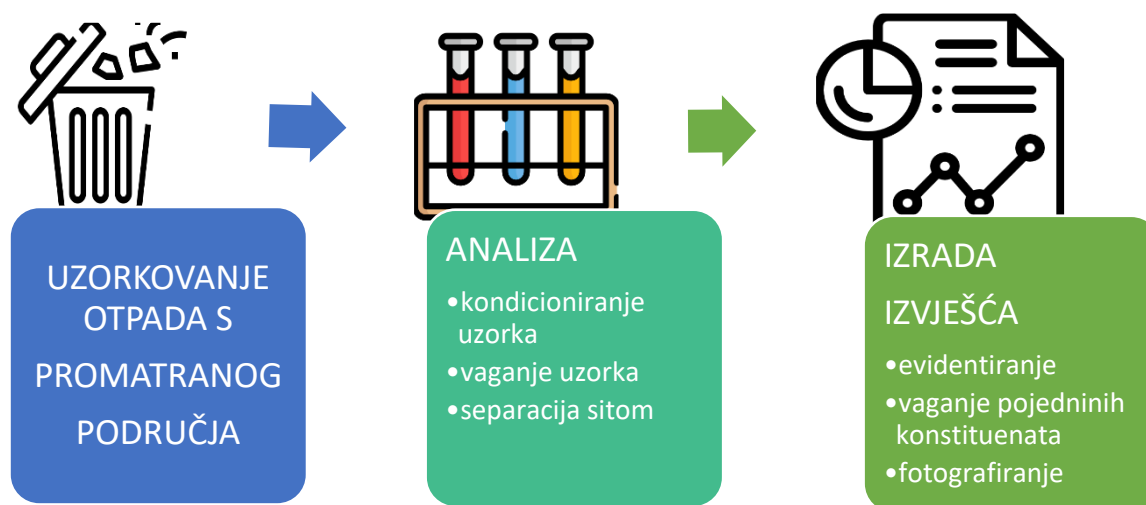
- c) Gubitak žarenjem – jest masa suhe tvari koju razgrađuje spaljivanje na 550°C. Navedena temperatura omogućuje potpuno izgaranje svih hlapljivih tvari. Gubitak žarenjem se označava kao maseni udio ukupne suhe tvari.
- d) Pepeo - predstavlja ostatak minerala u materiji uzorka nakon žarenja na 800°C. Označava se kao maseni udio u odnosu na ukupnu suhu tvar.
- e) Udio biomase – određuje se sukladno normi HRN EN 15440:2011 - Kruta oporabljena goriva - Metode određivanja sadržaja biomase (EN 15440:2011). Prigodna metoda određivanja udjela biomase iz miješanog KO jest metoda selektivnog otapanja. Postupkom se otapa uzorak u sumpornoj kiselini (H₂SO₄) i vodikovom peroksidu (H₂O₂); topiv dio uzorka predstavlja biomasu, a ostatak ne-biomasu.
- f) Ukupni ugljik (TC) i ukupni organski ugljik (TOC) - Ukupni ugljik se izražava se kao maseni udio u odnosu na suhu tvar. Ukupni organski ugljik predstavlja masu organskog ugljika u uzorku, odnosno masu ugljika koji je moguće razgraditi biološkim postupcima. Određuje se izravno ili oduzimanjem mase anorganskog ugljika od mase ukupnog ugljika te se izražava se kao maseni udio u odnosu na suhu tvar.
- g) Klor i sumpor – predstavnici su štetnih tvari po okoliš, naročito nakon transformacije u kloride i sulfide. Postupak njihove detekcije se sastoji od izgaranja uzorka u zatvorenom sustavu s kisikom te naknadne adsorpcije klora i sumpora u odgovarajućim otopinama i konačne spektrometrijske analize.

-
- h) Sadržaj teških metala – određuje se digestijom u zlatotopki. Teški metali su: antimon, arsen, olovo, kadmij, krom, živa, nikal, kobalt.
- i) Realni dinamički respiracijski indeks (RDRI) – jest aerobni parametar stabilnosti čija vrijednost predstavlja srednju količinu izmjenog respiracijskog indeksa tijekom 24 sata najveće aerobne aktivnosti mikroorganizama. Drugim riječima, mjeri se količina kisika kojeg potroši uzorak po kilogramu suhe tvari, sve u trajanju od 60 minuta. Veće vrijednosti RDRI ukazuju na veću biološku nestabilnost.
- j) Respiracijska aktivnost (AT₄) – Parametar AT₄ je također aerobni parametar stabilnosti, ali dobiven statičkom metodom kod koje prilikom mjerenja nema kontinuirane aeracije supstrata. Izmjerena vrijednost predstavlja ukupnu potrošnju kisika (O₂), a izražena je kao miligram kisika po gramu suhe tvari uzorka.
- k) Bioplinski potencijal – je svojstvo materije, u ovom slučaju otpada, da oslobodi određenu količinu bioplina iz svoje organske frakcije. Najvažniji je parametar prilikom projektiranja postrojenja za proizvodnju bioplina. Prikazuje međusobnu ovisnost ulazne sirovine i proizvedenog bioplina. Mjerenje se provodi metodama određivanja parametara GB₂₁ i GS₂₁ koje traju po 21 dan. Važno je obratiti pažnju na kondicioniranje uzorka koji mora biti homogen za dobivanje vjerodostojnih rezultata. Bioplinski potencijal se izražava kao volumen nastalog bioplina po masi suhe tvari uzorka u normiranim uvjetima. Dio sirovine koji se pretvara u bioplin jest hlapljiva suha tvar koja je pak dio organske suhe tvari kako prikazuje Slika 10.
- l) Omjer C:N – Omjer ugljika i dušika u organskoj tvari prosječno iznosi 20; na svakih 20 grama ugljika dolazi 1 gram dušika u toj organskoj tvari. Predstavlja važan parametar pri procjeni hranjivih tvari u sirovini.

Tablica 4. Fizikalno – kemijski parametri otpada s normama za provođenje ispitivanja [17]

PARAMETAR	JEDINICA	NORME
Ogrijevna vrijednost	kJ kg-1 s.tv.	HRN EN 15400:2011, ISO 1928:2009
Udio suhe tvari	% m/m	HRN EN 12880:2005, CEN/TS 15414-1
Gubitak žarenjem	% s.tv.	HRN EN 15169:2008
Pepeo	% s.tv.	HRN EN 15403:2011, HRN EN ISO 6245:2003
Ukupni ugljik (TC)	% s.tv.	HRN EN 13137:2005
Ukupni organski ugljik (TOC)	% s.tv.	HRN EN 13137:2005
Klor i sumpor	g kg-1 s.tv.	HRN EN 15408:2011, HRN EN 14582:2007
Sadržaj teških metala (Sb, As, Pb, Cd, Cr, Co, Ni, Hg)	mg kg-1 s.tv	HRN EN 15411:2011, HRN EN 13657:2008, HRN EN 1483:2008
Realni dinamički respiracijski indeks (RDRI)	mg O2 kg-1 s.tv. h-1	HRN EN 15590:2012
AT4	mg O2 g-1 s.tv.	ÖNORM S 2027-4, HRN EN 16087-1:2012
Bioplinski potencijal kroz 21 dan	NL kg-1 s.tv.	HRN EN ISO 11734:2002, DIN 38414 – 8, ÖNORM S 2027-2, VDI 4630

Nakon provedenih ispitivanja sastava i svojstava KO, moguće je odrediti potencijal proizvodnje energije iz biootpada na nekom području. Slika 11 prikazuje hodogram provedbe ispitivanja sastava i karakteristika otpada na odabranom području.



Slika 11. Dijagram tijeka provedbe ispitivanja sastava otpada

2.7.2. Biomasa

Biomasa jest spremnik potencijalne energije obnovljivog izvora. Sačinjavati ju mogu, među ostalim, drvena biomasa, žitarice te organska frakcija komunalnog otpada. Značenje biomase je širokog opsega, te je teško dati njenu egzaktnu definiciju, ali u slučaju ovog rada predstavlja sirovinu čijom se preradom dolazi do korisnog oblika energije. Biomasa u pogledu prirode nikada ne postaje otpadom, već samo jedna od faza ugljikova ciklusa. Drvena biomasa je dugo vremena bila predvodnik u proizvodnji topline iz obnovljivih izvora energije. U posljednjih desetak godina, biomasa se počinje intenzivnije koristiti za dobivanje električne energije te biometana kao zamjene za prirodni plin, a tu se prvenstveno misli na biorazgradivi otpad [18]. Prema Zakonu o održivom gospodarenju otpadom (ZOGO), biootpad je biološki razgradivi otpad iz vrtova i parkova, hrana i kuhinjski otpad iz kućanstava, restorana, ugostiteljskih i maloprodajnih objekata i sličan otpad iz proizvodnje prehrambenih proizvoda.

Prosječna količina proizvedenog otpada po glavi stanovnika u Hrvatskoj je porasla sa 158 kg u 1997. godini na 250 kg u 2015. godini. Sagledavanjem činjenice da je 65% sadržaja miješanog KO ustvari biorazgradivi otpad, dolazi se do računice koja ukazuje da je Hrvatska već 2015. godine imala na raspolaganju preko milijun tona biorazgradivog otpada [17].

Količina biorazgradivog KO koji se smije odložiti na odlagalištima u RH, u odnosu na masu biorazgradivog KO proizvedenog 1997. godine, je ograničen na 35%. Prema računici, do kraja

2020. godine u Hrvatskoj je trebalo biti odloženo najviše 264.661 tona biorazgradivog otpada. Brojke nisu niti približno slijedile željenu putanju; u 2018. godini je količina odloženog biorazgradivog KO iznosila čak 744.506 tona. Tablica 5 prikazuje trend pada odloženog biorazgradivog KO od 2006. godine u usporedbi s stagnacijom proizvodnje istog [14].

Tablica 5. Količine odloženog biorazgradivog KO u RH po godinama [14]

GODINA	PROIZVEDENI BIORAZGRADIVI KO / t	ODLOŽENI BIORAZGRADIVI KO / t
1997.	756.175	756.175
2000.	873.538	863.538
2004.	878.131	863.131
2005.	971.085	952.969
2006.	1.048.667	1.024.323
2007.	1.084.016	1.053.336
2008.	1.126.899	1.088.196
2009.	1.104.126	1.068.825
2010.	1.012.651	963.889
2011.	1.017.519	937.375
2012.	1.078.295	892.049
2013.	1.103.593	870.434
2014.	1.083.596	819.757
2015.	1.070.783	828.564
2016.	1.072.439	831.977
2017.	1.091.066	801.238
2018.	1.109.006	744.506

Sukladno Katalogu otpada, biootpad iz KO se sastoji od četiri ključna broja: 20 01 08 (biorazgradivi otpad iz kuhinja i kantina); 20 01 25 (jestiva ulja i masti); 20 02 01 (biorazgradivi otpad iz vrtova i parkova); 20 03 02 (otpad s tržnica).

Unatoč velikom bioplinskom potencijalu, organska ulja i masti nisu poželjna sirovina za bioplinsko postrojenje zbog dugog vremena raspada; isplativije je iskoristiti ih za proizvodnju biodizela.

Koeficijent udjela biorazgradivog otpada u miješanom KO je do 2014. godine iznosio 0,67; a nakon 2015. godine je pao na 0,65 [14].

2.8. Manipulacija biorazgradivim otpadom

Kao što je već zaključeno, odlaganje otpada na odlagalištima je preferabilna opcija njegova zbrinjavanja te sa sobom nosi niz problema. Težnja ka kružnom gospodarenju otpada kao rješenje zbrinjavanja biorazgradivog otpada nudi dvije opcije navedene u nastavku. Odluka o odabiru procesa uporabe donosi se na temelju raspoloživih količina i vrsta sirovine te financijskoj moći ulagatelja. Primjerice, kompostiranje je uglavnom isplativije za količine do 35.000 t/god, dok je za vrijednosti iznad navedene (moguće i manje) ekonomski dugoročno pogodnija anaerobna obrada u bioplinskom postrojenju. Također, od velike važnosti pri odabiru postupka jest financijska intervencija državnih tijela u vidu poticaja, olakšica i davanja statusa povlaštenog proizvođača energije.

- a) Kompostiranje – metoda spontanog biološkog recikliranja biorazgradivog otpada kojom se smanjuje volumen i masa istog procesom biološke razgradnje. Sama investicija kompostane je znatno manja u usporedbi s bioplinskim postrojenjem, no konačni proizvod - kompost manje je vrijednosti u odnosu na bioplin i digestat kod anaerobne digestije.

Pojam kompostiranja svoje korijene vuče iz latinskog jezika od riječi *compostium*, koja u prijevodu znači mješavina, a odnosi se na niz pomiješanih biološki razgradivih supstrata koje mikroorganizmi s prisutnim kisikom pretvaraju u kompost uz oslobađanje topline, plinova i vode [19].

Dopremljeni otpad za kompostiranje je najprije potrebno fizički pregledati i odvojiti neželjene frakcije. Potom se usitnjeni zeleni otpad (trava, lišće, granje) miješa s kuhinjskim otpadom nakon čega se dobivenom mješavinom formiraju gredice visine do 1,5 metara. Daljnja manipulacija sirovinom obuhvaća radove prevrtanja i ovlaživanja prema potrebi. Pojava neugodnih mirisa iz kompostane ukazuje na nepravilno rukovanje s kompostom, a odstraniti se može boljim dovodom kisika, optimizacijom vlage te miješanjem i usitnjavanjem sirovine [16].

Sukladno Pravilniku o nusproizvodima i ukidanju statusa otpada NN 117/14, proizvedeni kompost od biootpada spada u prvu klasu (klasa I), tj. namijenjen je uporabi u ekološkoj proizvodnji te se kao takav može dalje prodavati [20].

- b) Anaerobna digestija (AD) - Glavna prednost procesa anaerobne razgradnje nad kompostiranjem je u tome što nastaje energetski vrijedan produkt, biometan koji može pokrivati mnoge transportne i energetske potrebe. Jedan Nm³ biometana je energetski

približno ekvivalentan jednoj litri benzina. Proizvedeni biometan može se konzumirati na više načina; ako okolna područja lokacije postrojenja imaju potrebe za toplinom i strujom, tada je kogeneracijsko postrojenje najbolja opcija, ako pak ne postoji zainteresiranost tržišta topline i struje, bolja solucija jest prodaja biometana kao gorivog plina.

Detaljnije o procesu AD slijedi u narednom poglavlju.

3. PROCES DOBIVANJA BIOPLINA POSTUPKOM ANAEROBNE DIGESTIJE (AD)

3.1. Otkriće i razvoj proizvodnje bioplina

Saznanja o nastajanju metana u prirodi sežu još od 1764. godine, kada se je Benjamin Franklin s grupom prijatelja uputio čamcem na jezero u blizini grada Rocky Hill u New Jerseyu. Izvršili su eksperiment tako da je nekoliko njih dugačkim štapovima miješalo mulj s dna jezera, dok su dvojica držali zapaljeni papir uz samu površinu vode. Nakon nekoliko minuta, počelo je izdizanje metana koji se zapalio, a plamen se proširio cijelim jezerom [21]. Franklinovo otkriće zaintrigiralo je talijanskog fizičara Alessandra Volta koji je skupio močvarni plin iz okolice jezera Maggiore i znanstveno ga identificirao kao metan 1776. godine [22].

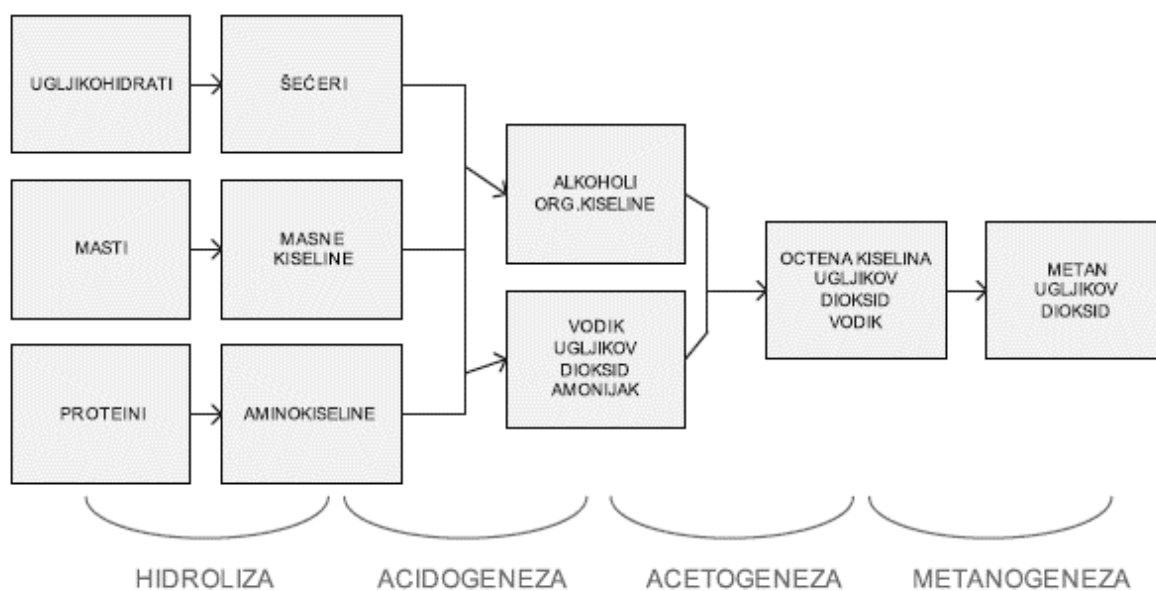
Tehnologija dobivanja metana putem anaerobne digestije ubrzano je napredovala za vrijeme Drugog svjetskog rata kada je potražnja za energentima znatno nadvladavala tadašnje izvore. Nakon rata biometan je zašao u drugi plan zbog sve šire uporabe fosilnih goriva. Tehnologija anaerobne digestije ponovno postaje aktualna u posljednjem kvartalu 20. stoljeća, kada se počinje uviđati sve jači utjecaj antropogenih aktivnosti na pojave u atmosferi [23].

3.2. Osnove procesa AD

Dobivanje bioplina je kompleksan i dugotrajan postupak. Ne postoji metoda za izravno ekstrahiranje plina iz sirovine. Da bi sirovina, u ovom slučaju biootpad, ispustila plin, potrebno je da prođe kroz biokemijski proces anaerobne razgradnje. Korištenjem homogene smjese više supstrata, primjerice organske frakcije otpada i otpadnog mulja, postupak dobiva novi naziv, kodigestija. Anaerobna digestija (fermentativna disimilacija) je proces razgradnje biorazgradivog materijala pomoću mikroorganizama bez prisustva kisika. Sav razgradivi (disimibilni) ugljik se pretvara u plinsku smjesu ugljičnog dioksida i metana. Energija kemijskih veza supstrata oslobađa u obliku navedene mješavine plinova. Primjer takvog spontanog procesa nalazimo u prirodi, u zemlji i sedimentima na dnu oceana i jezera te u probavi preživača. Umjetno ostvarena AD odvija se u nekoliko faza, a svaka uključuje različite vrste pravih bakterija i metanogenih bakterija. Sirovina se svakom fazom raspada na jednostavnije spojeve i tako sve do konačnog produkta - bioplina. Brzina ukupnog procesa razgradnje je jednaka najsporijoj reakciji u nizu.

Glavni pokretači razgradnje su metanogene bakterije čija skupina spada u posljednju kariku lanca razgradnje organske tvari. Procjenjuje se da su prisutni na Zemlji posljednjih 3,5 milijardi godina, još iz vremena atmosfere bez kisika te se stoga nazivaju i prabakterijama. Pripadaju grupi primitivnih mikroorganizama skupine *Archaea*. Kako su svoje postojanje razvijale u anaerobnim uvjetima, tako je prisustvo kisika u današnjici nepovoljno za njihovo preživljavanje te inhibira njihov rast. Posljedično, metanogene bakterije, u današnjici mogu preživjeti na mjestima odsustva zraka ili tamo gdje je konzumacija kisika znatno brža od njegova nastanka. Mjesta s takvim uvjetima su dubine močvara, jezera, probavni traktovi ljudi i životinja i digestori u kojima su anaerobni uvjeti prinudno ostvareni [18].

Nažalost, i uz dobro poznavanje mikroorganizama, cjelokupna slika rada mikrobnih procesa, o kojima ovisi proizvodnja bioplina, dan danas nije u potpunosti poznata.



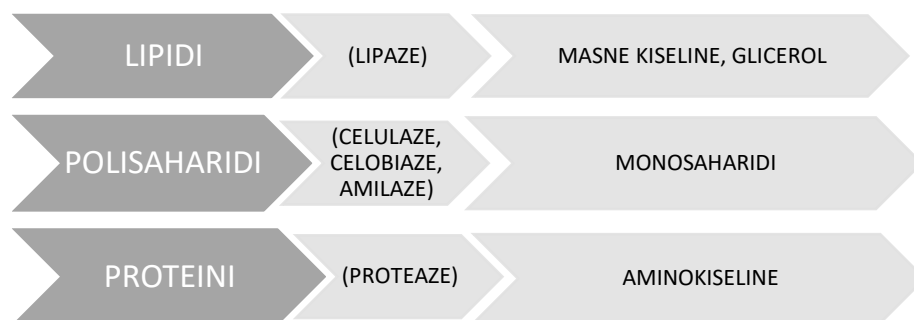
Slika 12. Dijagram toka razgradnje organske materije tijekom procesa AD

Faze AD, koje prikazuje Slika 12, kronološki su navedene u nastavku:

3.2.1. Hidroliza

Hidroliza je početna faza anaerobne razgradnje. Polazni materijali sadrže kompleksne organske ostatke tvari (polimeri i biopolimeri poput celuloze, škroba, masti i bjelančevina) koji se pomoću djelovanja enzima hidrolaza razlažu na manje jedinice (monomeri, oligomeri) kao što prikazuje Slika 13. Drugim riječima, netopivi organski polimeri se razgrađuju na topive derivate koji postaju dostupni za druge bakterije, pošto ih metanogene bakterije ne mogu

izravno razgraditi. Polimerni ugljikohidrati, lipidi, aminokiseline i bjelančevine, transformiraju se u glukozu, glicerol, masne kiseline, purine, piridine i ostale monomere. Navedeni lančani procesi odvijaju se istovremeno unutar smjese digestata. U procesu anaerobne razgradnje supstrata hidrolitičke bakterije imaju najveću specifičnu brzinu rasta; vrijeme udvostručenja im je 30 min, za razliku od acetogenih i metanogenih bakterija koje se razmnožavaju sporije (vrijeme udvostručenja 1–4 sata odnosno 8–10 sati) [24].



Slika 13. Transformacije tijekom hidrolize

3.2.2. Acidogeneza

Acidogeneza je faza transformacije materije nakon hidrolize u metanogene spojeve (acetati, formijati, metanol, vodik, ugljični dioksid) i u spojeve kao što su propionati, butirati, alkohol i aldehidi. Reakcije su relativno brze, a oksidacija masnih kiselina (beta oksidacija) se odvija polako. Metanogeni produkti nastaju pri visokom parcijalnom tlaku vodika. Jednostavni šećeri, aminokiseline i masne kiseline razgrađuju se na acetat, ugljikov dioksid i vodik (70%) te na hlapljive masne kiseline i alkohole (30%). Ukratko, acidogene bakterije pretvaraju šećer i aminokiseline u organske kiseline, sumporovodik, amonijak i ugljikov dioksid [24].

3.2.3. Acetogeneza

Acetogeneza je korak u kojemu se metanogene bakterije koje organske spojeve ne mogu izravno transformirati u metan, pretvaraju u metanogene spojeve. Hlapljive masne kiseline koje imaju lance ugljika duže od dvije jedinice i alkohol s više od jedne molekule ugljika, oksidiraju u acetate i vodik. Nastanak vodika povećava parcijalni tlak u bioreaktoru, što je negativna pojava jer uzrokuje inhibiciju metabolizama acetogenih bakterija.

Sposobnost acetogenih bakterija da proizvode vodik zahtijeva nizak parcijalni tlak (1Pa) okoline, a metanogeni i *Desulfovibrio* (bakterije) imaju sposobnost konzumacije vodika iz okoline. Stoga, nagle promjene okolnih uvjeta mogu izazvati nagli skok količine vodika koji

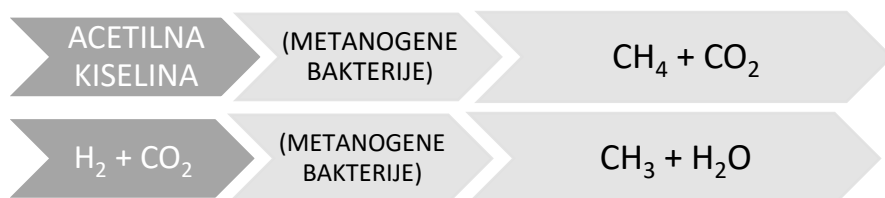
nadjačava sposobnost njegova ukanjanja metanogenim bakterijama. Povišenje parcijalnog tlaka u digestoru uzrokuje promjene u metaboličkom djelovanju acetogenih bakterija koje u tim uvjetima proizvode butirate, propionate, valerate, kaproate umjesto acetata. Usprkos padu količine proizvedenog vodika, metanogeni ne mogu upotrebljavati nastale tvari. Međudjelovanja različitih grupa bakterija samo su djelomično objašnjiva.

Acetati su najvažniji međuspojevi fermentacije, npr. fermentacijom gnoja oko 70% metana nastaje preko metilnih (CH_3) grupa acetata. Osim acetata i vodika, propionati su sljedeći najvažniji međuspojevi u metanogenezi [24], [25].

3.2.4. Metanogeneza

Metanogeneza jest posljednji, a ujedno i najsporiji, korak anaerobne razgradnje. Rezultat je nastanak metana metanskim vrenjem do kojeg se dolazi na više načina; 70% metana nastaje iz acetata, a ostatak pretvorbom iz vodika i ugljičnog dioksida kako prikazuje Slika 14. Redukcija ugljičnog dioksida u metan je egzotermne naravi, te dolazi do oslobađanja dijela energije.

Metanogeneza je vrlo osjetljiva faza fermentacije. Pogrešno doziranje digestora, varijacije u temperaturi ili prodor kisika mogu potpuno zaustaviti proizvodnju metana. Takvi poremećaji ne utječu znatno na acidogene bakterije koje nastavljaju s proizvodnjom kiselina, a što može dovesti do zakiseljavanja digestata zbog neravnoteže acidogenih i metanogenih bakterija. U tom slučaju, jedno od rješenja je dodavanje primjerice gnoja koji će povećati volumen digestata i tako smanjiti udio kisele faze [26]. Produktivnost posljednje faze ovisi o mnogobrojnim čimbenicima poput sastava sirovine, temperature, pH vrijednosti itd. Optimalna pH vrijednost za učinkoviti rad metanogenih bakterija je između pH 7,0 i 7,8; odnosno odgovaraju im neutralni do blago lužnati uvjeti.



Slika 14. Transformacije tijekom metanogeneze

3.3. Procesni parametri AD

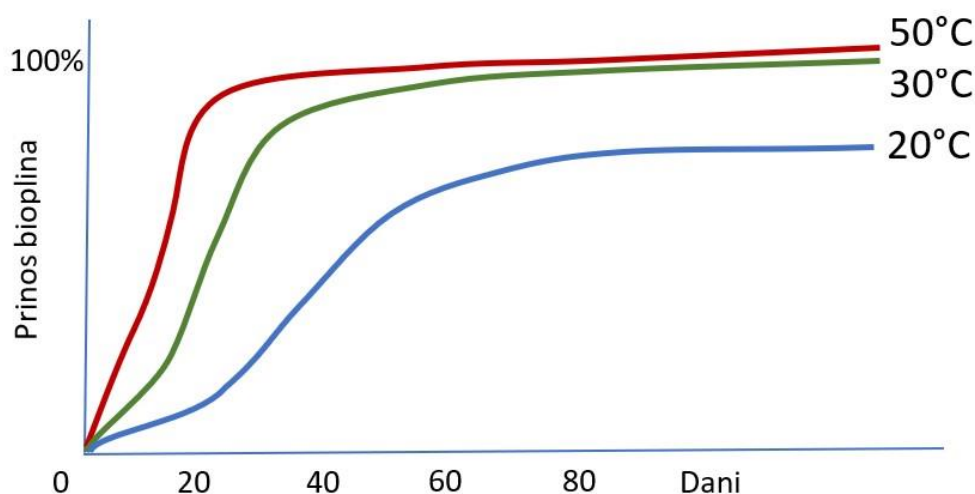
- a) Značajke sirovine - Sastav biomase izravno utječe na količinu proizvedenog bioplina; poznavanje sastava sirovine omogućava optimalno upravljanje postrojenjem. Pozornost mora biti posvećena praćenju pH vrijednosti, prisutnost odgovarajućih makro i mikronutrijenata (kemijske tvari potrebne za rast i razvoj organizama) te odsutnosti inhibitornih sastavnica poput dezinficijensa, antibiotika, herbicida, teških metala i slično.

Glavni parametri koji određuju efikasnost biomase u procesu AD su: pH, udjeli ukupne i hlapljive suhe tvari, ukupni ugljik, ukupni dušik, ukupni fosfor, ukupni sumpor, biometanski potencijal.

- b) Temperatura - Odabrana temperatura procesa izravno utječe na prinos bioplina. Tablica 6 prikazuje moguće temperaturne zone. U slučaju termofilne temperature, prinos bioplina je najveći i najbrži, no shodno navedenom, ista zahtijeva i najviše dovedene topline te unosi moguće nestabilnosti u proces. Optimalna temperaturna zona jest ona u mezofilnom području jer balansira vrijeme zadržavanja supstrata s proizvedenom količinom bioplina i unesenom topline. Slika 15 prikazuje relativan odnos proizvedenog bioplina sa spomenutim parametrima [23].

Tablica 6. Temperaturne zone procesa AD

TEMPERATURN ZONA	TEMPERATURA PROCESA	MINIMALNO VRIJEME ZADRŽAVANJA SUPSTRATA
Psihofilna	<25°C	70 – 80 dana
Mezofilna	25 – 45 °C	30 – 40 dana
Termofilna	45 – 70 °C	15 – 20 dana



Slika 15. Ovisnost prinosa bioplina o temperaturnoj zoni

- c) Stopa organskog opterećenja (OLR)- predstavlja procijenjenu količinu hrane unesene u masu digestata. Izražava se kao kilogram hlapljive suhe tvari (VS) koje se dnevno unosi u digestor (onaj dio suhe tvari koji se potencijalno može razgraditi) po kubnom metru digestata. Parametar ima važnu ulogu prilikom pokretanja digestora, kada se vrijednost OLR-a postepeno povećava, sve do željene vrijednosti. Proces pokretanja digestora traje i do nekoliko mjeseci. Nakon postizanja minimalne kritične mase populacije bakterija i stabilnosti, AD postaje otpornija na varijacije u količinama doziranja. Postrojenje je potrebno dimenzionirati za slučaj neprekidnog maksimalnog opterećenja odnosno doziranja.

Brzina doziranja sirovine u digestor mora biti prilagođena brzini rasta metanogenih bakterija. Forsiranje punjenja digestora može dovesti do zasićenja koje uzrokuje prekomjerno povećanje kiselosti smjese. Stoga ubrzano punjenje mora biti popraćeno odgovarajućim uklanjanjem organskih kiselina [27]. U slučaju promjene načina doziranja ili zamjene supstrata, prijelaz mora biti postepen kako bi se bakterijama omogućila adaptacija na nove uvjete.

Mokra AD kod reaktora bez miješanja zahtijeva iznos OLR-a manji od 2, dok za CSTR tip vrijednost organskog opterećenja može sezati sve do 8, ovisno o viskoznosti smjese koja se time postigne, odnosno ovisno o zahtjevima uvjeta miješanja.

OLR se može definirati kao dnevna masa dodane sirovine po:

- volumenu digestora
- količini biokemijske potrebe za kisikom (BPK)
- potrebnoj količini za kisikom u ugljikovodiku (KPK).

d) Vrijeme hidraulične retencije (HRT)- Predstavlja prosječno vrijeme zadržavanja biomase unutar digestora. Najviše ovisi o vrsti korištenog supstrata tj. o brzini njegove razgradnje. Supstrati s višim omjerom C:N zahtijevaju dulje zadržavanje u digestoru [26]. U slučaju mezofilne temperaturne zone HRT iznosi oko 35 - 40 dana.

Vrijeme zadržavanja supstrata u digestoru je obrnuto proporcionalno temperaturi procesa, što prikazuje Slika 15.

e) Sadržaj suhe stvari (TS) - Potrebno ga je održavati u granicama između 5% i 12%. Preniska koncentracija TS uzrokuje stvaranje mulja na dnu spremnika i plutajućih slojeva na površini; s druge strane, previsoka koncentracija TS otežava uvjete miješanja smjese. Posljedično, odstupanje od navedenih granica doprinosi smanjenu efektivnosti mikrobiološke aktivnosti. Dio suhe tvari koji je sposoban proizvesti bioplin naziva se hlapljiva suha tvar (VS) te je poželjno da njen udio bude što bliži 100%.

f) Omjer C:N – Omjer dušika i ugljika govori o brzini razgradnje organske tvari pa shodno tome i o dinamici procesa AD. Viši C:N od 35 uzrokuje imobilizaciju mikroba zbog manjka dušika koji je odgovoran za njihov rast, odnosno usporavanje proizvodnje bioplina. Za proces kompostiranja C:N sirovine mora biti između 25 i 35 kako bi mikroorganizmi ostali aktivni, a kompost se smatra zrelim tek kada C:N padne ispod 20, a sadržaj dušika bude iznad 3%. Proces AD zahtijeva C:N između 20 i 30; kod višeg omjera će metanogene bakterije prebrzo potrošiti sav dušik radi zadovoljavanja svojih potreba za bjelančevinama i ugljik će ostajati u materijalu, dok se kod nižeg omjera dušik može osloboditi i nakupiti u obliku amonijaka koji pak povećava pH vrijednost u digestoru koja ne smije prijeći 8,5. Omjer C:N se namješta doziranjem točnog omjera sirovina s višim i nižim vlastitim omjerima. Primjerice, ako je C:N previsok u smjesu se može dodati životinjski urin koji će smjesu obogatiti dušikom [26]. Dokaz spore razgradnje (prirodnog kompostiranja) uzrokovane velikim C:N omjernom vidljivo je kod tla u šumama koje je prekriveno palim lišćem i od više godina unazad. Slične posljedice ima manjak dušika i u procesu AD.

- g) Kiselost (bazičnost) digestata - Izražava se pH vrijednošću, a utjecaj ima na rast i razvoj metanogenih mikroorganizama pa tako i na prinos bioplina. Optimalna pH vrijednost u slučaju mezofilne temperature procesa jest između 6,5 i 8 [23]. Vrijednost pH se može optimizirati dodavanjem vapna, natrijeva hidroksida ili natrijeva bikarbonata. Vapno je jeftiniji dodatak, no zbog slabe topivosti u vodi njegovo dodavanje doprinosi začepljenju cjevovoda za razliku od ostalih navedenih koji su potpuno topivi u vodi [26].

3.4. Supstrat za AD u bioplinskom postrojenju

Anaerobna digestija može preraditi širok spektar sirovina čiji je sastav ključni faktor određivanja stope proizvodnje biometana. Laboratorijskim ispitivanjima parametara za računanje količine biorazgradive komponente utvrđuje se podobnost sirovine za preradu u bioplinskom postrojenju, kako je već navedeno u tekstu. Osim o samim svojstvima, prinos bioplina značajno ovisi o kondicioniranju smjese i održavanju stabilnih radnih uvjeta.

Supstrat bioplinskog postrojenja kojim se bavi ovaj rad, jest organska (biorazgradiva) frakcija komunalnog otpada i odvojeno prikupljeni biootpad. Definicija podrazumijeva otpad koji se biološkom aerobnom ili anaerobnom razgradnjom raspada na sve manje dijelove, sve do pojave plina. Otpad se klasificira određenim kodnim oznakama koje se nazivaju ključni brojevi.

Tablica 7 prikazuje popis nekih vrsta otpada pogodnih za proces AD [28].

Tablica 7. Ključni brojevi nekih vrsta otpada pogodnih za proces AD [28]

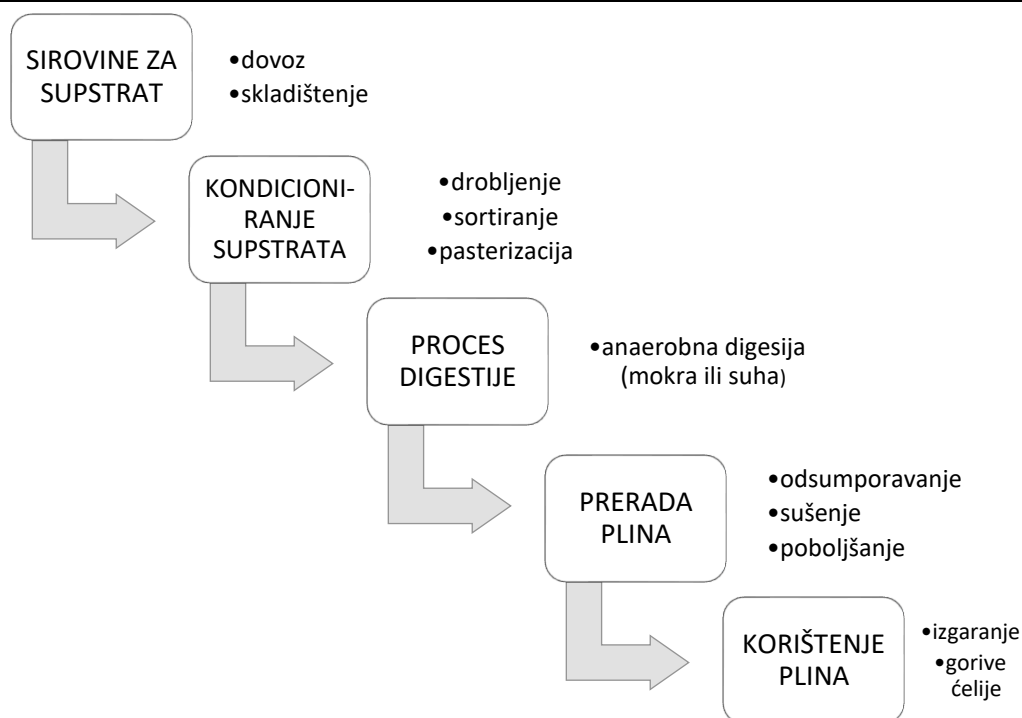
KLJUČNI BROJ OTPADA	SADRŽAJ OTPADA
02 01 06	životinjske fekalije, urin i gnoj (uključujući onečišćenu slamu) i efluenti, koji se posebno skupljaju i obrađuju izvan mjesta njihova nastanka
02 03 04	materijali neprikladni za potrošnju ili preradu (voće, povrće, žitarice, kava, čaj..)
02 05 01	materijali neprikladni za potrošnju ili preradu (mljekarska industrija)
02 06 01	materijali neprikladni za potrošnju ili preradu (pekarska i slastičarska industrija)
02 07 01	otpad od pranja, čišćenja i mehaničke obrade sirovina zaostalog iz proizvodnje alkoholnog i bezalkoholnog pića
02 07 02	otpad od destilacije alkohola
02 07 04	materijali neprikladni za potrošnju ili preradu (proizvodnje alkoholnog i bezalkoholnog pića)
03 01 01	otpadna kora i pluto
03 01 05	piljevina, strugotine, otpaci od rezanja drva, drvo, otpaci dasaka i furnira, koji nisu navedeni pod 03 01 04
03 03 01	otpadna kora i otpadci drveta
04 02 21	otpad od neprerađenih tekstilnih vlakana
10 01 03	lebdeći pepeo od izgaranja treseta i neobrađenog drveta
19 08 05	muljevi od obrade komunalnih otpadnih voda
19 08 12	muljevi iz biološke obrade industrijskih otpadnih voda, koji ne sadrže opasne tvari
20 01 08	biorazgradivi otpad iz kuhinja i kantina
20 01 08	biorazgradivi otpad iz kuhinja i kantina
20 01 38	drvo koje ne sadrži opasne tvari
20 02 01	biorazgradivi otpad
20 03 02	otpad s tržnica

Biootpad iz kućanstava koji se sakuplja u smeđim spremnicima (Slika 16), izravno ulazi u bioplinsko postrojenje kao sirovina. Sadrži kuhinjski otpad (voće, povrće, vrećice od čaja i slično), vrtni otpad (cvijeće, granje, trava i slično) te ostali biootpad (drvena kora, piljevina, dlaka, papirnati omoti hrane i slično). U smeđe spremnike se ne smije odlagati meso, riba, termički obrađena hrana, mliječni proizvodi, pepeo, odjeća, cigarete i slično. Usprkos edukaciji građana o odgovornom razvrstavanju otpada, često se u spremnicima, uz predviđeni, nalazi i nepropisni sadržaj otpada poput metalnih dijelova i prije navedenog. Nepoželjne frakcije u biootpadu su štetan za cijelo postrojenje; one koje zaostanu nakon separacije skraćuju vijek trajanja opreme te inhibiraju proces anaerobne digestije. Slika 17 prikazuje dijagram tijekom sirovine za bioplinsko postrojenje, a to je organski otpad u slučaju ovog rada.



Slika 16. Spremnik za sakupljanje biootpada iz kućanstava (20 01 08)

Poželjno je, ako je moguće, uz biootpad dobavljati i otpad iz kantina i restorana. Naime biootpad je sezonski promjenjiv; primjerice tijekom jeseni sadrži povećani udio lišća i granja odnosno teško razgradivog celuloznog otpada. Stoga je poželjno imati na raspolaganju sirovinu zagaraniranog visokog bioplinskog potencijala, poput odbačene hrane.



Slika 17. Dijagram tijeka pretvorbe sirovine u konačni proizvod - biometan

3.5. Bioplin

Produkt anaerobne digestije u digestoru jest bioplin. Nedostatak sirovog bioplina je neujednačen sastav i nešto niža ogrjevna vrijednost pa se praktična i tržišna vrijednost podiže preradom. Razlog tome jest njegov sastav koji uz metan, obuhvaća i ugljikov dioksid, vodik, sumporovodik, dušik i vodenu paru kao što prikazuje

Tablica 8. Primarna vrijednost bioplina je ogrjevna vrijednost, stoga obrada plina ide u smjeru povećanja koncentracije metana, čime se značajno povećavaju mogućnosti primjene i plasmana na tržištu. Kakvoća mu je ovisna o vrsti supstrata, radnim uvjetima, kvaliteti tehnologije filtracije te brojnim drugim parametrima.

Tablica 8. Sastav sirovog bioplina [29]

Svojstva	Sastav bioplina				Smjesa plinova (60% CH ₄ /40% CO ₂)
	CH ₄ Metan	CO ₂ Ugljikov dioksid	H ₂ Vodik	H ₂ S Sumporovodik	
Volumen / %	50-65	32-44	0-1	0-3	100
Kalorijska vrijednost / MJm ⁻³	35,8	-	10,8	22,8	21,5
Granica zapaljivosti / vol.% u zraku	5-15	-	4-80	4-45	6-12
Temperatura zapaljenja / °C	650-750	-	588	-	650-750
Tlak (kritični) / bar	47	75	13	89	75-89
Temperatura (kritična) / °C	-82,5	31,0	-	100,0	82,5
Gustoća / g l ⁻¹	0,72	1,98	0,09	1,54	1,2
Gustoća (kritična) / g l ⁻¹	162	468	31	349	320
Omjer gustoće sa zrakom	0,55	1,5	0,07	1,2	0,83

U odnosu na druge vrste obnovljivih izvora energije, važna prednost bioplina je što se jednostavno skladišti i transportira te nije nužna istovremena konzumacija. Naime, proizvedeni biometan se ne mora nužno konzumirati neposredno nakon izlaska iz procesa već se on može skladištiti na različitim tlakovima ili pak poslati u javnu mrežu plinovoda. U slučaju dobivanja električne energije iz primjerice vjetroelektrana, ista mora biti puštena u mrežu i utrošena u kratkom roku kako ne bi došlo do preopterećenja mreže, pošto spremanje u velike baterije nije ekonomski isplativo. Biometan nije ograničen u tom smislu i konzumira se prema potrebi, no ima i svoj nedostatak kao energent, a to je njegova relativno mala gustoća energije. Ako postoji ograničenje prostora, rješenje leži u stlačivanju i skladištenju u visokotlačnim bocama.

S druge strane, postoje i niskotlačni spremnici poput: plutajuće kupole, elastičnih balona, vreća i slično koji moraju biti otporni na vanjske uvjete te na UV zračenje ako se nalaze izvan zatvorenih prostorija [26].

4. POSTROJENJE ZA PROIZVODNJU BIOMETANA PROCESOM ANAEROBNE DIGESTIJE

Postrojenje za proizvodnju biometana, uz svoj glavni proizvod metan, na izlazu daje i korisne nusprokukata poput ugljikovog dioksida koji se naknadno može koristiti u prehrambenoj industriji te ko-supstrat (kompostirani digestat) kao zamjena za umjetno gnojivo. Oblik i veličina postrojenja variraju u ovisnosti o vrsti i količini ulazne sirovine. U nastavku rada pažnja će biti posvećena proizvodnji biometana iz organskog dijela otpada, kontinuiranim procesom (engl. *continous stirred*).

Bioplinska postrojenja se dijele na ona koja su usmjerena isključivo prodaji proizvedenog biometana (što je slučaj u ovom radu) te na kogeneracijska postrojenja odnosno postrojenja u kojima se izgaranjem bioplina istovremeno proizvode električna i toplinska energija.

Postrojenje je kompleksne građe, sastavljeno od velikog broja serijski povezanih modula što zahtijeva napredne sustave kontrole i automatizacije. U nastavku teksta slijedi opis modula i komponenti, navedenih prema redoslijedu kojim se pojavljuju u postrojenju.

4.1. Predobrada

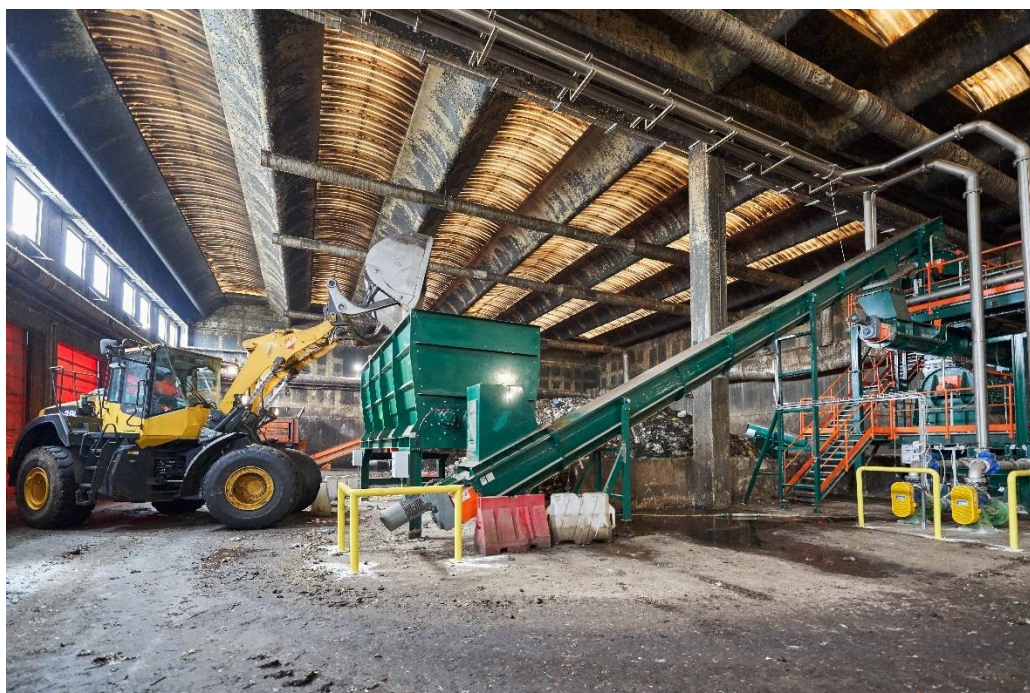
Otpad se dovozi kamionima te se privremeno odlaže u zatvorenom ventiliranom prostoru koje služi kao skladište sirovine. Potrebno je obratiti pažnju na način vrednovanja zaliha te osigurati FIFO metodu raspolaganja s materijalom. Otpad koji je prvi istovaren na skladište, prvi mora biti pušten u proces predobrade kako ne bi došlo do predugog stajanja materijala pa samim time i pada metanskog potencijala. Također, dugačkim stajanjem otpada na skladištu dolazi do istiskivanja tekućeg sadržaja koji se umjesto u proces, šalje u pročišćivač.

Dovezeni otpad najprije je potrebno izvaditi iz plastičnih vrećica u kojima najčešće biva bačen u kante. Stoga prva obrada otpada započinje prolaskom kroz trgač vrećica (Slika 18) koji s radijalno postavljenim noževima po obodu rotora, reže sve plastične vrećice i omogućava istresanje materijala iz njih.



Slika 18. Trgač vrećica u radu [29]

Potom se rasuti materijal bagerom ukrcava u lijevak s tri pužna vijka na svome dnu (Slika 19) nakon kojeg pada u naredni pužni transporter kojim se šalje na ili odvajanje u turbo separator. Lijevak zapremnine oko osam kubnih metara služi kao svojevrsni međuspremnik za kontinuirano punjenje daljnjeg transportera. Ispod lijevka predviđeni su otvori za iscijedenu vodu iz neprerađene sirovine koja se također šalje u proces.



Slika 19. Ukcavanje sirovine u usipni lijevak [29]

Turbo separator koji prikazuje Slika 20 je stroj za predobradu i izdvajanje nepoželjnih komponenti otpada. U stroj ulazi otpad uz dodavanje vode mlaznicama za intenzivno ispiranje ambalaže. Stroj je cilindrične građe, a glavni vitalni dio mu je rotor s različitim alatima raspoređenim po obodu. Kombinacijom centrifugalne sile, interne cirkulacije zraka i mehaničkog djelovanja, odvaja hranu, plastiku staklo i tekućinu te istresa zaostali otpad iz vrećica. Brzina vrtnje rotora je promjenjiva te može iznositi između 100 i 1000 okretaja u minuti, ovisno o ulaznom materijalu. Ispod rotora se nalaze sita s gradiranim perforacijama, svako za pojedinu frakciju. Temeljito ispražnjene vrećice izlaze na poseban otvor, no često uzrokuju čepljenje sita stoga su na stroju predviđeni poklopci za prilaz unutrašnjosti za jednostavnije čišćenje.

Radi povećanja efikasnosti sortiranja preporuča se ugradnja dva turbo separatora u serijskom spoju jedan iznad drugog kako bi se izbjegao dodatni trošak transportera.

Turbo separator najčešće izdvaja 5 – 10% ulazne sirovine. Izdvojena frakcija spada pod ključni broj otpada 19 12 12 (ostali otpad od mehaničke obrade otpada koji ne sadrži opasne tvari). Za odvoz se plaća naknada, a dalje se može koristiti kao SRF gorivo.



Slika 20. Turbo separator [29]

Nakon separacije, razrijeđena smjesa se gravitacijski ispušta u privremeni spremnik smjese. Spremnik ima ugrađene potopne miješalice koje smjesu održavaju homogenom. Homogenost smjese, ključni je preduvjet održavanja stalne i kontinuirane opskrbe daljnjih dijelova procesa. Pražnjenje spremnika se odvija putem pumpi koje smjesu šalju u filter teške frakcije, a ujedno služe i za cirkulaciju sadržaja spremnika.

Filter teške frakcije ili pjeskolov (Slika 21) odvaja inertni otpad poput stakla, kamenja, školjki, pijeska i slično od čiste organske frakcije. Inertni otpad je onaj koji, u ovom slučaju, ne podliježe kemijskim i/ili biološkim promjenama. Filter je konstantno ispunjen supstratom; tekuća organska frakcija se izdiže i prelijeva u spremnik čiste organske frakcije, prije transporta u pred-spremnik, a teže krute nečistoće upadaju u kosi pužni transporter kojim se odstranjuju iz procesa.



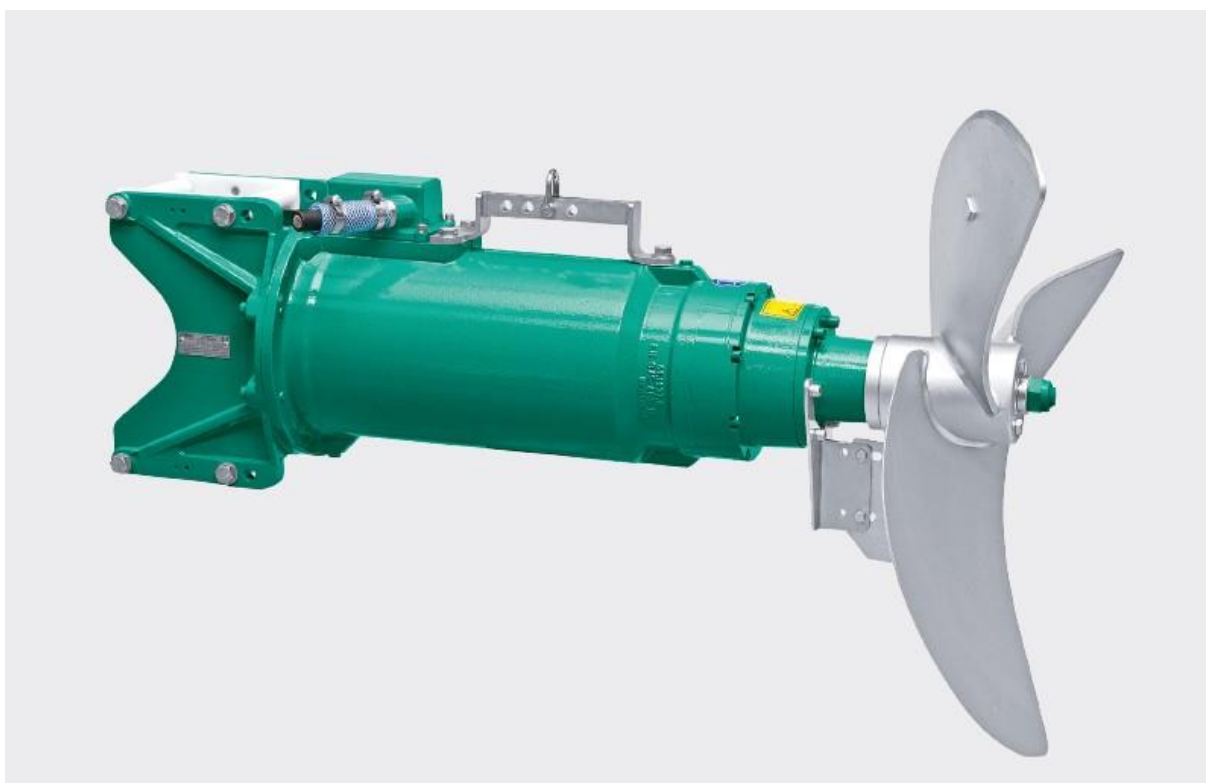
Slika 21. Filter teške frakcije (pjeskolov) [29]

4.2. Pred-digestor

Pred-digestor jest spremnik pripremljene smjese za slanje u digestor. Svrha mu je osiguravanje dostatne količine smjese za opskrbu daljnjeg procesa u slučaju zatajenja nekog elementa za predobradu sirovine. U slučaju kvara na prethodnom segmentu postrojenja, njegov koristan

volumen je dovoljan za 48 sati opskrbe digestora, što je ujedno i dovoljno vremena za izvođenje popravka ili odčepeljivanja. Tim se pristupom omogućava kontinuirani rad postrojenja, bez smanjenja kapaciteta i bez potreba za radom operatera u drugoj ili noćnoj smjeni. Sediment se skuplja na dnu pred-digestora, a njegovo olakšano ispuštanje osigurava konusno dno spremnika.

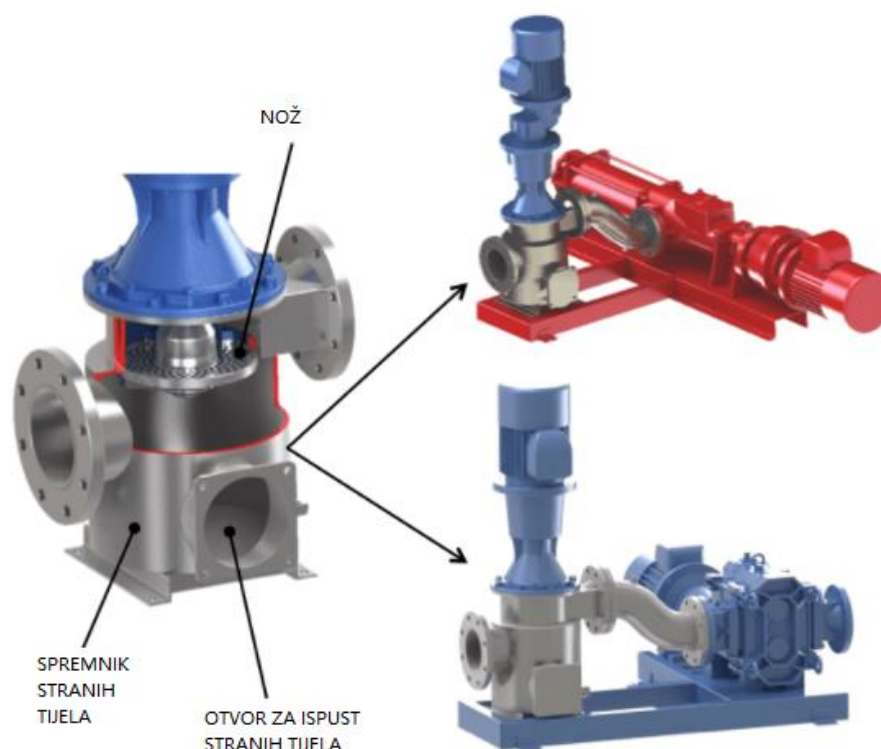
Spremnik je opremljen potopnim miješalicama (Slika 22). Miješalice se postavljaju tako da su uvijek uronjene, minimalno 20-30 centimetara ispod razine te da potiču rotaciju smjese u spremniku. Opremljene su vitlom za podizanje ili spuštanje, a imaju i mogućnost promjene kuta osi propelera. Radnu visinu miješalice određuje razina supstrata u spremniku.



Slika 22. Potopna miješalica [30]

Nadalje; gruba frakcija se usitnjava primarnim mljevenjem gdje se također izvlače zaostala strana tijela poput kamenja, životinjskih kopita, školjki i slično. Stroj se naziva „bio-macerator“ s ugrađenom vlastitom pumpom kojom može opskrbljivati više digestora (Slika 23). Nož za usitnjavanje je oblika cilindrične perforirane ploče s ugrađenim umetcima od wolfram-karbida tvrdoće 50-55 HRC. Pumpa transportira smjesu s ulaza kroz nož koji rotira i melje materiju na čestice veličine 3-5 mm, prema izlazu, dok se neadekvatna frakcija odvaja zasebnim ispustom. Sila rezanja drobilice se održava konstantnom putem pneumatskog upravljanja. Od

preopterećenja je osigurana senzorom koji u tom slučaju zaustavlja rotor i pokreće ga u reverzibilnom smjeru; ako pak sila premaši krajnju graničnu vrijednost, gase se i rotor i pumpa.



Slika 23. Bio-macerator [31]

Nakon drobilice, usitnjeni supstrat preuzima pumpa koja mora biti neosjetljiva na zaostale krute tvari. Za ovu namjenu su se kao najprikladnije pokazale tzv. lobi pumpe (Slika 24). Pri rotaciji, lopatice ne dolaze u kontakt s kućištem niti jedna s drugom, stoga zaostale krute frakcije ne uzrokuju oštećenje ovakve vrste pumpe. Iz istog razloga, pumpa može duže vrijeme raditi „na suho“, bez pregrijavanja. Operativni tlak joj je nizak. Jednostavne je građe, a zahtjevi za održavanjem su minimalni pošto nema kontakta između lopatica. Vratila na koja su pričvršćene lopatice rotiraju u suprotnim smjerovima tijekom rada, opetovano stvarajući, a zatim i urušavajući šupljine unutar tijela crpke, premještajući fluid iz ulaznog otvora crpke oko vanjske strane lopatica crpke do izlaznog otvora. Zahvaljujući obliku lopatica, pumpa u svakom okretaju zahvaća jednak volumen fluida (pritom stvarajući minimalne pulzacije) te se stoga njen protok proporcionalno mijenja promjenom broja okretaja elektromotora. Nedostatak lobi pumpe, kao i svake druge pumpe s pozitivnim pomakom, jest njeno klizanje odnosno povrat

dijela fluida iz izlazne u ulaznu komoru čime gube na efikasnosti. Iznos klizanja ovisi o viskoznosti radnog fluida [32].



Slika 24. Lobi pumpa [29]

U nastavku, smjesa prolazi kroz još jednu drobilicu u kojoj se dodatno melje kako bi bila podatnija za mikrobiološke procese razgradnje. Spojena je u seriju s primarnom drobilicom te radi istovremeno s njome. U slučaju preopterećenja, zaustavlja se sekundarna drobilica i sve uzvodno od nje do pred-spremnika.

Jedan set pumpi je zadužen za internu cirkulaciju smjese tako što se sadržaj s donje polovice spremnika vraća na pjeskolov i tako dodatno filtrira. Daljnja distribucija sedimenta dovela bi do smanjenja efikasnosti procesa te do pojačanog trošenja elemenata.

Vizualna kontrola smjese u pred-spremniku dio je svakodnevne rutine operatera postrojenja. Izvan spremnika ugrađene su stepenice i platforma za olakšan pristup kontrolnom oknu koje se nalazi na samom vrhu spremnika.

4.3. Digestor

Digestor je centralni dio postrojenja; u njemu se odvija oslobađanje bioplina iz smjese digestata procesom prirodne razgradnje organske tvari, točnije anaerobne digestije. Protočni digestor (CSTR) je najčešće izgrađen od armiranog betona kružne forme radi optimalnih uvjeta miješanja, a premazan je slojem epoksidne smole (Slika 25) koji pruža trajnu zaštitu od sumporne kiseline te predstavlja hidro izolaciju. Dno digestora se izrađuje stožastog oblika, sve u svrhu olakšanog ispuštanja nataloženog sedimenta.

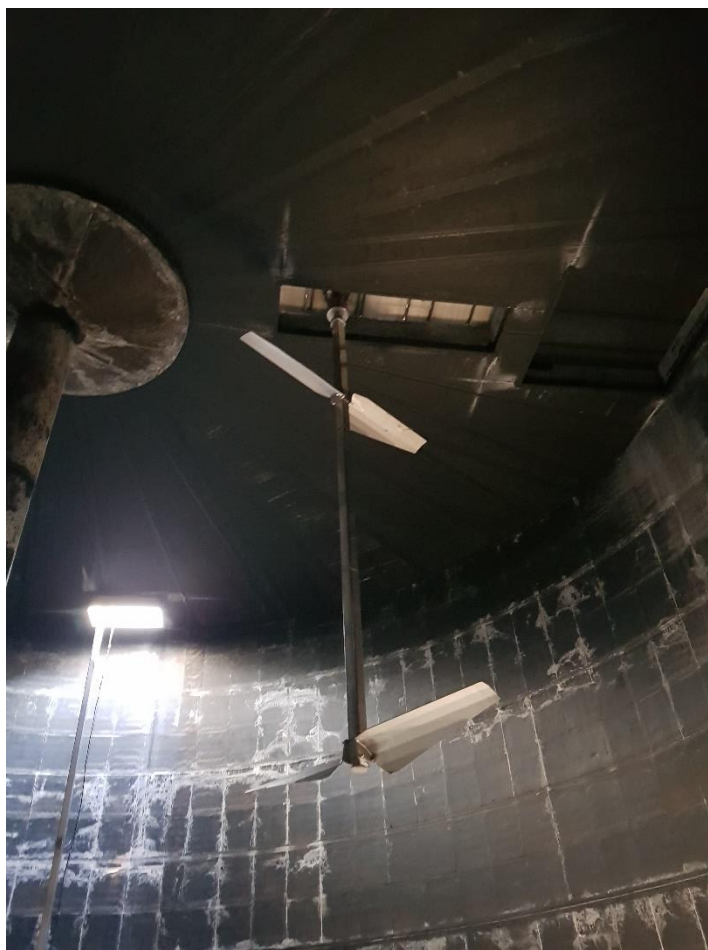


Slika 25. Nanošenje epoksidnog premaza na unutarnju stijenku digestora [29]

Digestor se kontinuirano puni svježom smjesom koja dolazi iz pred-spremnika. Rezervoar digestora je volumno najveći spremnik u postrojenju, a nerijetko ih se ugrađuje više komada. Uvjeti za anaerobnu fermentaciju su ostvareni potpunim brtvljenjem; postotak kisika mora biti manji od 0,5%. U ovom stadiju, smjesa je vrlo osjetljiva na odstupanje od radnih uvjeta. Maksimalna dozvoljena dnevna varijacija temperature je $\pm 1,5$ °C; veća odstupanja bi poremetila aktivnost bakterija što bi dovelo do smanjenja efikasnosti i slabijeg generiranja bioplina. Radna temperatura se mora nalaziti u intervalu od 45°C do 70°C u slučaju termofilne razgradnje, odnosno od 25°C do 45°C u slučaju mezofilne razgradnje. Pošto proces anaerobne fermentacije proizvodi jako malo topline, potrebno mu je dovoditi toplinsku energiju putem izmjenjivača topline. U grijaču izmjenjivača topline se potencijalna energija metana izgaranjem pretvara u toplinsku energiju vode u sustava za grijanje, ako je riječ o grijaču na metan.

Stabilnost procesa fermentacije se poboljšava vanjskim izolacijskim oblaganjem betonskih zidova digestora. Materijal obloge je najčešće kamena vuna ili poliuretanska (PUR) pjena s dodatnom vanjskom valovitom limenom zaštitom od atmosferskih nepravilnosti.

Također, smjesu je potrebno održavati homogenom i stalnog viskoziteta. Spremnici su opremljeni dvostrukim sustavom za miješanje. Vertikalni mikseri (Slika 26) su pogonjeni vanjskim motorom, a rotacija im je spora. Pozicionirani su tako da izazovu prisilno strujanje smjese prema dnu; na taj se način sprječava pojava kore na površini. Površinska kora se ponaša kao nepropustan prekrivač koji ne dozvoljava prolaz bioplina od smjese prema otvorima za plin koji se nalaze na vrhu spremnika. Komponente miješalica moraju ostvarivati potpuno brtvljenje prema smjesi. Problem predstavlja sumporovodik koji agresivno djeluje na velik broj materijala, stoga je potrebno da komponente izložene smjesi budu izrađene od nehrđajućeg čelika AISI304 (1.4301) koji je donekle otporan ili od AISI316 (1.4571) koji je znatno otporan. Polimerne komponente se izrađuju od: PE, PTFE, PP ili poliizobutana.



Slika 26. Vertikalna miješalica u digestoru [29]

Drugi dio sustava miješanja čine potopni mikseri poput onih u pred-digestoru (Slika 22). Oni imaju veću učestalost vrtnje od vertikalnih, a visina im je prilagodljiva pomoću vitla. Komponente su im potpuno izolirane, a sklop miješalice je galvanski odvojen od konstrukcije za vodilicu. Radom u visokom položaju (nedaleko od površine), razbija se površinska kora, a također se smanjuje pjenjenje stvaranjem vrtloga koji pjenu povlači prema dolje. Naime, velik broj malih mjehura plina se lovi za organske dijelove tijekom mikrobne razgradnje čime se oni izdižu na površinu i počinju plutati. Nakupina velikog broja plutajućih organskih dijelova čini pjenu, čija pojava ukazuje na biološki problem u procesu uzrokovan biološkim preopterećenjem ili inhibicijom bakterija.

Razlozi potrebe za kvalitetnim miješanjem smjese digestata u CSTR-u:

- sve molekule u digestoru moraju prisilno doći u kontakt s egzoenzimima (biološki katalizatori) koje proizvode (uglavnom) hidrolitične bakterije i sa svim anaerobnim bakterijama koje same po sebi nisu pokretne
- izbjegavanje stvaranja taloga i začepljenja
- ujednačenost temperature digestata i bolji prijenos topline
- odvajanje mjehurića plina od suspenzije organske tvari i sukladno time izbjegavanje sloja pjene.

Spremnik ima kontrolna okna (Slika 27) na svojem vrhu koja su integrirana u nosaču vertikalnih miješalica, a do kojih se dolazi prilaznim stepenicama kao što je opisano kod pred-digestora. Kontrolira se pojava površinske kore i pjene. Sadrže mlaznice kao dodatak za čišćenje stakla te osvjetljenje okna protueksplozivnom lampom.



Slika 27. Kontrolno okno integrirano u nosač miješalice [29]

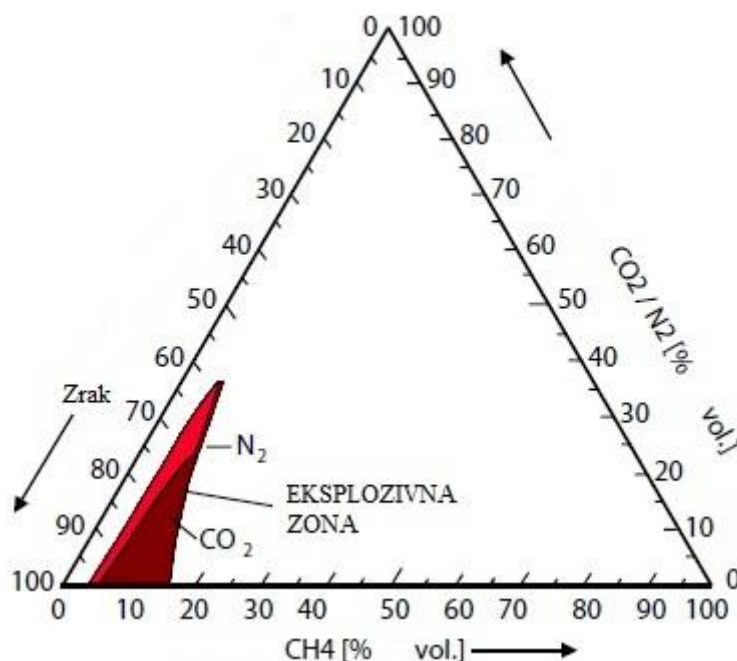
ATEX tehnologija omogućava rad u eksplozivnim atmosferama, a konkretno kod svjetiljki najčešće rješenje je korištenje LED rasvjete. Članice EU dužne su slijediti Direktivu 2014/34/EU koja definira razinu sigurnosti koju proizvod mora zadovoljiti prije puštanja u rad u eksplozivnim atmosferama [32]. Slika 28 prikazuje oznaku neeksplozivne opreme.



Slika 28. ATEX oznaka [29]

Kako se procesom AD stvara zapaljivi energent, upravljanje procesom mora biti na visokoj razini. Sva oprema u dodiru s bioplinom mora biti atestirana uz važeću oznaku ATEX te se

mora osigurati odsutnost vrućih površina, otvorene vatre, mehanički ili električki induciranih iskri, elektrostatičkog pražnjenja i slično. Razlog tome jest opasnost od nastanka eksplozije. Mješavina bioplina i zraka stvara eksplozivnu smjesu pri određenim koncentracija konstituenata; donja granica eksplozivnosti (LEL) je na 5% volumnog udjela metana, a dok je gornja (UEL) na 17% metana. Temperatura zapaljenja bioplina je 700°C, odnosno 595°C za metan. Iz tog je razloga rad s bioplinom najopasniji u fazama prije pročišćavanja jer tada može doći do ulaska u eksplozivnu zonu. Slika 29 prikazuje eksplozivne zone za bioplin [3].



Slika 29. Eksplozivna zona bioplina [3]

Bioplin je kao bezbojan i netopiv u vodi vrlo opasan po ljudsko zdravlje u određenim okolnostima. Naime, sadržaj sumporovodika od 50 ppm (0,005%) do 200 ppm (0,02%) već uzrokuje iritaciju oči i dišnih puteva. Teško trovanje koje dovodi do nesvjesticke ili čak smrti može se očekivati pri 700 ppm (0,07%). Koncentracije sumporovodika u bioplinu mogu prijeći navedene, ovisno o sastavu ulazne sirovine. Iz navedenih razloga, bioplinu se pridaje oznaka R20 što znači da je opasan za udisanje i Xn što znači da je štetan po zdravlje [3].



Slika 30. Oznaka Xn: Štetno po zdravlje

Dodatno, na pristupačnom mjestu nalazi se kuglični ventil za uzimanje uzoraka digestata. Prema prethodno utvrđenom rasporedu, uzimaju se uzorci i šalju na laboratorijsku analizu.

Uz opisani CSTR, koriste se i slijedeće izvedbe digestora:

- a) Digestor s nepomičnom kupolom: Sastoji se od krute kupole s otvorima za ulaz i za izlaz sirovine, a cijeli je ukopan ispod zemlje. Neki ga nazivaju i kineskim tipom digestora [33]. Bioplin se pohranjuje u gornjem dijelu digestora, a njegovo generiranje uzrokuje porast tlaka digestora čime se višak smjese izravno uzdiže do kompenzacijske posude i samog preliva.
Ovakav tip digestora karakterizira dugotrajnost i mali operativni troškovi jer nema pokretnih niti korodirajućih elemenata. Nedostatak leži u nemogućnosti upravljanja procesom, maloj efikasnosti te u promjenjivom tlaku i protoku bioplina [26].
- b) Digestor s plutajućom kupolom: Sastoji se od nepomične cilindrične posude i pomične kupole za skladištenje bioplina. Visina kupole se mijenja ovisno o količini proizvedenog bioplina što omogućuje brzu vizualizaciju količine bioplina. Tlak u digestoru se održava konstantnim promjenjivom masom utega koji pritišću kupolu; posljedično, tlakom se također definira izlazni protok digestata koji se istiskuje prema prelivu. Pomičnost kupole je mudro iskoristiti za miješanje; pošto kupola može i rotirati, dovoljno je s unutarnje strane zavariti lopatice za razbijanje kore i miješanje. U središtu kupole se ugrađuje vodilica koja osigurava linearno pomicanje kupole u vertikalnom smjeru odnosno sprječava naginjanje iste.
- c) Cijevni digestor: Cjevasti balon od elastičnog materijala služi kao digestor i spremnik plina. Miješanje je ograničeno, a tlak se može mijenjati pritiskom na stijenku, pazeći pritom da se ista ne ošteti. Balon se jednostavno ugrađuje bez velikih zahvata pripreme, no kao takav ima relativno kratki vijek trajanja. U slučaju zakopavanja polovice digestora, dio membrane koji ostaje iznad razine tla mora biti otporan na UV zračenje, a crnim obojanjem se postiže prirodno upijanje sunčeve topline [26].
- d) Garažni obročni digestor: Hermetički zatvoren spremnik predstavlja digestor suhe digestije, šaržnog tipa. Sadržaj kontejnera se nakon punjenja ne miješa, ali se zato zalijeva vodom koja se recirkulira s dna nakon zahtijevane ubrizgane količine. Suhom digestijom se smatra ona čija smjesa ima više od 15% suhe tvari tj. ne znači da vlaga nije poželjna, štoviše, manjak vlage ne pogoduje rastu bakterija [26].

4.4. Post-digestor

Nakon što je digestat oslobodio sav svoj metanski potencijal, isti se transportira do post-spremnika koji ima dvojaku funkciju; skladištenje iscrpljenog digestata i skladištenje bioplina. Spremnik je također napravljen od armiranog betona no često bez izolacije, a pokriven je dvostrukom fleksibilnom membranom.

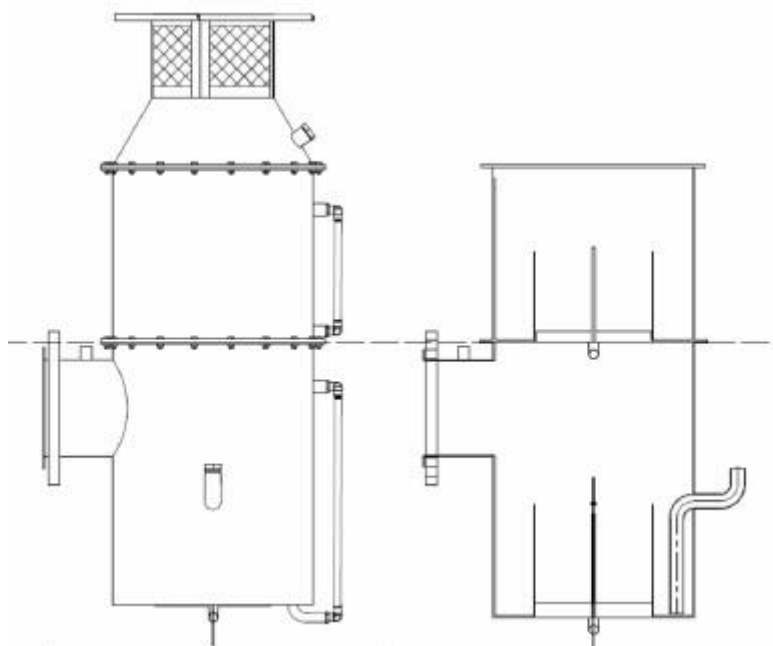
Bioplin se skuplja na vrhu spremnika ispod krovne membrane poput one koju prikazuje Slika 31. Membranu sačinjavaju dvije međusobno zavarene stijenke između kojih je zrak; donja je izrađena od jednog dijela pošto je kontaktu s bioplinom, dok je gornja u kontaktu samo s okolinom. Membrane su izrađene od poliesterskih vlakana obloženih PVC folijom, a za spremnik se učvršćuju nehrđajućim sidrenim vijcima. Vanjska membrana pruža otpornost na UV zračenje, temperaturu, tlak i vremenske neprilike te tako štiti spremnik od vanjskih utjecaja. Između stijenki se upuhuje zrak kojim se održava konstantan tlak bioplina u post-spremniku, neovisno o količini bioplina. Time je omogućeno da izlazni protok plina ostane konstantan, a membrana nategnuta. Zrak na ulazu u međuprostor između membrana prolazi kroz nepovratni ventil koji služi kao sigurnost u slučaju zatajenja ventilatora. Zrak se ispuhuje putem sigurnosnog ventila tek kada tlak premaši zadanu vrijednost. U prostor između membrana je ugrađen senzor metana koji služi za detekciju propuštanja donje membrane. U središte (cilindričnog i vertikalnog) spremnika ugrađuje se potporna noga s trakama koje se protežu do zidova, a služe za nošenje donje membrane u slučaju uvjeta potlaka. Spremnik ima zadaću privremenog skladištenja bioplina, kompenzacije varijacija u proizvodnji pa tako i smanjenja gubitaka bioplina koji bi inače bio spaljen na baklji u slučaju pojačane proizvodnje.



Slika 31. Spremnik bioplina [29]

Betonski zid post-digestora je obložen epoksidnim premazom, kao i kod digestora, a sadržaj spremnika se prati putem kontrolnog okna. Sadržaj spremnika se također miješa putem jedne koso montirane miješalice.

Svaka vrsta spremnika u kojima se manipulira s plinovima zahtijeva neku vrstu osiguranja od prepunjenosti ili prekomjernog tlaka. Membranski spremnik bioplina je opremljen s ventilom s hidrauličnom brtvom (Slika 32). Sastoji se od dva dijela; gornji dio ograničava maksimalni dozvoljeni tlak u spremniku, a donji sprječava potlak. Unutar gornjeg dijela ventila nalazi se vođeni klip koji je djelomično uronjen u vodu i opterećen s protutezima. Masa protutega definira željeni maksimalni tlak fluida (kalibracijski tlak) u spremniku. U slučaju prekomjernog porasta tlaka bioplina, klip se izdiže iz tekućine i šalje se izravno na sigurnosni ispust. Donji dio ventila također sadrži vođeni klip no vrlo lagane građe i bez utega na sebi. Klip je s gornje strane u kontaktu s bioplinom, a s donje s atmosferskim zrakom te je također uronjen u vodu da se osigura potpuno brtvljenje. Primjer intervencije ovog dijela ventila jest situacija prekomjerne konzumacije skladištenog bioplina što može uzrokovati potlak u spremniku, pa tako i u ventilu; atmosferski tlak postaje veći od onog u ventilu te dolazi do podizanja klipa što omogućuje slobodan prodor zraka u spremnik sve do postizanja ravnotežnog stanja. Radni tlak je 5 mbar, a maksimalni projektirani je 9 mbar.



Slika 32. Sigurnosni ventil spremnika bioplina [29]

Za pravilan rad ventila, obavezno je održavanje razine tekućine, a što se izvodi učestalim kontrolama ili pak sustavom „kap na kap“ s odgovarajućim prelivom. Voda je dobar fluid za brtvljenje, no ipak se preporuča ulijevanje tekućine otporne na smrzavanje (antifriz), pogotovo u hladnijim podnebljima kako ne bi došlo od blokiranja ventila. Važno je da ventil nema električnih niti mehaničkih komponenti koje mogu uzrokovati iskrenje [34].

4.5. Dekantiranje – sustav isušivanja digestata

Obradjeni digestat se vijčanim pumpama dozira u sustav za otklanjanje vode, odnosno u dekanter. Voda se uklanja fizikalnim postupkom, na principu centrifugalne sile. Nakon homogenizacije smjese u post-digestoru, ista se vijčano-ekscentričnom pumpom pumpa u dekanter. Ova pumpa obavezno mora imati ugrađen brojač okretaja te joj brzina vrtnje mora biti promjenjiva kako bi se dekanteru isporučivao odgovarajući protok digestata. Spomenuta pumpa primjenu nalazi kod transporta viskoznih i abrazivnih smjesa, što je u ovom slučaju digestat. Vijčano-ekscentrična pumpa se sastoji od elastičnog statora s dvovojnom zavojnicom po svojem unutrašnjem obodu i rotora oblika jednovojne navojne šipke velikog koraka navoja kao što prikazuje Slika 33. Vijak rotora prilikom vrtnje deformira gumeni stator te stvara zabrtvljene komore odnosno šupljine koje se pomiču spiralnim gibanjem, što uzrokuje kretanje radnog fluida te samostalno usisavanje na svojem ulazu. Os rotacije rotora se ne podudara s

onom od motora stoga se između rotora i vratila elektromotora ugrađuje elastični element za kompenzaciju. Učestalost vrtnje korištene pumpe je znatno manja od centrifugalnih pumpi, oko 200-500 okretaja u minuti, što joj pak produljuje životni vijek. Izlazni protok pumpe je miran, bez negativnih pulzacija. Izlazni tlak pumpe varira ovisno o duljini rotora i statora; što su oni dulji, pumpa postiže veći tlak na izlazu.



Slika 33. Presjek vijčano-ekscentrične pumpe [31]

Razlozi odabira vijčano ekscentrične pumpe za pražnjenje digestata:

- jednolik protok proporcionalan broju okretaja omogućuje doziranje
- samousisavajući efekt
- crpljenje nehomogenih fluidnih smjesa koje mogu sadržavati plinove, abrazive ili krute tvari
- crpljenje tekućina visokog viskoziteta
- jednostavna građa pumpe bez ventila
- minimalno naprezanje fluida tijekom pumpanja zbog izostanka izražene centrifugalne sile
- visoki tlakovi izlaznog fluida [31].

Centrifugalni ekstraktor ili dekanter (Slika 34) odvaja kruti od tekućeg dijela iz smjese. Glavni promjenjivi parametar dekantera je razlika u brzini vrtnje (klizanje) vanjskog cilindričnog dijela (bubnja) i unutarnjeg pužnog transportera. Njegovo povećanje uzrokuje povećanje momenta električne kočnice, koja mijenja iznos momenta ovisno o zadanom klizanju. Da se izbjegne preopterećenje električne kočnice uzrokovano previskoznom smjesom, na ulazu pašte dozira se i dodatna količina vode. Princip odvajanja jest centrifugalna separacija sastojaka zbog različite gustoće. Središnji pužni vijak „gura“ kuti digestat prema njenom izlazu, a pošto sve zajedno rotira velikom brzinom, po obodu bubnja se stvara sloj vode odvojen od digestata, koji praktički suh izlazi iz stroja. Jednostavnije rečeno, dekanter procjeđuje iz digestata njegove tekuće dijelove; stoga, ako je digestat mokar na izlazu, to ukazuje da postoji problem u radu. Bujanj ima varijabilan promjer izveden pomoću koničnog prijelaza s većeg na manji prema izlazu za krutinu (a bitno je za napomenuti da rotira istom brzinom kao i prošireni dio u kojem se nakuplja

tekuća frakcija jer je sve jedna cjelina). Na samom obodu skuplja se element s najvećom gustoćom, a to je voda. Izdvojena voda nije samo ona koja se dodaje izravno u dekanter radi bolje fluidnosti i redukcije momenta, nego i sva voda prethodno dodana u procesu te voda iz same sirovine. Opisan je rad dvofaznog dekantera, dok postoji i trofazni, koji odvaja krutinu i dva različita tekuća konstituenta; primjenu nalazi kod postrojenja poput onih za proizvodnju maslinovog ulja gdje se iz samljevenog ploda izdvaja ulje, voda i suha komina koja se dalje može preraditi kao sirovina za proizvodnju peleta.



Slika 34. Dekanter [29]

4.6. Pročišćavanje otpadnih voda

Nizvodno od dekantera, nalazi se spremnik u kojem se akumulira tekuća frakcija odvojena od krutog digestata. Spremnik služi za privremeno skladištenje odvojene vode, prije slanja na njen daljnji tretman. Većina tekuće frakcije se vraća u proces, a višak se šalje na pročišćavanje te se ispušta u sustav javne kanalizacije. Višak vode koji se ispušta iz procesa mora zadovoljiti mjerodavne kriterije za ispuštanje u okoliš. Najčešće mjereni parametar za mjerenje organske opterećenosti jest kemijska potrošnja kisika (KPK). Određuje se pomoću kalijevog dikromata u sumpornom mediju. Oksidacijsko sredstvo oksidira sve topive organske tvari u vodi, zajedno s mineralnim solima [35].

Dozvoljene veličine KPK ispuštenih voda su do 200 mg/L, a vode iz procesa AD često imaju sadržaj KPK preko 1000 mg/L. Sve iznad dopuštenog, u površinskim vodama uzrokuje prekomjerno trošenje kisika iz vode pa tako i njegov manjak vrstama koje žive u vodi [26].

Sva voda koja je na neki način bila prisutna u postrojenju se smatra otpadnom, kada više nije potrebna u procesu. Kao takvu, potrebno ju je pripremiti za ispuštanje u sustav javne

kanalizacije ili u okoliš. Sustav pročišćavanja voda predstavlja jako veliku investiciju ako se implementira u sklopu postrojenja. Stoga je idealna lokacija biopostrojenja ona koja u neposrednoj blizini ima pročištač u funkciji. Otpadne vode se obrađuju u slijedećim koracima:

- a) Prvi stupanj pročišćavanja: Obuhvaća fizikalne i/ili kemijske postupke čišćenja. Cilj je uklanjanje barem 50% suspendiranih tvari te smanjenje biološke potrošnje kisika (BPK) za barem 20%. Tehnologije pročišćavanja prvog stupnja su jednostavne naprave za mehaničku obradu, poput rešetki i sita za veća strana tijela, a također uklanjaju se teške čestice i masnoće u pjeskolovima i mastolovima. Pročišćavanje ove vrste često nije potrebno za otpadnu tehnološku vodu nakon AD jer je supstrat prošao kroz sličnu obradu prije ulaska u digester te kroz proces mljevenja. Također, masnoće nisu poželjne u sastavu supstrata jer imaju jako dugo vrijeme raspada, pa se zaobilazi korištenje sirovine koja ih sadrži.
- b) Drugi stupanj pročišćavanja: Primjenjuje biološke i slične postupke čišćenja kako bi se koncentracija suspendirane tvari i BPK_5 smanjile za 70-90%, a koncentracija KPK barem za 75%. Glavnina procesa je uklanjanje organskih tvari poput proteina, ugljikohidrata, masnoća, ulja, uree i sintetskih organskih molekula (nova zagađivala). Organska tvar se uklanja sljedećim mehanizmima: biološka razgradnja, adsorpcija na mediju (nerazgradive i toksične organske tvari) i otplinjavanje (hlapljive organske tvari). Biološka razgradnja je aeroban proces, stoga se voda podvrgava aeraciji kako bi se postigla optimalna koncentracija otopljenog kisika u vodi, a koji je potreban za rad bioloških procesa. Proces podrazumijeva mehaničku disperziju mjehurića zraka kroz vodu čime se radna tvar usput dobro izmiješa te otapanje kisika i njegov prijelaz u kapljevitu fazu.
- c) Treći stupanj pročišćavanja: Provodi denitrifikaciju nitrata u dušik koji se lako otplinjuje. Time se dolazi do glavnog cilja ove faze, a to je uklanjanje nutrijenata poput dušika i fosfora. Postiže smanjenje trofije (prihranjenosti) vodenih ekosustava. Mulj na kraju procesa sadrži precipitirane fosfate.

4.7. Aerobno kompostiranje

Nakon centrifugalnog isušivanja, kruta frakcija digestata se miješa s usitnjenim matricama za strukturiranje poput slame, sijena i drvene sječke te šalje na finalni proces ubrzane biooksidacije. Proces konzumira kisik za razliku od prethodnih i traje oko 30 dana. Kao rezultat

se dobiva nutritivno bogat kompost koji se dalje može koristiti kao organsko gnojivo za obogaćivanje poljoprivrednih tla.

Druga opcija jest plaćanje odvoza neprerađenog digestata kompostanama na daljnju preradu što je dugoročno neisplativo.

Proces AD pri mezofilnim temperaturama ne ubija viruse i bakterije. Njihova koncentracija je obrnuto proporcionalna vremenu zadržavanja smjese u digestoru. Idealan slučaj, promatrano sa strane ubijanja patogena (organizmi koji mogu stvoriti bolest), jest zadržavanje digestata do potpune razgradnje. U praksi se navedeni postupak niti ne pokušava postići jer bi isti zahtijevao nesrazmjerna predimenzioniranja opreme postrojenja u odnosu na korist ostvarenu proizvodnjom bioplina [26].

Iz tog razloga se javlja potreba za higijenizacijom digestata ovisno o vrsti supstrata.

4.8. Sustav grijanja

Proces anaerobne digestije odvija se kod temperatura viših od okoline, stoga mu je potrebno dovoditi toplinu kako bi tekao u željenom smjeru. Najboljim rješenjem se smatra sustav vanjskog izmjenjivača topline s protusmjernim strujanjem, tzv. „cijev u cijevi“. Cijevi su postavljene koaksijalno; kroz unutarnju se upumpava smjesa digestata u jednom smjeru, a kroz vanjsku zagrijana voda i to u suprotnom smjeru čime su postignuti optimalni uvjeti prijenosa topline. Jednostavnija izvedba izmjenjivača topline jest spiralna verzija. Ona podrazumijeva ugradnju potrebnog broja zavoja cijevi u digestoru kroz koju prolazi zagrijana voda (Slika 35). Takva verzija zahtijeva ugradnju manjeg broja elemenata no također pruža manju efikasnost prijenosa topline.



Slika 35. Cijevi izmjenjivača topline u digestoru [29]

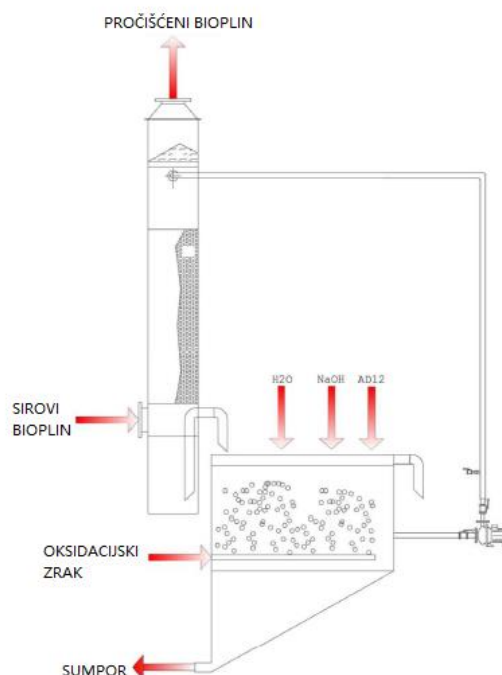
4.9. Pročišćavanje bioplina

Nakupljeni bioplin u post-spremniku pored metana sadrži i ugljikov dioksid, vodenu paru i određenu koncentraciju sumporovodika kao što prikazuje Tablica 8. Svježi bioplin ima relativnu vlagu do 100%, ovisno o temperaturi fermentacije i sastavu digestata. Stoga je, prije samog procesa odstranjivanja H_2S , iz plina potrebno izdvojiti kondenziranu vodu putem zamke za kondenzat u obliku nagle promjene smjera cjevovoda u obliku sifona. Proces se naziva sušenje bioplina, a voda se sakuplja u najnižoj točki cjevovoda te vraća u proces. Sušenje je bolje što je cjevovod dublje smješten ispod zemlje. Na taj se način izbjegava pojava sumporne kiseline koja nagriza sve nizvodne elemente cjevovoda. Ostala rješenja uklanjanja vode su molekularna sita ili adsorpcijom aktivnim ugljenom. Drugi, ali i skuplji način sušenja bioplina jest ugradnja sustava za snižavanje temperature (engl. *gas chiller*) koji temperaturu spušta s $35^{\circ}C$ na $5^{\circ}C$.

Pročišćavanje bioplina je orijentirano na uklanjanje sumporovodika (H_2S) i hlapljivih organskih spojeva (VOC). Sumporovodik je neželjeni konstituent prisutan u gorivima koji svojim izgaranjem stvara sumporov dioksid koji pak stvara kisele kiše. Plin je bez boje, ali s intenzivnim neugodnim mirisom pokvarenih jaja. Otrovan je u koncentracijama višim od 15

ppm. Sirovi bioplin obično sadrži preko 200 ppm-a H_2S -a, sve do vrijednosti do 2000 ppm-a [26]. Pročišćavanje se često provodi putem filtera s aktivnim ugljenom, a nazva se suhim odsumporavanjem. Ugljen na sebe veže štetne spojeve stoga ga je potrebno mijenjati kada dođe do njegova zasićenja. Kapacitet vezivanja se naziva nosivost ugljena, a predstavlja masu apsorbiranih hlapljivih tvari u odnosu na masu samog ugljena. Na zasićenje ukazuje jednaka količina onečišćujuće tvari na ulazu i izlazu filtera. Aktivni ugljen može svoju funkciju vezanja sumporovodika obavljati u atmosferi s kisikom ili u vodi. Takvim postupkom filtracije, moguće je doseći količinu sumporovodika manju od 10 ppm-a. Na sličan princip funkcionira i odsuportavanje željeznim filterima. Sustav uklanja do 90% zagađivača iz plina.

Druga izvedba sustava odsumporavanja jest kontinuirano prskanje bioplina otopinom sode i vode pa se sukladno tome proces često naziva i pranje bioplina odnosno mokro odsumporavanje kao što prikazuje Slika 36. Sustav se sastoji od visokog tornja opremljenog sa serijski spojenim komorama s mlaznicama i filtracijskim jastucima te spremnika za oksidaciju. Proces apsorpcije je čisto fizički proces; CO_2 i H_2S su više topivi u vodi od metana te ih stoga raspršene kapljice povlače prema spremniku za oksidaciju, dok se bioplin slobodno izdiže. Bioplin se zatim provodi kroz odvlaživač kako bi se uklonile zaostale kapljice vode iz procesa; „smočeni“ plin se prilikom dizanja provlači kroz gustu metalnu mrežu na kojoj se vlaga sakuplja zbog utjecaja inercije. Na mreži se počinju formirati sve veće kapljice vode sve dok ne postanu preteške i počnu padati prema dnu spremnika pod djelovanjem gravitacijske sile, odnosno do trenutka kada gravitacijska sila nadvlada silu površinske napetosti same kapljice. Usput se uklanjaju prašina, silikati i uljna magla iz plina [36].

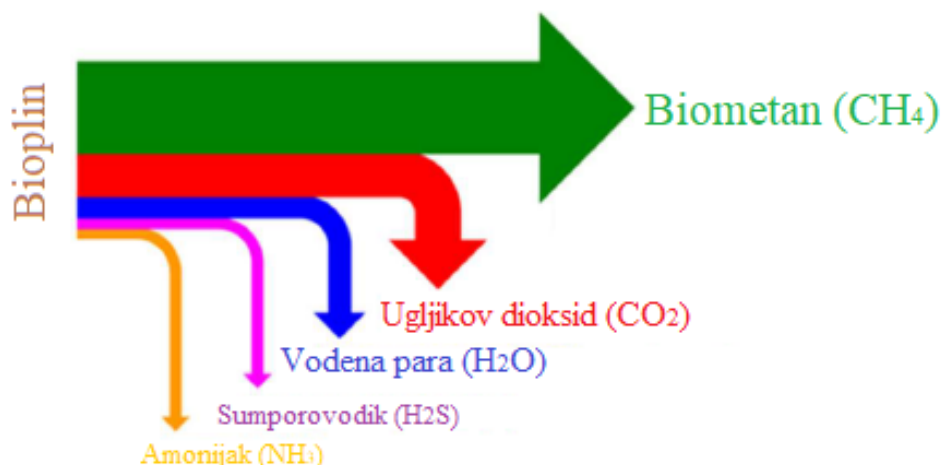


Slika 36. Shematski prikaz mokrog odsumporavanja [29]

Na dnu tornja se nalazi ispust prema spremniku za oksidaciju u kojeg se sliva tekućina s apsorbiranim sumporom i nečistoćama. U njemu se pak odvija proces oksidacije pomoću odozdo upuhanog zraka. Spremnik za oksidaciju sadrži mjernu sondu za praćenje pH vrijednosti otopine koja se regulira doziranjem sode.

4.10. Poboljšanje bioplina

Dobivena smjesa plinova se naziva bioplin, a sadrži metan, ugljikov dioksid, vodu, amonijak i zaostali sumporovodik (Tablica 8). Željeni proizvod je biometan, odnosno čisti metan. Bioplin je potrebno tretirati postupcima poboljšanja i filtracije kako bi se došlo do ciljanog proizvoda sa što većom ogrjevnom vrijednošću. Poboljšanje (engl. *upgrading*) podrazumijeva separaciju metana od ostalih plinova, kako je prikazano ilustrativnim Sankeyevim dijagramom (Slika 37), a sve kako bi se postigla kvaliteta u rangu prirodnog plina što je preduvjet za ubrizgavanje u regionalnu mrežu prirodnog plina ili udaljenu konzumaciju.

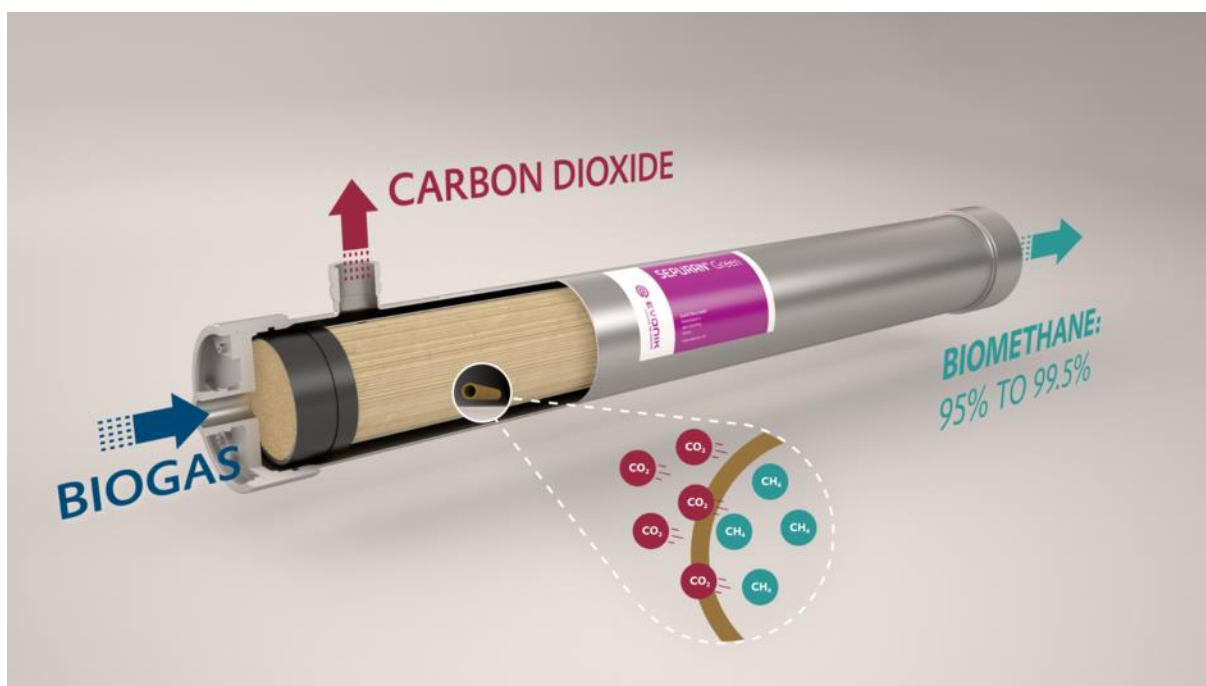


Slika 37. Sankeyev dijagram poboljšanja bioplina

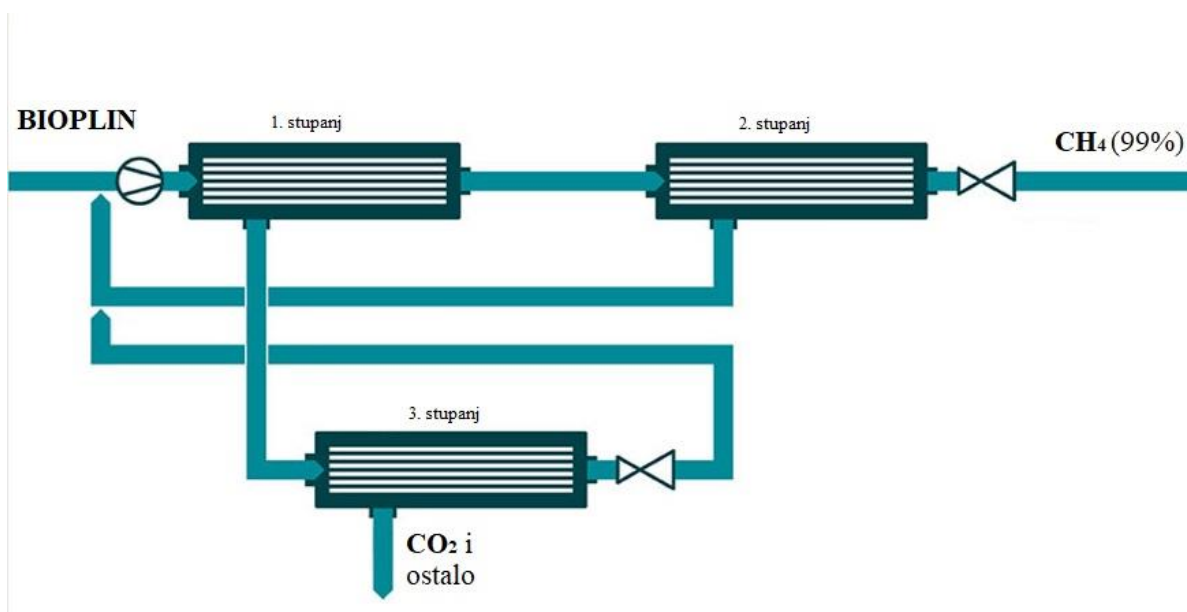
Tržište nudi brojne tehnologije odvajanja ugljičnog dioksida i poboljšanja kvalitete poput: ispiranja vodom, kriogenog odvajanja, membranske tehnologije, fizičke adsorpcije, kemijske apsorpcije, PSA metode i sl. Sve veću primjenu doživljava membranska tehnologija zbog jednostavnosti procesa i održavanja te dobrih rezultata; ista će biti objašnjena u nastavku.

Membrane (Slika 38) su izrađene od plastike na bazi poliamida koja se prerađuje u visokoučinkovite filtracijske elemente. Filtracijska svojstva membrana dobivaju se centrifugalnim djelovanjem kojim se postiže struktura šupljih vlakana nalik tankim špagetima. Sustav se sastoji od više komora te ima integriran sustav sušenja. Komprimirani sirovi bioplin se dovodi na strani napajanja te se upuhuje unutarnje šupljine vlakana; ugljični dioksid se usmjerava prema van na izlaz za prožimanje koji se nalazi u zoni potlaka tako što prolazi kroz stijenku vlakana, dok metan produljuje svoj put kroz šupljinu prema izlazu na retentnoj strani visokog tlaka. Molekule CO_2 su znatno manje od molekula CH_4 te zbog toga puno brže prolaze kroz membranske mikropore i na taj se način odvajaju. Čistoća biometana seže do 99% zahvaljujući obradi plina kroz tri faze. Najbolje rezultate je pokazala konfiguracija od dva serijski spojena stupnja s trećim, paralelno spojenim kao što je prikazuje Slika 39 [37].

Odvojeni ugljikov dioksid je nusproizvod koji se naknadnim filtriranjem može pripremiti za neku novu primjenu, na primjer kao tehnički plin za stvaranje aktivne atmosfere zavarivanja.



Slika 38. Membranska tehnologija poboljšanja bioplina [37]



Slika 39. Shema tro-stupanjskog membranskog sustava poboljšanja bioplina [37]

Sustav internog plinovoda je osiguran senzorom tlaka koji u slučaju detekcije porasta tlaka, višak šalje izravno na baklju za spaljivanje. Baklja je smještena na sigurnosnu udaljenost od postrojenja, no njeno aktiviranje uvijek povećava rizik od eksplozije.

5. STUDIJA SLUČAJA – BIOPLINSKO POSTROJENJE

5.1. Otpad u Istarskoj županiji

Istra, kao vodeća turistička regija Hrvatske, pod velikim je opterećenjem sektora gospodarenja otpadom. Količine KO po stanovniku su najviše u Istarskoj županiji i iznose 681 kg (za 2018. godinu). Razlog tome jest velik broj turista tijekom ljeta naspram relativno malog broja stanovništva (samo 5% Hrvata živi u Istri) [15]. Posljedično, javlja se problem preopterećenja centara za razvrstavanje otpada poput problema na ŽCGO Kaštijunu koji je projektiran baš za dnevnu prosječnu količinu proizvedenog otpada u Istri. Kapacitet postrojenja biološko-mehaničke obrade je 390 t/danu što približno odgovara umnošku 0,681 t/otpada po stanovniku i 207.939 stanovnika, podijeljenim s brojem dana u godini. „Turistički“ otpad je u 2018. godini narastao za 86% naspram 2014. godine. Preko 30% ukupno proizvedenog „turističkog otpada“ u RH (Tablica 9) iz 2018. godine je bilo proizvedeno u Istarskoj županiji, točnije 33,82% odnosno 43.681 tona. Razlog tome jest broj zabilježenih turističkih noćenja u Istri od 33.939.916 noćenja što je najviše u usporedni s drugim županijama [14].

Tablica 9. Količine otpada iz turizma u RH po godinama

GODINA	KOLIČINA KO IZ TURIZMA / t	UDIO U UKUPNOM KO / %	EKVIVALENTNO BROJU STANOVNIKA
2014.	88.844	5,4	232.576
2015.	98.960	6,0	256.374
2016.	139.535	8,3	355.956
2017.	155.958	9,1	374.899
2018.	165.251	9,3	382.525
2019.	171.505	9,5	386.273
2020.	83.794	5,0	200.464

Vidljiv je značajan pad količina otpada iz turizma u 2020. godini iz već navedenih razloga. Pad od preko 50% u odnosu na prethodnu godinu, vratio je proizvedenu količinu otpada iz turizma na vrijednost ispod one iz 2014. godine.

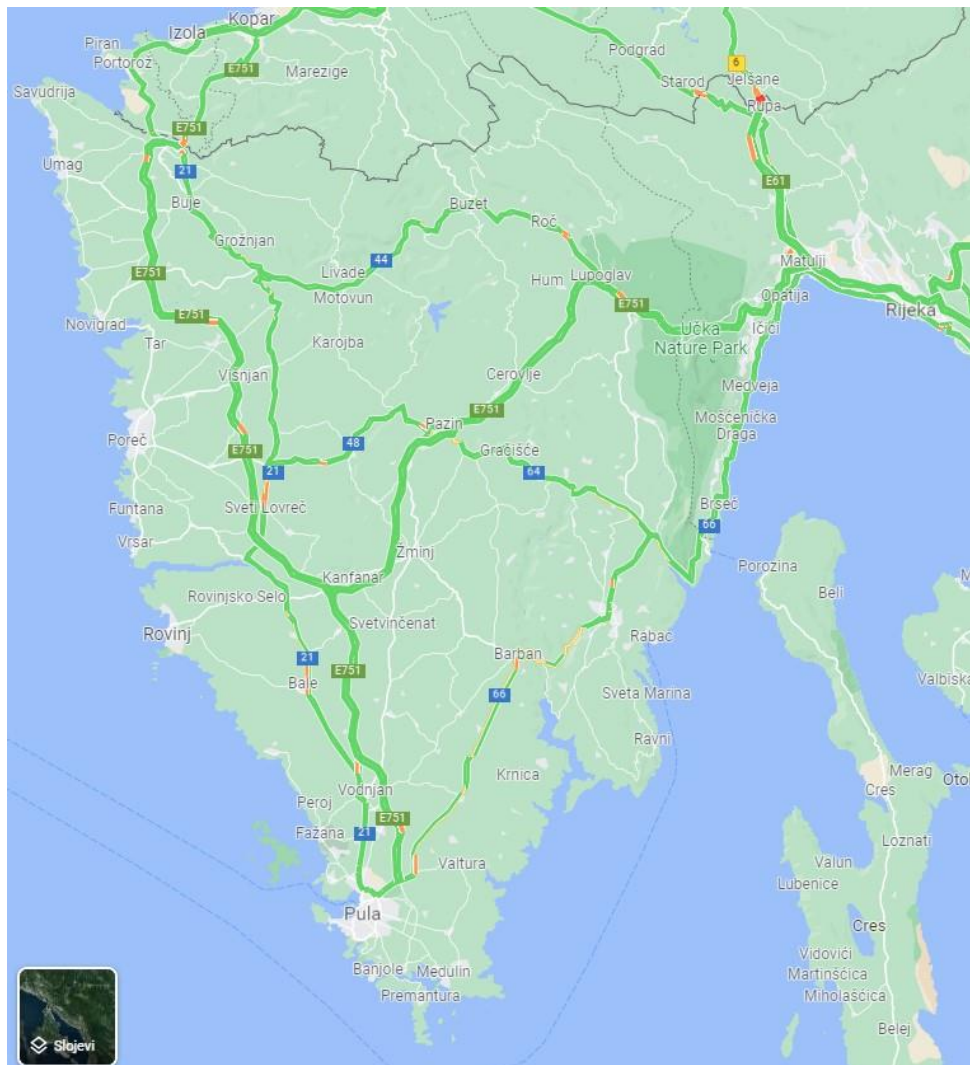
Od presudne važnosti za ovaj rad je podatak o raspoloživim količinama sirovine za preradu u biopostrojenju. Velike količine KO podrazumijevaju i velike količine biorazgradivog otpada. Unatoč značajnom padu proizvodnje otpada u 2020. kao što je već spomenuto, u Istarskoj županiji je proizvedeno 55.351 tona biorazgradivog KO što je 6,6% od ukupne količine

biorazgradivog otpada u RH. Gledano sa strane ekologije taj podatak zabrinjava, no gledano sa strane ulaganja u bioplinsko postrojenje, on pobuđuje svijest i važnosti projekata slične namjene.

5.2. Odabir lokacije postrojenja

Lokacija postrojenja predstavlja „vrući krumpir“ kojeg se svatko pokušava prebaciti nekome drugome. Za očekivati je pružanje otpora stanovnika okolnih područja ka izgradnji postrojenja u koje se navozi otpad. No, prilikom odabira mikrolokacije postrojenja potrebno je donositi racionalne odluke, temeljene na znanju i iskustvu te educirati građane o koristi takve investicije. Idealna lokacija mora omogućava jednostavan pristup mreži autocesta kojima se dovozi najveći dio sirovine. Poželjna je i blizina željezničke infrastrukture. Prostor mora imati mjesta za širenje u slučaju povećanja kapaciteta. Također, blizina napuštenih industrijskih hala značajno ponderira izboru lokacije, a koje se mogu koristiti kao prostori za skladištenje i predobradu sirovine. Nadalje, kao što je već navedeno, bioplinsko postrojenje zahtijeva interni ili eksterni pročistač otpadnih voda; stoga, postojanje pročistača u blizini također lokaciju čini pogodnijom.

Uzimajući u obzir spomenute kriterije i lokacije ciljanih dobavljača sirovine, idealna lokacije postrojenja jest centralna Istra, točnije industrijska zona „Pazinka“ u predgrađu grada Pazina. Nalazi se na križanju glavnih trakova autoceste kroz Istru kao što prikazuje Slika 40 i tako je povezana s Pulom i Rijekom gdje se nalaze županijski centri za gospodarenje otpadom (ŽCGO). U ovom slučaju odlagališta otpada predstavljaju dio dobavljača sirovine. Također, sa spomenutim gradovima, Pazin je povezan i željezničkom infrastrukturom. „Pazinka“ je kompleks industrijskih hala od kojih je dio prazan, a koje bi mogle poslužiti za skladištenje sirovine, kompostiranje digestata ili pak predobradu sirovine. Lokacija je udaljena više od 400 metara od prvog naselja, što zadovoljava standarde o minimalnoj udaljenosti do naseljenog mjesta. Uza sve navedeno, u radnoj zoni „Pazinka 2“ nalazi se aktivni pročistač otpadnih voda, a s kojim su mogući pregovori oko suradnje. Radna zona „Pazinka 2“ trenutno pruža nešto više od tri hektara raspoloživog građevinskog zemljišta, a od pročistača je udaljena oko 750 metara [38].



Slika 40. Cestovna infrastruktura u Istri [38]

5.3. Transport otpada

Biootpad je, koliko god ga bilo proizvedeno, teško dostupan kao sirovina. Razlog tome leži u činjenici kako su lokacije zbrinjavanja ili oporabe otpada udaljene od samih mjesta nastajanja istoga. Otpad je potrebno na neki način transportirati od kućanstava i industrija do ciljne lokacije. Najčešća vrsta transporta je putem cestovnog prometa; kamionima pogonjenim uglavnom na fosilna goriva. Takva prijevozna sredstva proizvode niz štetnih plinova putem motora s unutarnjih izgaranjem, a kao takvi neće biti zamijenjeni u skorijoj budućnosti. Stoga je potrebno prilikom izrade idejnog ili projektnog rješenja, u slučaju ovog rada bioplinskog postrojenja, u obzir uzeti utjecaj udaljenost transporta na rentabilnost sustava (s ekonomske strane, ali i sa strane štetnih emisija).

Prometni sektor u EU generira 30% emisija CO₂, a od toga cestovni promet sudjeluje s preko 70%. Nadalje, odmah nakon automobila, po emisiji CO₂ slijede teški i laki kamioni s kumulativnim postotkom od 38,1% prema podacima iz 2016. godine [39].

Ako je odabrana lokacije izgradnje bioplinskog postrojenja u središtu Istre, točnije u Pazinu, tada su svi gradovi županije udaljeni manje od 55 km kao što prikazuje Tablica 10 [40].

Tablica 10. Prometne udaljenosti gradova u Istri do Pazina

RELACIJA	UDALJENOST <i>S</i> / km
Pula-Pazin	50
Umag-Pazin	55
Poreč-Pazin	32
Labin-Pazin	33
Buje-Pazin	40
Buzet-Pazin	30
Novigrad-Pazin	47
Rovinj-Pazin	37
Vodnjan-Pazin	38
Pazin-Pazin	0

Približan proračun puta potrebnog za prikupljanje otpada u Istri:

Prosječan put:

$$S_{sr} = \frac{\sum S}{n_R} \quad (2)$$

Gdje je:

S_{sr} km prosječna udaljenost relacije

S km udaljenost relacije

n_R / broj relacija.

$$\tilde{S} = \frac{\sum S}{n_R} = \frac{50 + 55 + 32 + 33 + 40 + 30 + 47 + 37 + 38 + 0}{10} = 36,2 \text{ km}$$

Uz prosječnu potrošnju kamiona od 18 L/km te prevoženje punim kapacitetom od 3t stlačenog biootpada omjernom 6:1, potreban broj prijevoza godišnje je 5.000 tura za 15.000 tona otpada. Ako je prosječan ukupni put po ruti 72,4 km, tada se dolazi do potrošnje od 4,3 L dizelskog

goriva po toni prevezenog otpada. Nadalje, promatrano s energetske strane, jednu litru dizela zamjenjuje jednakovrijedna količina biometana u iznosu od jednog normnog metra kubnog [41]. Odnosno 4,3 L dizela, energetski približno odgovara 4,3 Nm³ biometana. Uz podatak o bioplinskom potencijalu biootpada i udjelu metana u bioplínu (poglavlje 5.4), dolazi se do veze između energije uložene u transport tone biootpada i proizvedene energije od te iste tone biootpada. Ako se od jedne tone biootpada proizvede 246 Nm³ biometana, tada vrijedi sljedeća relacija:

$$X_p = \frac{G_{jed}}{BM_{pr}} \quad (3)$$

Gdje je:

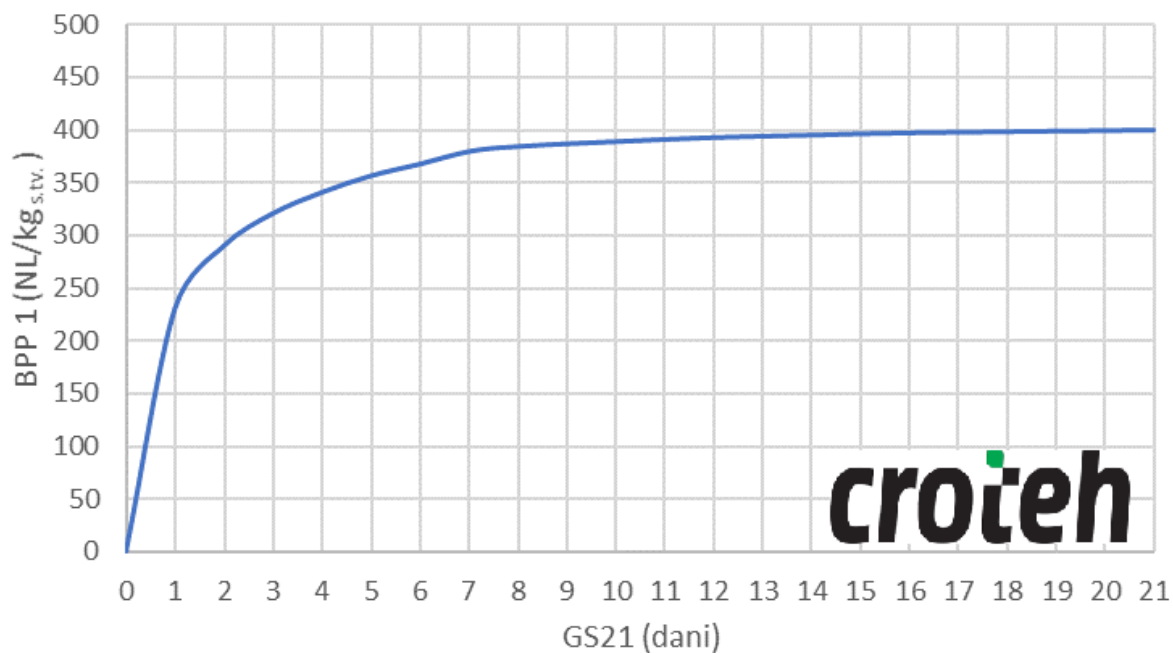
X_p	%	udio utroška energije za transport
G_{jed}	Nm ³	supstituirani utrošak biometana po toni prevezenog otpada
BM_{pr}	Nm ³	proizvedeni biometan iz tone biootpada.

Uvrštavanjem brojeva u izraz dobiva se energetski udio utroška goriva od 1,75% energije proizvedenog biometana. Izračunati udio ukazuje da transport ne predstavlja ugrozu sustava u smislu prevelike konzumacije energije.

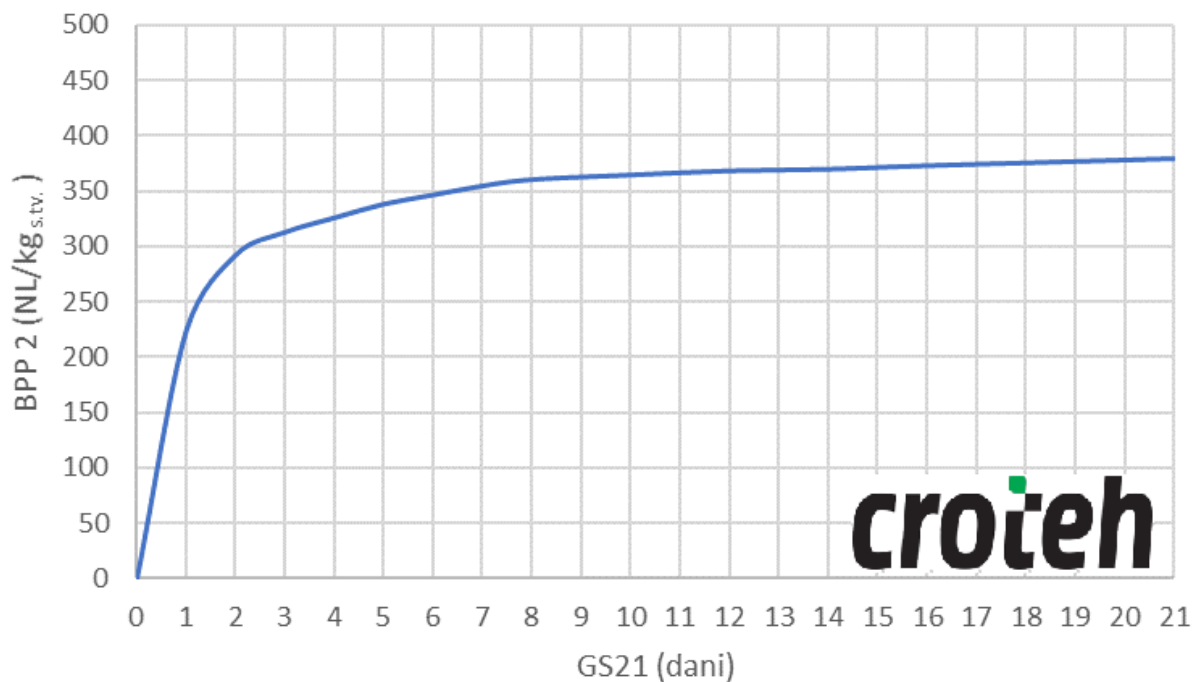
5.4. Laboratorijsko ispitivanje bioplinskog potencijala biootpada

Poznavanje proizvedenih količina otpada koje se mogu upotrijebiti kao sirovina bioplinskog postrojenja nije dovoljan argument za opravdanost izgradnje. Kao što je već navedeno (stranica 17), bioplinski potencijal (BPP) je parametar od ključne važnosti prilikom projektiranja bioplinskog postrojenja. Rezultat ispitivanja daje podatak o volumenu bioplina kojeg će proizvesti određena masa sirovine. Na sljedećim slikama (Slika 41, Slika 42, Slika 43) prikazani su grafovi praćenja bioplinskog potencijala relativno uniformnog biootpada ključnog broja 20 02 01. Dobiveni rezultati pokazuju samo okvirnu vrijednost bioplinskog potencijala. Naime, sama vrijednost bioplinskog potencijala ovisi o brojnim parametrima. Bioplinski potencijal, među ostalim, ovisi o podrijetlu otpada, kemijskim i fizikalnim svojstvima otpada, lokaciji sakupljanja otpada, sastavu otpada te o vanjskim parametrima čiji su kontrola i nadzor izrazito otežani (primjerice, temperatura, vlažnost, atmosferilije, prisutnost eventualnih toksina i kontaminanata itd.). Upravo zbog navedenih razloga bioplinski potencijal fluktuiraju pa je za svrhu projektiranja stoga potrebno njegovo često i redovito praćenje prema točno propisanim

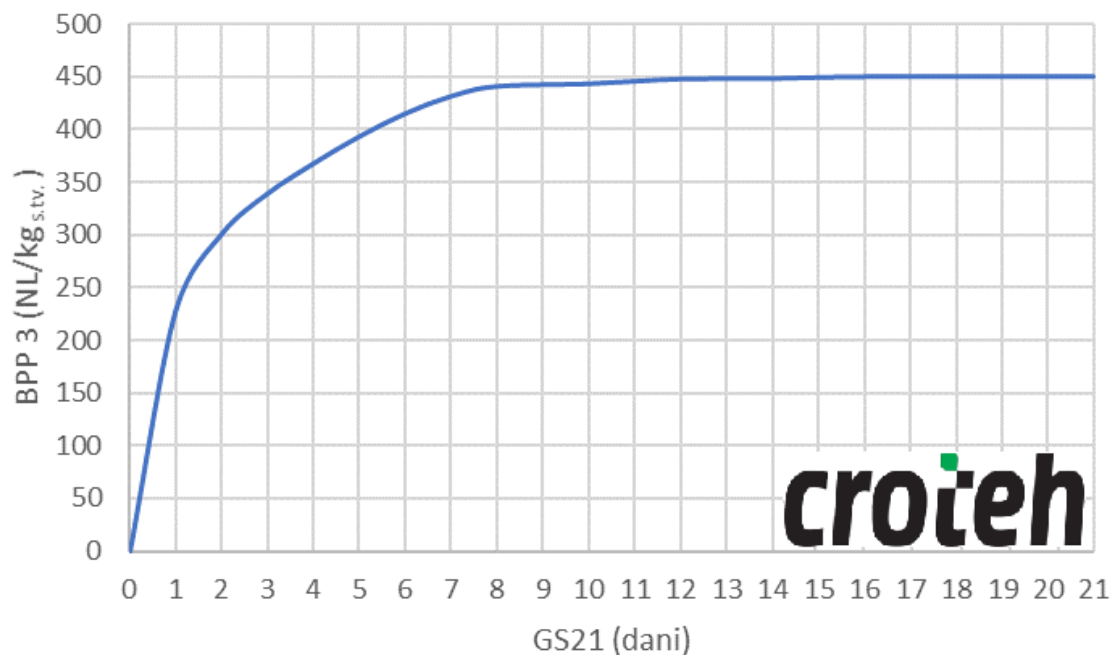
standardima i normama kako bi se za područje koje pokriva bioplinsko postrojenje točno i uspješno odredio bioplinski potencijal, udio suhe tvari otpada te odgovarajući parametri rada bioplinskog postrojenja. Mjerenja su izvršena u privatnom laboratoriju tvrtke Croteh d.o.o. volumetrijskom metodom mjerenja kroz 21 dan. Dobiveni su rezultati bioplinskog potencijala (BPP) odnosno veličine parametra GS_{21} .



Slika 41. Krivulja $BPP1=400\text{NL/kg ST}$



Slika 42. Krivulja $BPP2=380\text{NL/kg ST}$



Slika 43. Krivulja $BPP_3=450\text{NL/kg ST}$

Rezultati mjerenja pojedinih uzoraka variraju, a kao referentna vrijednost za proračun korištena je aritmetička sredina triju mjerenja prema sljedećem izrazu:

$$BPP = \frac{\sum BPP_i}{n_i} \quad (4)$$

Gdje je:

BPP NL/m³ bioplinski potencijal

n_i / broj ispitivanja.

Sukladno rezultatu nakon uvrštavanja izmjerenih vrijednosti u jednadžbu (4), u daljnjem proračunu se koristi vrijednost bioplinskog potencijala od $BPP=410\text{ NL/m}^3$.

Također, izmjerena je masa suhe tvari preostalog digestata iz procesa. Stavljanjem u omjer s masom suhe tvari sirovine, dobiva se podatak o biorazgradivosti, odnosno o udjelu organske tvari razgrađene u procesu AD. Mjerenje je pokazalo podatak o biorazgradivosti od 49%.

5.5. Proračun idejnog rješenja bioplinskog postrojenja na području Istre

Sukladno [14], na području Istarske županije godišnje se proizvede preko 50.000 tona biorazgradivog komunalnog otpada te oko 3.000 tona odvojeno prikupljenog biootpada, a

pretpostavlja se da je u stvarnosti riječ i o većim količinama. Za proračun su u obzir uzeta dva slučaja kapaciteta postrojenja prilagođena odabranom području:

- 50.000 tona godišnje (P2) biorazgradivog komunalnog KO
- 15.000 tona godišnje (P1) biootpada s područja Istarske (3.000 t) i Primorsko – goranske županije (9.000 t).

Glavne vrijednosti proračuna su dobivene pomoću programskog alata Excel, korištenjem slijedećih jednadžbi:

Dnevni kapacitet postrojenja:

$$Q_{m, \text{sirovina}} = \frac{K}{n_d} \quad (5)$$

Gdje je:

$Q_{m, \text{sirovina}}$ t/d dnevni kapacitet postrojenja – maseni protok sirovine

K t godišnji kapacitet postrojenja

n_d / broj dana u pogonu godišnje.

*trajanje prekida rada zbog potencijalnih kvarova i održavanja je pretpostavljeno na 35 dana godišnje

Potrebna količina vode za postizanje mokre AD (<8% suhe tvari):

Glavni faktor za određivanje količine potrebne vode jest sadržaj suhe tvari (TS) u sirovini, a količina dodane vode mora biti adekvatna za postizanje uvjeta mokre digestije ($\leq 8\% ST$):

*uz pojednostavljenje za vodu: 1L vode = 1 kg

$$ST_{x, \text{digestat}} = \frac{m_{ST}}{m_{\text{digestat}}} = \frac{m_{ST}}{m_{\text{sirovina}} + m_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (6)$$

Gdje je:

$ST_{x, \text{digestat}}$ % udio suhe tvari u smjesi digestata

m_{ST} kg masa suhe tvari

m_{digestat} kg masa smjese digestata

m_{sirovina} kg masa sirovine u smjesi digestata

$m_{\text{H}_2\text{O}}$ kg masa vode u smjesi digestata.

Ukupan ulazni protok u digestor:

$$Q_{m,\text{digestat}} = Q_{m,\text{sirovina}} + Q_{m,\text{H}_2\text{O}} \quad (7)$$

Gdje je:

$Q_{m,\text{ digestat}}$ t/d ukupan dnevni maseni protok u digestor

$Q_{m,\text{ sirovina}}$ t/d dnevni maseni protok sirovine

$Q_{m,\text{ H}_2\text{O}}$ t/d dnevni maseni protok vode.

Volumen (korisni, efektivni) digestora:

Glavni faktor za dimenzioniranje digestora, nakon ustanovljenog kapaciteta postrojenja s obzirom na dostupnost sirovine, je vrijeme zadržavanja radne tvari u procesu (HRT). Projektirana vrijednost HRT-a u ovom radu iznosi 35 dana, a digestor dostatnog volumena se računa prema slijedećoj jednadžbi:

$$V_{\text{D,uk}} = HRT \times Q_{m,\text{digestat}} \quad (8)$$

Gdje je:

$V_{\text{D,uk}}$ m³ ukupni efektivni volumen digestora

HRT d vrijeme hidraulične retencije

$Q_{m,\text{ digestat}}$ t/d ukupan dnevni maseni protok u digestor.

Digestor potrebne zapremine bio bi prevelik za kvalitetno miješanje smjese, a efikasnost prijenosa topline bila bi mala. Stoga je primijenjeno rješenje s više jednakih digestora čiji promjer i visina moraju udovoljavati fizičkim i tehničkim gabaritima miješalica. Broj digestora se računa na slijedeći način:

$$V_{\text{D1}} = \frac{V_{\text{D,uk}}}{n_{\text{D}}} \quad (9)$$

Gdje je:

V_{D1} m³ efektivni volumen jednog digestora

$V_{\text{D,uk}}$ m³ ukupni efektivni volumen digestora

n_D m^3 broj digestora.

Promjer digestora:

$$d_D = \sqrt{\frac{4 \times V_{D1}}{h_D \times \pi}} \quad (10)$$

Gdje je:

d_D m promjer digestora
 V_{D1} m^3 efektivni volumen jednog digestora
 h_D m visina digestora.

Raspored smjese unutar više digestora također pruža mogućnost testiranja rada s različitim ulaznim sirovinama; primjerice većina digestora može biti napunjena biootpadom iz KO dok se u jednom testira otpad iz pekarske industrije. U slučaju manje opterećenosti postrojenja tijekom zimskih mjesec (izvan turističke sezone), jedan od digestora se može jednostavno isključiti, čime se postižu uštede operativnih troškova. Zaključeno je kako brojne prednosti više-digestornog sustava nadjačavaju povećani trošak investicije.

Stopa organskog opterećenja digestora:

Stopa organskog opterećenja digestora predstavlja vrijednost potrebe za svježom organskom tvari koja se dodaje u proces u određenom vremenu. Zahtijevani dotok ovisi o sastavu sirovine, odnosno o sadržaju hlapljive suhe stvari (VS). VS je jedini konstituent u suhoj tvari (TS) koji pridonosi generiranju bioplina svojim raspadom te je iz tog razloga uzet kao glavni parametar za izračunavanje stope punjenja reaktora. Najprije je potrebno prikazati koliko se nove suhe stvari dnevno uvodi u proces prema slijedećoj jednadžbi:

$$Q_{m,TS} = ST_{x,sirovina} \times Q_{m,sirovina} \quad (11)$$

Gdje je:

$Q_{m,TS}$ t/d dnevni maseni protok suhe stvari
 $ST_{x,sirovina}$ % udio suhe stvari u sirovini
 $Q_{m, sirovina}$ t/d dnevni maseni protok sirovine.

Potom se izražava dnevna količina nove hlapljive suhe tvari koja se uvodi u digestor:

$$Q_{m,VS} = VS_{x,sirovina} \times Q_{m,TS} \quad (12)$$

Gdje je:

$Q_{m,VS}$	t/d	dnevni maseni protok hlapljive suhe tvari
$VS_{x,sirovina}$	%	udio hlapljive suhe tvari u ukupnoj suhoj tvari sirovine
$Q_{m,TS}$	t/d	dnevni maseni protok suhe tvari.

Procesu dodana voda ne utječe izravno na prinos bioplina jer u sebi nema hlapljivih suhih tvari (VS); razlog dodavanja je isključivo radi postizanja boljih uvjeta miješanja pa tako neposredno utječe na bolji prinos bioplina. Reciklirana voda iz dekantera u sebi sadrži oko 0,4% suhe tvari, što se smatra zanemarivim prilikom izrade idejnog rješenja. Dodavanjem vode dobiva se razrijeđena smjesa značajnog volumena koji je potrebno dnevno upumpati u reaktor.

Prinos bioplina se najpreciznije dovodi u vezu s unesenom količinom hlapljive organske tvari (VS) na temelju kojeg se računa stopa hranjenja digestora odnosno stopa organskog opterećenja digestora:

$$OLR = \frac{Q_{m,VS}}{V_{D,uk}} \times 1000 \quad (13)$$

Gdje je:

OLR	kgvs/m ³ _{digestat} x dan	stopa organskog opterećenja digestora
$Q_{m,VS}$	t/d	dnevni maseni protok hlapljive suhe tvari
$V_{D,uk}$	m ³	ukupni efektivni volumen digestora.

*uzeto je pojednostavljenje za digestat: 1000 kg ≈ 1 m³

Volumen pred-digestora:

Volumen pred-digestora mora omogućiti dvodnevno punjenje reaktora iz čega proizlazi slijedeća jednadžba:

$$V_{PD} = n_{do} \times Q_{m,digestat} \quad (14)$$

Gdje je:

V_{PD}	m ³	efektivni volumen pred-digestora
n_{do}	d	broj dana opskrbe digestora iz pred-digestora

$V_{D,uk}$ m³ ukupni efektivni volumen digestora.

Volumen post-digestora:

Volumen post-digestora je teoretski jednak volumenu pred-digestora, no on će biti veći zbog potrebe velikog promjera spremnika bioplina koji se nalazi na njegovom vrhu te zbog duljeg vremena zadržavanja digestata nego u slučaju pred-digestora.

Prinos bioplina:

Sukladno rezultatima laboratorijskog ispitivanja bioplinskog potencijala izvršenog u privatnom laboratoriju tvrtke Croteh d.o.o., dobiven je srednji rezultat od triju uzoraka: $BPP=410$ NL/kg s.t. = $0,41$ Nm³/kg s.t. iz čega slijedi izraz za volumni protok proizvedenog bioplina:

$$Q_{v,bioplin} = BPP \times Q_{m,TS} \times 1000 \quad (15)$$

Gdje je:

$Q_{v,bioplin}$ Nm³/d dnevni volumni protok bioplina
 BPP Nm³/kg s.t. bioplinski potencijal
 $Q_{m,TS}$ t/d dnevni maseni protok suhe tvari.

Stopa prinosa bioplina (GPR) je dopunska vrijednost koja stavlja u odnos proizvedeni bioplin i volumen digestora prema slijedećem izrazu:

$$GPR = \frac{Q_{v,bioplin}}{V_{D,uk}} \quad (16)$$

Gdje je:

GPR Nm³/m³_{digestor} stopa prinosa bioplina
 BPP Nm³/kg s.t. bioplinski potencijal
 $V_{D,uk}$ m³ ukupni efektivni volumen digestora.

Također, radi bolje vizualizacije, dodatno se može odrediti prinos bioplina po masi hlapljive suhe tvari. Izraz je poznatiji pod nazivom specifična proizvodnja bioplina, a do njega se dolazi na sljedeći način:

$$SGP = \frac{GPR}{OLR} \quad (17)$$

Gdje je:

SGP	$\text{Nm}^3/\text{kg vs}$	specifična proizvodnja bioplina
GPR	$\text{Nm}^3/\text{kg vs}$	stopa prinosa bioplina
OLR	$\text{kgvs}/\text{m}^3_{\text{digestat}} \times \text{dan}$	stopa organskog opterećenja digestora.

Dobivene vrijednosti se mogu provjeriti putem naredne jednadžbe:

$$Q_{v,\text{bioplin}} = OLR \times SGP \times V_{D,\text{uk}} \quad (18)$$

Energetski sadržaj bioplina:

Cijena energenata određuje se na temelju njihove energetske vrijednosti. Ona se za bioplin može prikazati relacijom: 1 Nm^3 bioplina $\approx 6 \text{ kWh} = E_{\text{jed}}$; odnosno: $1 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \approx 10 \text{ kWh} = 36 \text{ MJ}$ za udio metana u bioplinu od 60% [26]. Proizvedena energija se dobiva iz izraza:

$$E_{\text{bioplin}} = E_{\text{jed}} \times V_{\text{bioplin}} \quad (19)$$

Gdje je:

E_{bioplin}	kWh/Nm^3	energija bioplina
E_{jed}	kWh	jedinična energija bioplina
V_{bioplin}	Nm^3	ukupni efektivni volumen digestora.

Proizvedena snaga:

Izlazna snaga bioplinskog postrojenja je izraz koji govori o njegovoj veličini i efikasnosti, a na temelju kojeg se može uspoređivati s drugim postrojenjima koja proizvode energente. Također, podatak o snazi daje pučanstvu jasnu komparativnu sliku postrojenja koje im se nalazi u okolici pošto se podatke o snazi može naći na gotovo svim proizvodima koji daju rad na svojem izlazu.

$$P = \frac{E}{t} \quad (20)$$

Gdje je:

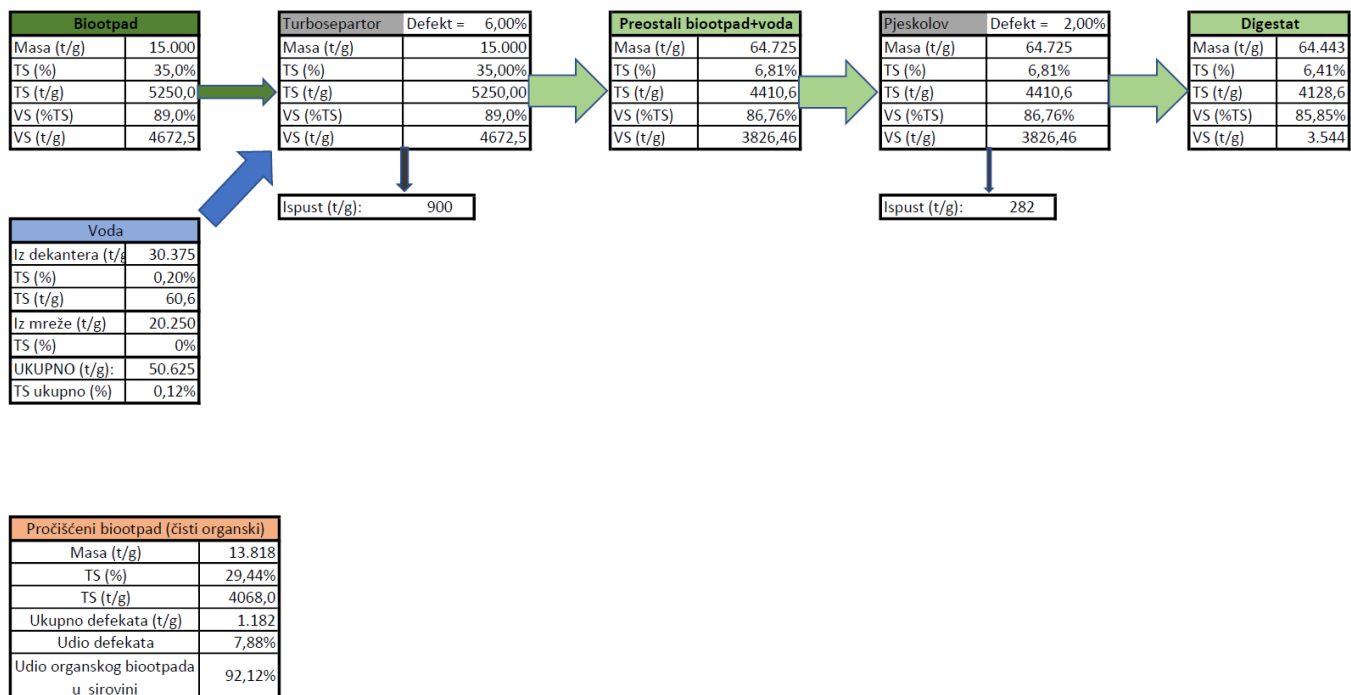
P	kW	snaga
-----	-------------	-------

E	kWh	energija
t	h	vrijeme.

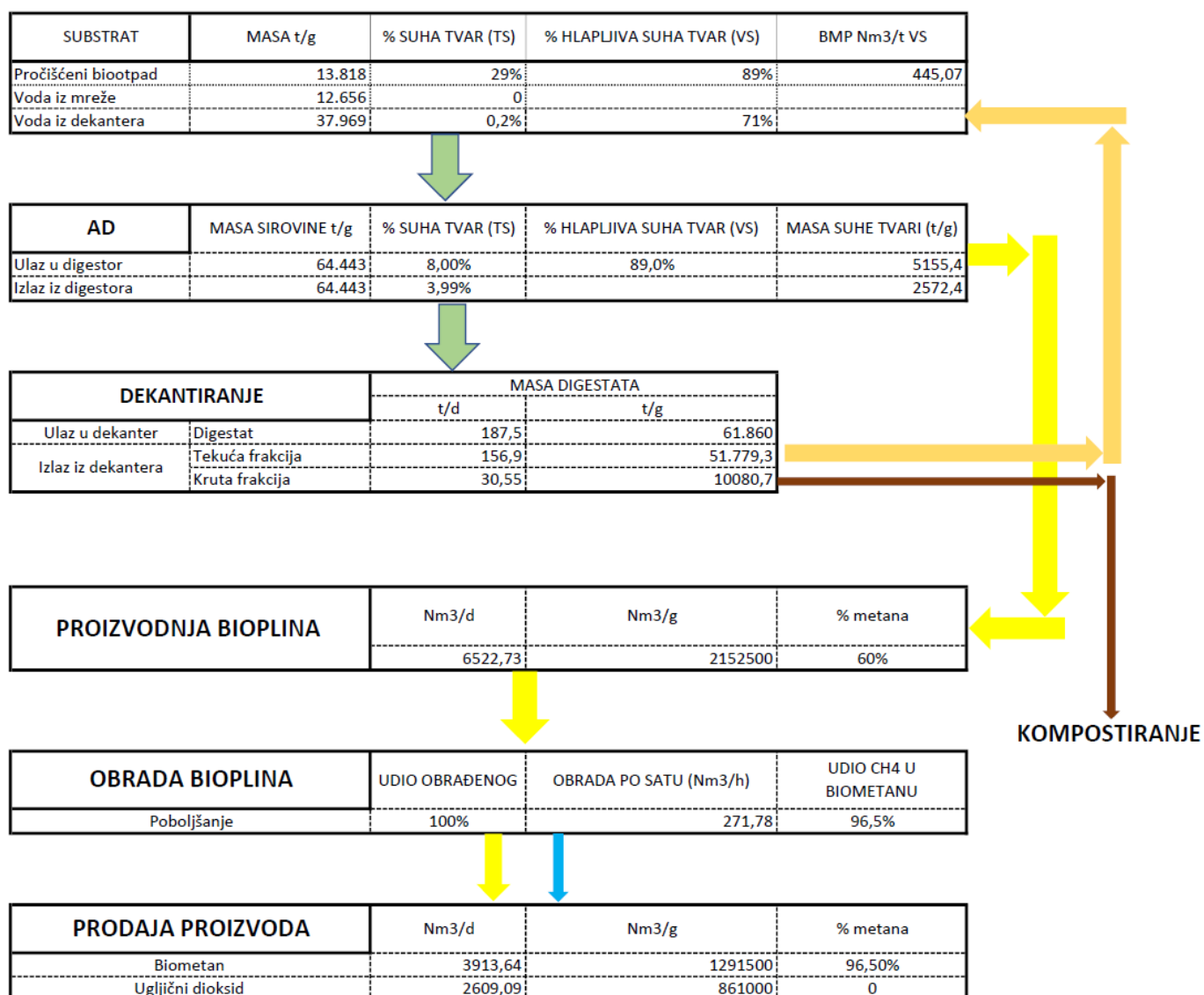
5.5.1. Postrojenje kapaciteta 15.000 t/god biootpada (P1)

Tablica 11. P1 - Ulazne vrijednosti

VARIJABLE	VRIJEDNOST
Godišnji kapacitet, t/g	15.000
Udio suhe tvari (TS)	35%
Udio hlapljive suhe tvari u TS (VS)	89%
Vrijeme hidraulične retencije u digestoru (HRT), dan	35
Bioplinski potencijal (BPP), Nm ³ /t	410
Udio metana u bioplina	60%
Udio metana u biometanu	96,5%
Maksimalan udio suhe tvari smjese u digestoru	8,0%
Udio defekta na turboseparatoru	6%
Udio defekta na pjeskolovu	2%
Udio reciklirane vode iz dekantera u ukupno potrebnoj za AD	60%
Udio suhe tvari u vodi iz mreže	0,0%
Energetska vrijednost biometana, kWh/Nm ³	10
Vrijeme pogona, dan/g	330
Vrijeme pogona, h/dan	24
Vremenski kapacitet opskrbe pred-digestora, dan	2
Radno vrijeme radnika na predobradi, h/d	8
Broj radnika na predobradi	1
Broj radnika - ostalo	2
Promjer digestora, m	22
Visina reaktora, m	10
Faktor predimenzioniranja spremnika	1,2
Gustoća biootpada, kg/m ³	300
Gustoća bioplina, kg/m ³	1,2
Udio suhe tvari dekantiranog digestata	80%
Biorazgradivost	49%



Slika 44. P1 – dijagram tijeka predobrade sirovine



Slika 45. P1 – masena bilanca procesa AD

Tablica 12. P1 – procesne vrijednosti

PROCESNE VRIJEDNOSTI	
Dnevni kapacitet postrojenja, t/d:	45,5
Dnevni zahtjev za vodu, t/d:	153,4
Ukupan dnevni ulazni protok u digestor, m3/d:	195,3
Ukupan dnevni ulazni protok u digestor, m3/h:	8,1
Dnevni protok suhe tvari - TS, t/d:	12,5
Dnevni protok hlapljive suhe tvari - VS, t/d:	10,7
Stopa hranjenja reaktora - OLR, kg VS/m ³ digestora:	1,6

Tablica 13. P1 – izlazne vrijednosti postrojenja

IZLAZNE VRIJEDNOSTI			
Prinos bioplina	Nm ³ /h	Nm ³ /d	Nm ³ /g
	271,78	6.522,73	2.152.500
Prinos biometana	Nm ³ /h	Nm ³ /d	Nm ³ /g
	163,07	3.913,64	1.291.500
Energija	kWh/d	kWh/g	MWh/g
	3.9136,36	12.915.000	12,92
Snaga	kW/d	kW/g	MW/g
	1.630,68	538.125	0,538

Tablica 14. P1 – dimenzioniranje glavnih elemenata postrojenja

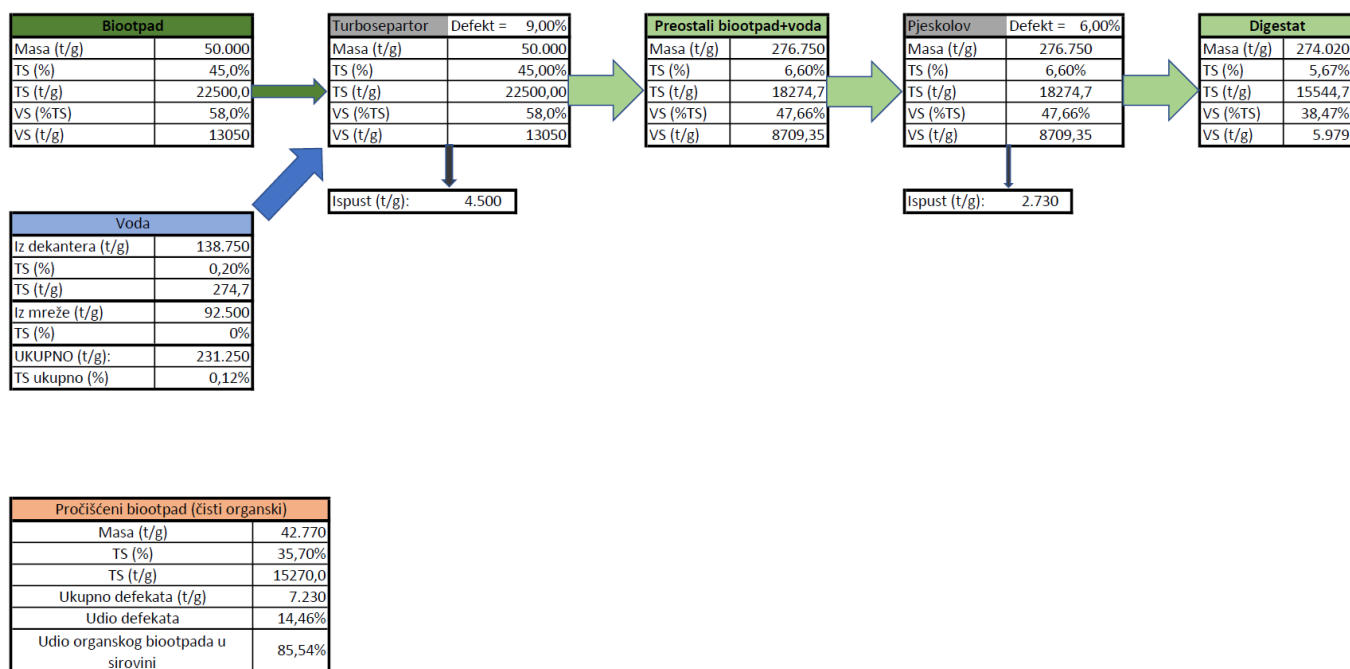
DIMENZIJE POSTROJENJA					
	REAKTORI			SPREMNIK PLINA	SKLADIŠTE SIROVINE
	Pred.	Primarni	Post.		
Oblik	cilindrični	cilindrični	cilindrični	2/5 kugle	kvadar 18X12Xh
Količina, kom	1	2	1	1	
Promjer, m	8	22	20	20	
Visina, m	9	10	5		1,68
Neto volumen, m ³	390,56	6834,86	585,85	1674,67	303,0
Bruto volumen, m ³	468,68	8201,84	703,01	1674,67	363,6
HRT, d	0,6	35	3	0,26	
OLR	27,50	1,6			

5.5.2. Postrojenje kapaciteta 50.000 t/god biorazgradivog KO (P2)

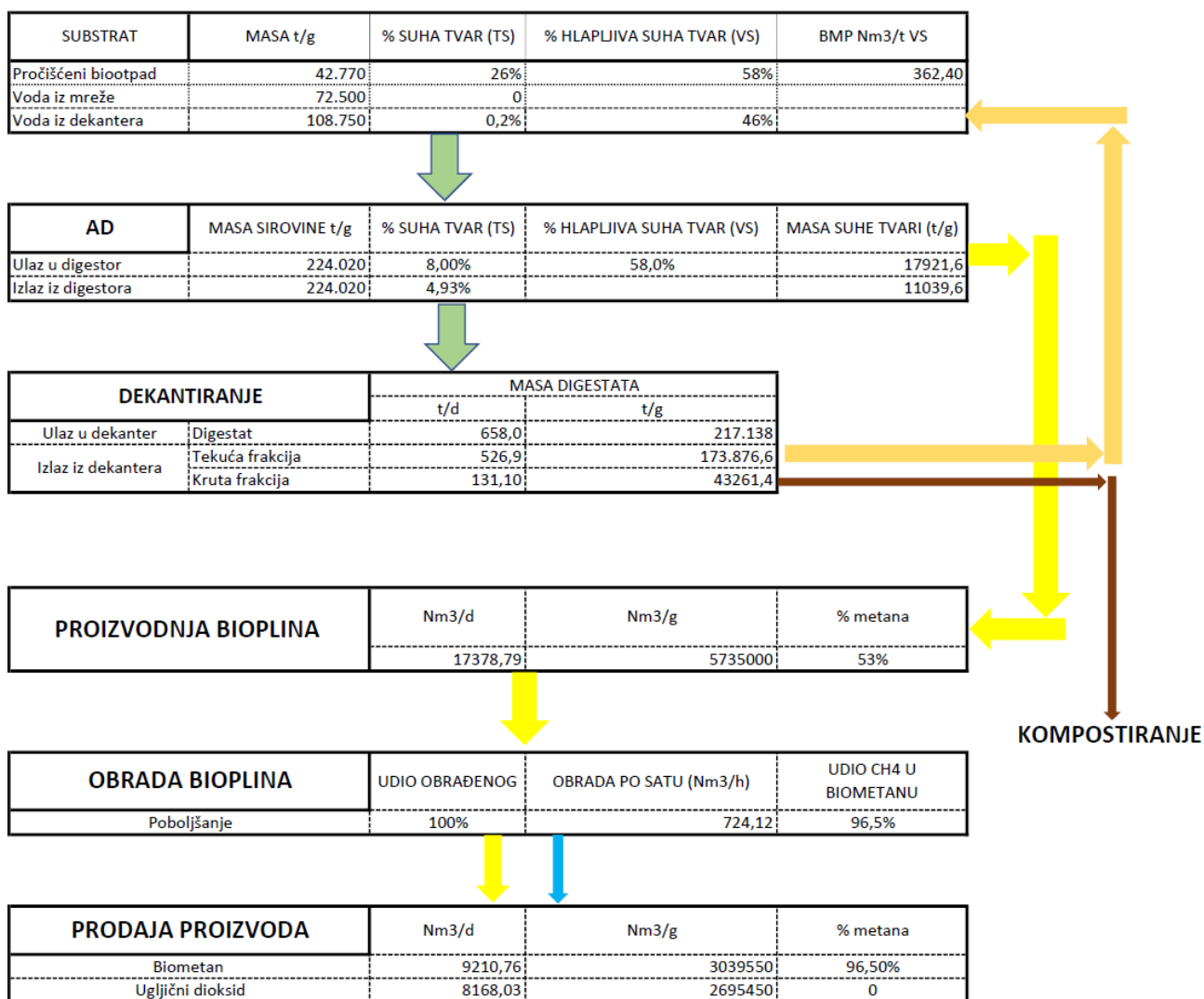
Tablica 15. P2 - Ulazne vrijednosti

VARIJABLE	VRIJEDNOST
Godišnji kapacitet, t/g	50.000
Udio suhe tvari (TS)	45%
Udio hlapljive suhe tvari u TS (VS)	58%
Vrijeme hidraulične retencije u digestoru (HRT), dan	35
Bioplinski potencijal (BPP), Nm ³ /t	410
Udio metana u bioplenu	60%
Udio metana u biometanu	96,5%

Maksimalan udio suhe tvari smjese u digestoru	8,0%
Udio defekta na turboseparatoru	9%
Udio defekta na pjeskolovu	6%
Udio reciklirane vode iz dekantera u ukupno potrebnoj za AD	60%
Udio suhe tvari u vodi iz mreže	0,0%
Energetska vrijednost biometana, kWh/Nm ³	10
Vrijeme pogona, dan/g	330
Vrijeme pogona, h/dan	24
Vremenski kapacitet opskrbe pred-digestora, dan	2
Radno vrijeme radnika na predobradi, h/d	8
Broj radnika na predobradi	1
Broj radnika - ostalo	3
Promjer digestora, m	22
Visina digestora, m	12
Faktor predimenzioniranja spremnika	1,2
Gustoća biootpada, kg/m ³	200
Gustoća bioplina, kg/m ³	1,2
Udio suhe tvari dekantiranog digestata	80%
Biorazgradivost	45%



Slika 46. P2 – dijagram tijeka predobrade sirovine



Slika 47. P2 – masena bilanca procesa AD

Tablica 16. P2 – procesne vrijednosti

PROCESNE VRIJEDNOSTI	
Dnevni kapacitet postrojenja, t/d:	151,5
Dnevni zahtjev za vodu, t/d:	700,8
Ukupan dnevni ulazni protok u digestor, m3/d:	830,4
Ukupan dnevni ulazni protok u digestor, m3/h:	34,6
Dnevni protok suhe tvari - TS, t/d:	47,1
Dnevni protok hlapljive suhe tvari - VS, t/d:	18,1
Stopa hranjenja digestora - OLR, kg VS/m ³ reaktora:	0,62

Tablica 17. P2 – izlazne vrijednosti postrojenja

IZLAZNE VRIJEDNOSTI			
Prinos bioplina	Nm ³ /h	Nm ³ /d	Nm ³ /g
	724,12	17378,79	5735000
Prinos biometana	Nm ³ /h	Nm ³ /d	Nm ³ /g
	434,47	10427,27	3441000
Energija	kWh/d	kWh/g	MWh/g
	104272,73	34410000	34,41
Snaga	kW/d	kW/g	MW/g
	4344,70	1433750	1,434

Tablica 18. P1 – dimenzioniranje glavnih elemenata postrojenja

DIMENZIJE POSTROJENJA					
	DIGESTORI			SPREMNIK PLINA	SKLADIŠTE SIROVINE
	Pred.	Primarni	Post.		
Oblik	cilindrični	cilindrični	cilindrični	2/5 kugle	kvadar 18X12Xh
Količina, kom	1	6	1	1	
Promjer, m	12	22	20	20	
Visina, m	10	12	12		8,42
Neto volumen, m ³	1357,70	23759,70	2036,55	1674,67	1515,2
Bruto volumen, m ³	1629,24	28511,64	2443,85	1674,67	1818,2
HRT, d	0,6	35	3	0,10	
OLR	8,16	0,62			

5.6. Usporedba proračunskih slučajeva i odabir

Usprkos tome što se primjenom drugog slučaja (P2) rješava problem tri puta veće količine otpada nego u prvom, odabran je slučaj bioplinskog postrojenja kapaciteta 15.000 tona biootpada godišnje (P1). Osobna pretpostavka je da se u Istarskoj županiji proizvodi znatno više nego li evidentiranih 3.000 tona biootpada godišnje. Glavni razlog odabira leži u činjenici kako je biootpad gotovo pa čista sirovina za bioplinsko postrojenje (sadrži manje od 10% defekata), za razliku od biorazgradive frakcije miješanog KO. Drugim riječima, odvojeno sakupljeni biootpad (20 02 01) je pogodniji za slanje u digestor te ima znatno viši izmjereni bioplinski potencijal odnosno veći je relativni prinos bioplina po toni otpada. Također, odabrano područje nema niti jedno postojeće bioplinsko postrojenje stoga je pametnije krenuti

s uporabom otpada sa zagarantirano većim bioplinskim potencijalom, a u budućnosti, kada sav biootpad bude iskorišten, krenuti u razmatranje biorazgradive frakcije KO kao ulazne sirovine. Drugi slučaj bi predstavljao znatno veću početnu investiciju koja uključuje duži proces predobrade s većim udjelom inertnog materijala.

Troškovi opreme rastu proporcionalno s porastom kapaciteta istog, no treba napomenuti da veća postrojenja, uz povećane investicijske troškove, donose brži povrat investicije.

Tablica 19. Usporedba glavnih proračunskih elemenata za promatrane slučajeve

PARAMETRI	1.SLUČAJ (P1)	2.SLUČAJ (P2)
KAPACITET	15 000 t/god	50 000 t/god
POSTROJENJA	(45 t/dan)	(150 t/dan)
SUHA TVAR / %	35	37
BPP / Nm ³ kg ⁻¹ s.t.	0,41	0,31
PRINOS BIOMETANA / Nm ³ god ⁻¹	1.291.500	3.039.550
PROIZVEDENA SNAGA / MW	0,54	1,26
BROJ DIGESTORA	2	6

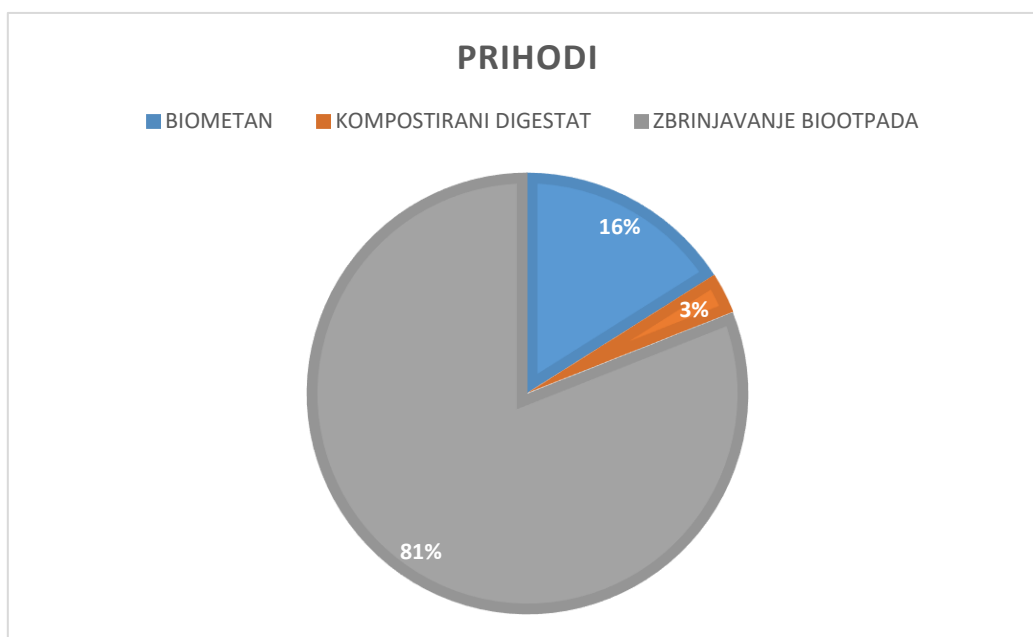
Na temelju poznatih protoka sirovine i vremena zadržavanja u procesu dimenzionirani su osnovni elementi postrojenja odnosno digestor, pred-digestor, post-digestor i skladišta sirovine. Rasporednom elemenata prikazanom na nacrtu BP-0001 postrojenje zahtjeva zemljište gabarita 65m x 70 m, odnosno površine od 4.550 kvadratnih metara.

5.7. Financijska analiza odabranog slučaja (P1)

Nedvojbeno je kako bioplinsko postrojenje pozitivno utječe na mnoga pitanja zaštite okoliša i odgovornog odnosa prema resursima, no tako velika investicijska ulaganja ipak moraju ekonomski opravdati svoju izgradnju. Iz tog razloga razrađena je financijska analiza bilancom koja obuhvaća investicijske i operativne troškove na rashodovnoj strani i prihode na drugoj strani. Pomoću dobivene razlike u novčanim sredstvima, dolazi se do podatka o vremenu povrata investicije. U nastavku su prikazana dva slučaja financijske analize; prvi u obzir uzima samo “opipljiva“ financijska sredstva odnosno čist tijek novca, dok drugi slučaj uključuje i fiktivni prihod općeg dobra u vidu eksternalija.

5.7.1. Financijska analiza odabranog slučaja (P1) bez eksternalija

Čisti financijski tokovi prikazani su sljedećim tablicama (Tablica 20, Tablica 21). Iz grafikona (Slika 48) vidljivo je kako biometan doprinosi s tek 16% u ukupnim prihodima bioplinskog postrojenja. Većinu od čak 81% predstavlja naknada za zbrinjavanje otpada. Ta činjenica bi trebala veseliti svakog današnjeg investitora jer sirovine u opticaju ima „na bacanje“; štoviše, plaća se njeno zbrinjavanje.



Slika 48. P1 – Udjeli u prihodu

Početna investicija podijeljena s godišnjom dobiti (zaradom) postrojenja daje podatak o broju godina do isplativosti investicije, odnosno do postizanja kumulativne dobiti. Bioplinsko postrojenje kapaciteta 15.000 t/g (slučaj P1) svoju bi investiciju otplatilo za 11 godina, kako je prikazuje Tablica 21. Prikazana dobit je postignuta plasiranjem na tržište biometana po cijeni od 0,2 €/Nm³ te kompostiranog digestata po cijeni od 5 €/t, uz naknadu za zbrinjavanje biootpada u visini od 85 €/t.

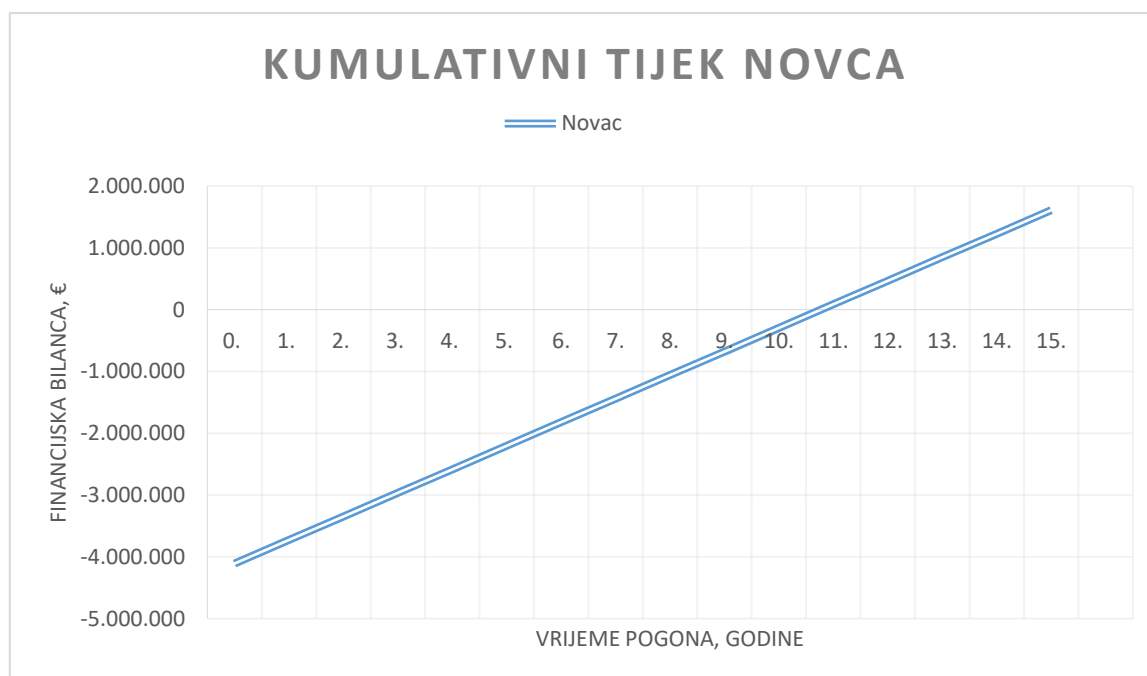
Tablica 20. P1 – investicijski troškovi [29]

INVESTICIJSKI TROŠKOVI (€)	
Zemljište (35€/m ²)	159.250,00 €
Izrada ponude (idejno rješenje)	2.000,00 €
Ispitivanje potencijala sirovine (BPP)	1.500,00 €
Izrada projektne dokumentacije	24.000,00 €
Ventilacijski sustav s biofilterom	200.000,00 €
Niskopodni građevinski radovi	410.000,00 €
Građevinski radovi - izgradnja	650.000,00 €

	Nadzor radova i montaža	45.000,00 €
	Hala za predobradu	200.000,00 €
	Bager - utovarivač	115.000,00 €
	Hala za kompostiranje (uređenje postojeće)	25.000,00 €
	Priključak struje (800kW)	80.000,00 €
PREDOBRADA	Trgač vrećica	310.000,00 €
	Usipni koš + pužni transporter	
	Turboseparator	
	Pjeskolov	30.000,00 €
	Potopna miješalica (2 kom)	14.000,00 €
PRED-DIGESTOR	Centrifugalna pumpa (3kom)	12.000,00 €
	Potopna miješalica (2 kom)	14.000,00 €
	Centrifugalna pumpa za cirkulaciju (2kom)	8.000,00 €
	Lobi pumpa	12.000,00 €
DIGESTOR	Vertikalna miješalica (2 kom)	55.000,00 €
	Potopna miješalica (2 kom)	14.000,00 €
	Lobi pumpa cirkulacije	5.000,00 €
	Vijčano ekscentrična pumpa za pražnjenje	8.000,00 €
	Osvjetljeno kontrolno okno	2.500,00 €
POST-DIGESTOR	Sustav izmjenjivača topline	50.000,00 €
	Pumpa bioplina - puhalo	4.700,00 €
	Nagibna miješalica (2kom)	22.000,00 €
	Sigurnosni ventil	2.850,00 €
	Spremnik bioplina	45.000,00 €
	Vijčano ekscentrična pumpa za pražnjenje	8.000,00 €
	Osvjetljeno kontrolno okno	2.500,00 €
	Sušenje bioplina	43.600,00 €
	Sustav pročišćavanja bioplina, desulfator	18.100,00 €
	Baklja	26.900,00 €
	Sustav poboljšavanja bioplina	840.000,00 €
Sustav dekantiranja	52.900,00 €	
Kompresor bioplina	25.000,00 €	
Linijski analizator bioplina	30.000,00 €	
Cjevarija, ventili i sl.	120.000,00 €	
Instrumenti	50.000,00 €	
	Elektropostrojenje (hardware, software, HMI, uređaji za komunikaciju i praćenje..)	250.000,00 €
	Vaga + priemna kabina	70.000,00 €
	Informatička oprema, server	50.000,00 €
	UKUPNO:	4.107.800,00 €

Tablica 21. P1 – Financijska bilanca [29]

OPERATIVNI TROŠKOVI (godišnje)	€	PRIHODI (godišnje)	€
Radna snaga	100.800 €	Biometan	258.300 €
Električna energija	118.800 €	Kompostirani digestat	50.404 €
Gorivo	57.024 €		
Laboratorijska mjerenja	30.000 €	Zbrinjavanje biootpada	1.275.000 €
Održavanje + rezervni dijelovi	70.000 €		
Voda iz mreže	25.313 €	UKUPNO:	1.583.704 €
Granule aktivnog ugljena	20.000 €		
Trošak pročišćavanja otpadnih voda	569.531 €	UKUPNA INVESTICIJA:	4.107.800 €
Osiguranje	50.000 €		
Najam vanjske hale za kompostiranje	12.000 €		
Zbrinjavanje plastike za SRF	99.000 €	FINANCIJSKA BILANCA	
Kemikalije (desulfator, soda, dekanter..)	50.000 €	Godišnja zarada	381.236 €
UKUPNO:	1.202.468 €	Povrat investicije, god	10,77



Slika 49. P1 – kumulativni tijek novca

5.7.2. *Financijska analiza odabranog slučaja (P1) s uračunatim eksternalijma*

Potpunost financijske analize velikih investicija postiže se sagledavanjem šire slike od bilancom uključenog fizičkog tijeka sredstava, odnosno novca. Eksternalije omogućuju uzimanje u obzir pozitivnih ili negativnih učinaka koji za sada nisu uključeni u bilancu, ali imaju izgleda to vrlo brzo biti, posebno u pogledu ambicioznih planova smanjenje emisija stakleničkih plinova. U slučaju ovog rada, efekti su pozitivne naravi, a očituju se u obliku ušteda u emisijama CO₂ do kojih dolazi jer proizvedena obnovljiva energija može supstituirati fosilno opterećeno korištenje energenata. Njihov učinak je najlakše predočiti novčanom vrijednošću, a ona se u EU kreće oko 72 €/t emitiranog CO₂ [42].

Zarada od eksternalija može se računati na više načina; Tablica 22 prikazuje rezultate ušteda CO₂ na temelju usporedbe sa:

- emisijama CO₂ dobivenim pomoću prosječnog nacionalnog koeficijenta [43] za računanje emisija po jedinici proizvedene električne energije (kWh) vrijednosti koja odgovara potencijalnoj energiji proizvedenog biometana (E1)
- emisijama CO₂ koji bi nastao prilikom izgaranja dizel goriva koje oslobađa jednaku energetska vrijednost (TJ) kao proizvedeni biometan (E2)

U navedenim slučajevima, neizbježan nusprodukt dobivanja željenog oblika energije je CO₂. Kad bi se ista ta energije dobila iz biometana, također nastaje određena količina CO₂ njegovim izgaranjem, no ona je neutralna jer se ne radi o fosilnom, nego o biogenom ugljiku.

Tablica 22. P1 - Uštede emisija CO₂

IZVOR EMISIJE CO ₂ U POSTROJENJU	IZNOS	KONVERZIJSKI FAKTOR	MJERNA JEDINICA	EMISIJA CO ₂ , t/g
Električna ene. kWh/g	1980000	0,146	kg CO ₂ /kWh	289,1
Dizel, L/g	47520	2,69	kg CO ₂ /L	127,8
CO ₂ iz bioplina, Nm ³ /g	861000	0	kg	0,0
			UKUPNO:	416,9
Proizvedena energija	kWh/g	TJ/g		
	12915000	46,5		
Energent	diesel, t CO ₂ /TJ	električna energija, kg CO ₂ /kWh		
CO ₂ emisijski faktor	74,1	0,207		

UŠTEDA CO₂, t CO ₂ /g	E1 ušteda (el.ene.)	bruto	2673,4	
		neto	2256,5	
	E2 ušteda (dizel)	bruto	3445,2	
		neto	3028,3	

Treba naglasiti kako bioplinsko postrojenje za izvođenje potrebnih operativnih zahvata i procesa zahtijeva dostupnost spomenutih energenata; električne energije i dizel goriva. Od izračunatih eksternalija u vidu ušteda CO₂ potrebno je oduzeti one nastale korištenjem istih kako prikazuje Tablica 22.

Tablica 23. P1 - Usporedba financijskih analiza

		Bez eksternalija	E1	E2
PRIHOD	Biometan	258.300 €	258.300 €	258.300 €
	Kompostirani digestat	50.404 €	50.404 €	50.404 €
	Zbrinjavanje biootpada	1.275.000 €	1.275.000 €	1.275.000 €
	CO ₂ eksternalije	/	162.468 €	218.037 €
RASHOD	Ukupni godišnji operativni troškovi	1.202.406 €	1.202.406 €	1.202.406 €
INVESTICIJA	Ukupni investicijski troškovi	4.107.800 €	4.107.800 €	4.107.800 €
ZARADA	Godišnja dobit	381.236 €	543.765 €	599.335 €
POVRAT INVESTICIJE	Broj godina do povrata investicije	10,77	7,55	6,85

Razmatranjem ušteda CO₂ kao dodatnog prihoda, povrat investicije se smanjuje sa 10,77 godina na samo 6,85 godina što je skraćenje vremena povrata za nemalih 36%.

5.8. Ukupno smanjenje emisija CO₂ (P1)

Već je zaključeno kako je izgradnja bioplinskog postrojenja opravdana iz niza razloga, no postoji još jedan parametar koji uz današnje moderne deponijske sustave nije vjerodostojan, ali dobro ga je spomenuti. Naime, riječ je o uštedi emisija CO₂ koje bi generirao biootpad kada bi bio odložen na odlagalištu. Odloženi otpad je isti onaj koji bi bio upućen kao sirovina u bioplinsko postrojenje, što pak znači da ima isti bioplinski potencijal izmjerenom u poglavlju 5.4, odnosno 410 Nm³/t. Odlagalište predstavlja spor i neefikasan digester, no u konačnici količine produkata su kumulativno jednake. Tablica 24 prikazuje razliku emisija CO₂ za slučaj odlaganja otpada i proizvodnje bioplina od istoga uz njegovo daljnje izgaranje u motorima.

Tablica 24. P1 - Teoretski ukupno smanjenje emisija CO₂

	BIOOTPAD (1 t)			
	ODLAGANJE		IZGARANJE BIOPLINA	
Emisija, kg	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂
	62,2	114	0	285
ekv. CO ₂ , kg	1741,6	114	0	285
UKUPNO, kg ekv. CO ₂	1855,6		285	
SMANJENJE EMISIJA CO₂, kg ekv. CO₂/t biootpad	1570,6			

Jedna tona odloženog biorazgradivog otpada bioplinskog potencijala od 410 Nm³/t, uzimajući u obzir kako je metan 28 puta jači staklenički plin od CO₂, daje 1,86 t ekvivalenta CO₂ u atmosferu, kao što je prikazuje Tablica 24.

Moderni sustavi odlagališta otpada sakupljaju deponijski plin koji spaljuju na baklji i tako u atmosferu ispuštaju staklenički blaži plin CO₂. Iz tog razloga se opravdanost izgradnje bioplinskog postrojenja ne može potkovati izračunatim, no time je potvrđena potreba za obaveznom ugradnjom baklji na odlagalištima.

5.9. Posljedice izgradnje bioplinskog postrojenja

5.9.1. Prednosti

Izgradnja bioplinskog postrojenja donosi brojne benefite za lokalnu zajednicu, no i za čovječanstvo općenito, a neki od njih su:

- rješavanje problema odlaganja otpada (smanjenje odlaganja), postizanje ciljeva propisanih ZOGO-m
- smanjenje emisije metana kao stakleničkog plina
- stvaranje novih radnih mjesta
- stvaranje dodane vrijednosti
- poticanje javnosti na odvajanje i recikliranje otpada
- nastanak korisnih nusprodukata (kompost, CO₂)
- smanjenje ispiranja tla umjetnim gnojivima.

5.9.2. Nedostaci

Kao i svaki čin u povijesti, tako i izgradnja bioplinskog postrojenje ima svoje negativne efekte, a neki od njih su:

- negodovanje obližnjeg stanovništva
- narušavanje estetike područja
- potreba za transportom otpada
- potreba za velikim količinama vode i potencijalno zagađenje iste.

6. ZAKLJUČAK

Ovaj rad jasno pokazuje kako ulaganje u bioplinska postrojenja na ekološki i energetski prihvatljiv način rješava gorući problem gospodarenja biorazgradivim otpadom, uz značajan pozitivan utjecaj na bilancu stakleničkih plinova. Dobrobiti postrojenja koje kao sirovinu koristi biorazgradivi otpad uvelike nadjačavaju negativne efekte koje za sobom povlači izgradnja istog. Oporabom biorazgradivog otpada u bioplinskom postrojenju dobiva se energent koji je vrlo praktičan za korištenje, a uz to je i CO₂ neutralan.

Studijom slučaja za područje Istarske županije pokazano je kako sirovine za bioplinsko postrojenje kapaciteta 15.000 tona biorazgradivog otpada godišnje ima dovoljno u neposrednoj blizini. Putem laboratorijski izmjenjenog bioplinskog potencijala te navedene količine otpada proračunat je godišnji prinos biometana od 1.129.150 Nm³, što je energetski odgovara istom broju litara dizelskog goriva.

Financijskom analizom je pokazano kako projekt ima svoju financijsku opravdanost te bi bio od velikog značaja za područje Istarske županije, ali i za cijelu Hrvatsku. Uključivanjem eksternalija u financijsku analizu naglasak je na znatno bržem povratu investicije uzimanjem u obzir na prvi pogled nevidljivih dobrobiti koje bioplinsko postrojenje donosi. Predviđa se kako će se u budućnosti sustav obračuna naplate energenata mijenjati. Za očekivati je da će se u uvjetima Zelenog europskog plana tijekom kojeg se emisije stakleničkih plinova moraju smanjiti za gotovo 50% do 2030, a preko 90% do 2050., stvoriti financijski okvir za snažnije fiskalno vrednovanje ovakvih postrojenja sa značajnim potencijalom smanjenja stakleničkih plinova.

LITERATURA

- [1] Pachauri, R. K., Gomez-Echeverri, L., & Riahi, K. Synthesis report: summary for policy makers; 2014.
- [2] Change, N. G. C. Vital signs of the planet. Available from : <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/> Pristupljeno: 19.10.2021.
- [3] Stachowitz, W. H. Overview of methane oxidization at (old) landfills–global CO2 consideration, Trade with CO2–certificates. In Proceedings 9th International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia. ; 2003.
- [4] EUROPSKA KOMISIJA. KOMUNIKACIJA KOMISIJE EUROPSKOM PARLAMENTU, VIJEĆU, EUROPSKOM GOSPODARSKOM I SOCIJALNOM ODBORU I ODBORU REGIJA o strategiji EU-a za smanjenje emisija metana; Bruxelles; 2020.
- [5] L. Hrnčević; Problemi zaštite zraka i staklenički plinovi u naftnoj industriji, Sveučilište u Zagrebu Rudarsko-naftno-geološki fakultet, Zagreb, 2014.
- [6] Anić-Vučinić; A. Osnove gospodarenja otpadom. Sveučilište u Zagrebu Geotehnički fakultet; 2014.
- [7] T. Sofilić; Pravo okoliša, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2015
- [8] McCammon, A. L. United Nations Conference on Environment and Development, held in Rio de Janeiro, Brazil, during 3–14 June 1992, and the'92 Global Forum, Rio de Janeiro, Brazil, 1–14 June 1992. Environmental Conservation; 1992;19(4): 372-373.
- [9] Kyotski protokol. Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja. 2021. Available from: <https://mingor.gov.hr/o-ministarstvu1065/djelokrug-4925/klima/zastita-klime/kyotski-protokol/1883> Pristupljeno: 19.10.2021
- [10] The Paris Agreement. UNFCCC. 2021. Available from : <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement> Pristupljeno:19.10.2021.
- [11] Holding Centar. Gospodarenje otpadom. Available from: <http://www.cistoca.hr/gospodarenje-otpadom8/osnove-1508/definicija-1509/1509> Pristupljeno: 21.10.2021.
- [12] Municipal waste management across European countries. European Environment Agency. 2016. Available from: https://www.eea.europa.eu/publications/municipal-waste-management-across-european-countries/copy_of_municipal-waste-management-across-european-countries Pristupljeno: 15.10.2021

- [13] Ministarstvo zaštite okoliša i energetike. PLAN IZOBRAZNO-INFOMATIVNIH AKTIVNOSTI O ODRŽIVOM GOSPODARENJU OTPADOM GRADA ZAGREBA ZA RAZDOBLJE OD 2018. DO 2021. GODINE. Grad Zagreb. 2018.
- [14] Puntarić, E., Požgaj, Đ., Kušević – Vukšić, M., Kufirin, J. Izvješće o komunalnom otpadu za 2020. godinu. Zagreb. Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja. 2021.
- [15] PROCJENE STANOVNIŠTVA REPUBLIKE HRVATSKE U 2018. Državni zavod za statistiku RH. 2019. Available from : https://www.dzs.hr/Hrv_Eng/publication/2019/07-01-03_01_2019.htm Pristupljeno: 13.10.2021.
- [16] Održivo gospodarenje otpadom — kružna ekonomija i energetska učinkovitost — faktor zaštite okoliša. IMPRESSUM; 2020.
- [17] Zavod za zaštitu okoliša i prirode. Metodologija za određivanje sastava i količina komunalnog odnosno miješanog komunalnog otpada. Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja. 2015. Available from: <http://www.haop.hr/hr/publikacije/metodologija-za-odredivanje-sastava-i-kolicina-komunalnog-odnosno-mijesanog-komunalnog> Pristupljeno: 25.09.2021.
- [18] N. Voća, T. Krička, V. Jurišić; Pojmovnik bioplina: priručnik; Zagreb, 2009.
- [19] D. Kučić; Kompost. agroind. otp., biootpada i biorazg. KO u adijabatskom reaktoru; 2019.
- [20] Pravilnik o nusproizvodima i ukidanju statusa otpada, NN 117/14.
- [21] Otkriće močvarnog plina. Available from: <https://msuweb.montclair.edu/~olsenk/methane.html> , Pristupljeno: 2.10.2021.
- [22] Alessandro Volta – discoverer of methane. World of chemicals. 2021. Available from : <https://www.worldofchemicals.com/171/chemistry-articles/alessandro-volta-discoverer-of-methane.html> Pristupljeno: 13.10.2021.
- [23] Omerdić, N. Stručni prikaz: Anaerobnom digestijom do visokovrijednog organskog gnojiva. Hrvatske vode. 2020; 28(111): 43-50.
- [24] Majkovčan I. Proizvodnja energije anaerobnom fermentacijom različitih konzerviranih biomasa [specijalistički rad]. Osijek: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera i Institut Ruđer Bošković u Zagrebu; 2012.
- [25] Rohlik, P. Koncept iskorištavanja biootpada za proizvodnju biometana [diplomski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2016.
- [26] Vögeli, Y., Lohri, C. R., Gallardo, A., Diener, S., & Zurbrügg, C. Anaerobic digestion of biowaste in developing countries. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology; 2014.

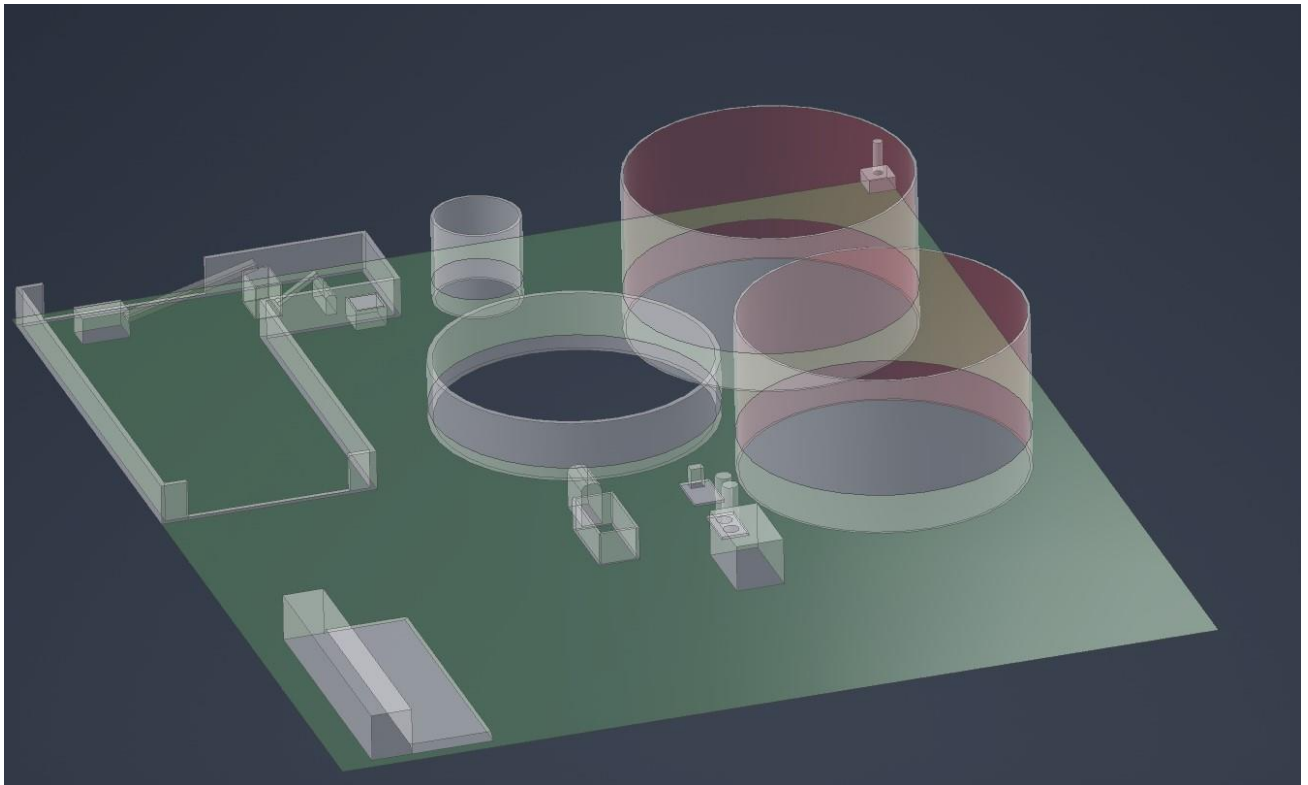
- [27] Orhororo, E. K., Ebunilo, P. O., & Sadjere, G. E. (2018). Effect of organic loading rate (OLR) on biogas yield using a single and three-stages continuous anaerobic digestion reactors. In International journal of engineering research in Africa. Trans Tech Publications Ltd. 2018; 39: 147-155.
- [28] Pravilnik o katalogu otpada, NN 90/2015
- [29] Osobna korespondencija
- [30] Suma: <https://www.suma.de/EN/> , Pristupljeno: 22.7.2021.
- [31] BIO-MACERATOR. BELLIN. 2021. Available from : <https://www.bellinpompe.com/en/products/macerators/bio-macerator/> Pristupljeno: 14.10.2021.
- [32] WHAT IS A ROTARY LOBE PUMP?. CSI store. 2021. Available from : <https://www.csidesigns.com/blog/articles/rotary-lobe-pump> Pristupljeno: 5.10.2021
- [33] M. Radaković; Biodizel, biogas, biomasa; 2009.
- [34] Eco Membrane. 2019. Available from : <https://www.ecomembrane.com/index.php/en/>, Pristupljeno: 18.10.2021.
- [35] Dobrović, S. Otpadne vode [predavanja]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2021.
- [36] Demister Pad - Maintenance, Classification and Specification. [BOEGGER](https://www.boegger.com). 2021. Available from: <https://www.demisterpads.com/demister-pad/demister-pad.html> Pristupljeno: 7.11.2021.
- [37] ENVIRONMENTAL ADVANTAGE THROUGH BIOMETHANE. SEPURAN Green. 2021.
- [38] Pazinka II. Grad Pazin. 2021. Available from : <https://www.pazin.hr/gospodarstvo-financije/poduzetnicke-zone/pazinka-ii/> Pristupljeno: 16.12.2021.
- [39] Europska agencija za okoliš: <https://www.europarl.europa.eu/news/hr/headlines/society/20190313STO31218/emisije-co2-u-prometu-eu-a-cinjenice-i-brojke> , 2.10.2021.
- [40] Istra – karta. Google karte. 2021. Available from: https://www.google.com/maps?q=istra&um=1&ie=UTF-8&sa=X&ved=2ahUKEwiJqZWGsa_0AhWehv0HHcuED4AQ_AUoAXoECAEQAw Pristupljeno: 10.12.2021.
- [41] Energy in croatia - godišnji energetska pregled. MINISTARSTVO ZAŠTITE OKOLIŠA I ENERGETIKE. 2015.

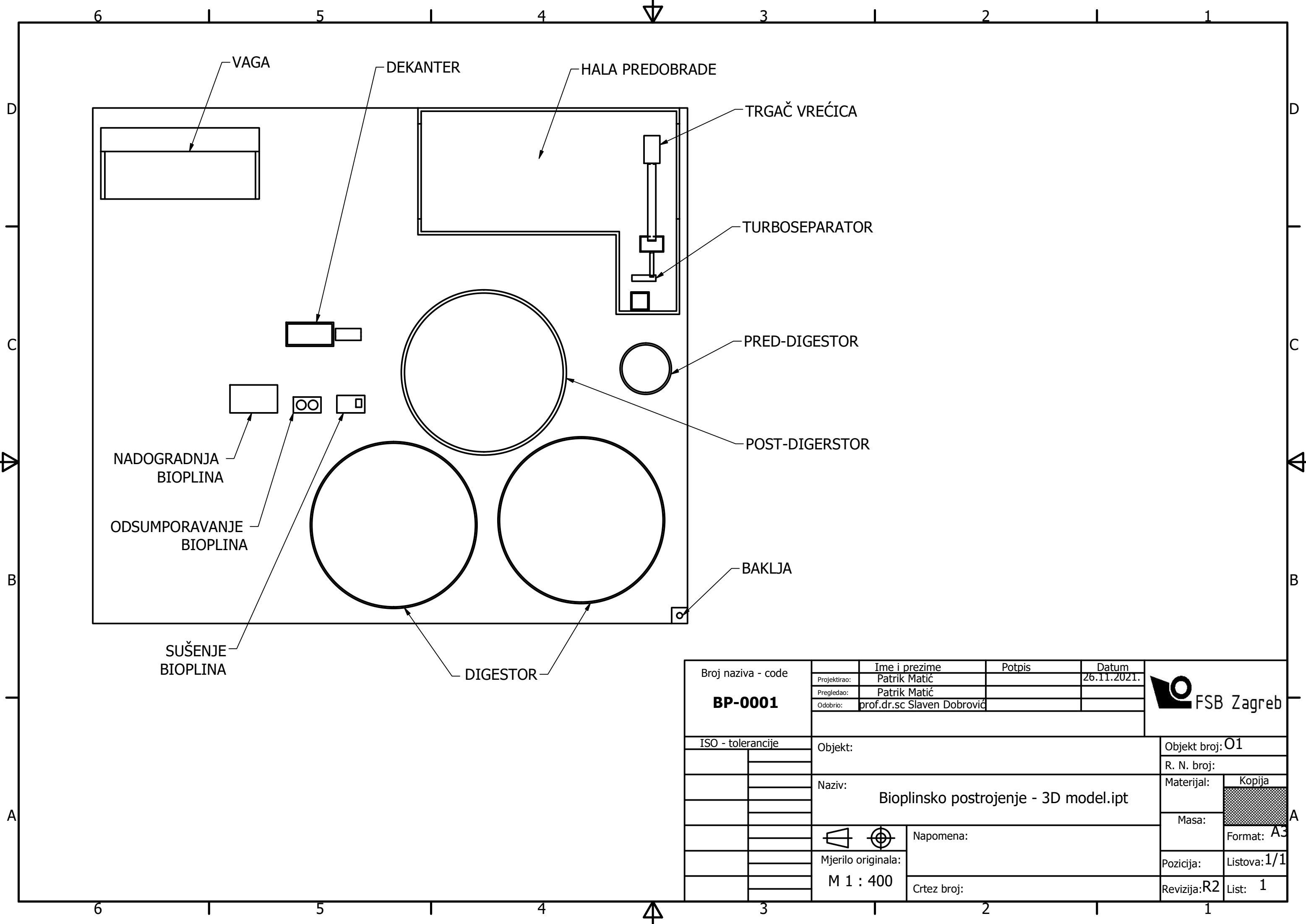
-
- [42] EU Carbon Permits. 2021. Trading Economics. Available from:
<https://tradingeconomics.com/commodity/carbon> , Pristupljeno: 29.11.2021.
- [43] Inventar stakleničkih plinova. MINISTARSTVO GOSPODARSTVA I ODRŽIVOG
RAZVOJA.2021.f


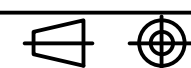

PRILOZI

- I. 3D model postrojenja
- II. Tehnička dokumentacija

CAD model bioplinskog postrojenja kapaciteta 15.000 tona godišnje:





Broj naziva - code BP-0001	Projektirao:	Ime i prezime Patrik Matić	Potpis	Datum 26.11.2021.	
	Pregledao:	Patrik Matić			
	Odobrio:	prof.dr.sc Slaven Dobrović			
ISO - tolerancije	Objekt:			Objekt broj: O1	
	Naziv:			R. N. broj:	
	Bioplinsko postrojenje - 3D model.ipt			Materijal:	Kopija
	  Napomena:			Masa:	Format: A3
	Mjerilo originala:			Pozicija:	Listova: 1/1
	M 1 : 400			Crtez broj:	List: 1