



UNIVERZITET CRNE GORE
METALURŠKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET
ZAŠTITA ŽIVOTNE SREDINE

ARNELA ŠABIĆ

**ISTRAŽIVANJE MOGUĆNOSTI
ISKORIŠĆENJA DEPONIJSKOG GASA U
PROIZVODNJI ELEKTRIČNE ENERGIJE NA
SANITARNOJ DEPONIJI „MOŽURA“ U BARU**

MASTER RAD

PODGORICA, JANUAR 2025. GODINA



UNIVERZITET CRNE GORE
METALURŠKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET
ZAŠTITA ŽIVOTNE SREDINE

ARNELA ŠABIĆ

**ISTRAŽIVANJE MOGUĆNOSTI
ISKORIŠĆENJA DEPONIJSKOG GASA U
PROIZVODNJI ELEKTRIČNE ENERGIJE NA
SANITARNOJ DEPONJI „MOŽURA“ U BARU**

MASTER RAD

Broj indeksa : 03/21

Mentor : Prof. Dr Veselinka Grudić

PODGORICA, JANUAR 2025. GODINA

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU

Ime i prezime magistranda : Arnela Šabić

Datum i mjesto rođenja : 13.03.1994., Bar, Crna Gora

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina završetka studija : Zaštita životne sredine, Metalurško-tehnološki fakultet, UCG, Podgorica, 2016. godine

INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU

Naziv studija : Zaštita životne sredine

Naslov rada : Istraživanje mogućnosti iskorišćenja deponijskog gasa u proizvodnji električne energije na sanitarnoj deponiji „MOŽURA“ u Baru

Fakultet : Metalurško-tehnološki

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

UDK :

Datum prijave rada: 25. 02. 2023. godine

Datum prihvatanja teme: 02. 10. 2023. godine

Mentor: Prof. dr Veselinka Grudić

Komisija za ocjenu rada :

Prof. dr Veselinka Grudić, redovni profesor MTF-a, mentor

Prof. dr Darko vuksanović, redovni profesor MTF-a, predsjednik

Prof. dr Ivana Bošković, redovni profesor MTF-a, komentor

Komisija za odbranu rada :

Prof. dr Veselinka Grudić, redovni profesor MTF-a, mentor

Prof. dr Darko Vuksanović, redovni profesor MTF-a, predsjednik

Prof. dr Ivana Bošković, redovni profesor MTF-a, komentor

Lektor : Autolektura

Datum odbrane : 26.03.2025. godine

IZJAVA O AUTORSTVU

Kandidat : Arnela Šabić

Na osnovu člana 22 Zakona o akademskom integritetu, ja dolje potpisana

IZJAVLJUJEM

pod punom krivičnom i materijalnom odgovornošću da je master rad pod nazivom

„Istraživanje mogućnosti iskorišćenja deponijskog gasa u proizvodnji električne energije na sanitarnoj deponiji „MOŽURA“ u Baru

Rezultat sopstvenog istraživačkog rada, da nijesam kršila autorska prava i koristila intelektualnu svojinu drugih lica i da je navedeni rad moje originalno djelo.

U Podgorici,

5. 01. 2025

Potpis studenta

ZAHVALNICA

Veliku zahvalnost dugujem mentorki prof. dr Veselinki Grudić na ukazanoj pomoći, strpljenju, povjerenju i uloženom trudu pri izradi ovog master rada.

Takodje se zahvaljujem na mnogobrojnim savjetima i strpljenju svim profesorima/cama sa MTF-a i referentu za studentska pitanja Dejani Popović koji su mi bili od koristi i doprinijeli boljem kvalitetu navedenog rada.

Dio teorijskog dijela kao i čitav eksperimentalni dio povezani su sa statističkim podacima koji su uzeti sa sanitarne deponije „MOŽURA“ u Baru i ovom prilikom želim da se zahvalim saradnicima sa navedene deponije na ukazanoj pomoći.

Posebnu zahvalnost dugujem porodici- roditeljima, sestri, zetu, sestričinama, baki i stricu, najboljoj drugarici kao i kolegama i kolegamicama s fakulteta koji su mi vjerovali i bili u svakom trenutku uz mene.

IZVOD

U ovom master radu su razmatrani produkcija deponijskog gasa tokom anaerobne razgradnje otpada deponovanog na deponiji „Možura“, mogućnost energetskog iskorišćenja gasa na deponiji, kao i vrste tretmana u cilju što bolje, efikasnije i isplativije proizvodnje deponijskog gasa. Poseban akcenat je stavljen na tretmane: spaljivanje na baklji ili sakupljanje gasa za proizvodnju električne energije direktnim putem ili indirektnim uz pomoć generatora.

Istraživački rad je sproveden kroz nekoliko faza: analiza količine deponovanog komunalnog otpada na sanitarnoj deponiji „Možura“, kao sirovine za proizvodnju deponijskog gasa, analiza količine emitovanog deponijskog gasa na dnevnom, mjesečnom i godišnjem nivou u periodu od 2010. godine do 2023. godine, praćenje sastava deponijskog gasa koji se dovodi na baklju za spaljivanje, preko postojećeg mjernog uređaja, opis tehnologija proizvodnje električne energije u kontejnerskim kogeneratorima na osnovu postojećih podataka o količinama proizvedenog deponijskog gasa, prijedlog koraka u cilju proizvodnje električne energije na sanitarnoj deponiji „Možura“ i definisanje mjera koje treba preuzeti u cilju zaštite životne sredine.

Deponija „Možura“ je jedan od najvećih objekata za odlaganje otpada u Crnoj Gori, gdje se svakodnevno deponuje velika količina otpada. Prema posljednjim procjenama, deponija sadrži značajne količine deponovanog otpada koji se kontinuirano razgrađuje, stvarajući biogas. Zbog svoje veličine i obima proizvodnje gasa, „Možura“ predstavlja idealno mjesto za implementaciju tehnologija koje mogu efikasno pretvoriti deponijski gas u korisnu energiju.

Eksperimentalni dio rada obuhvata mjerenja količine i sastava deponijskog gasa na sanitarnoj deponiji „Možura“ uz pomoć kalibrisanih mjernih uređaja i ispitivanje mogućnosti za izbor najpogodnijeg kogeneracijskog postrojenja za proizvodnju električne energije iz deponijskog gasa.

U ovom radu analiziran je predlog energetskog postrojenja na deponiji „Možura“ za proizvodnju električne energije, sa naglaskom na efikasnost procesa prečišćavanja deponijskog gasa, tehnologiju spaljivanja i smanjenje emisije štetnih gasova, posebno NO_x, kako bi se postigla usklađenost sa ekološkim standardima. Rezultati istraživanja pokazuju da proizvodnja električne energije iz deponijskog gasa kroz primjenu kogenerativnog sistema (CHP) može značajno doprinijeti smanjenju emisije štetnih gasova i korišćenju obnovljivih izvora energije.

Ključne riječi : sanitarna deponija „Možura“, deponijski gas, metan, efekat staklene bašte, tehnologije za proizvodnju električne energije iz deponijskog gasa

ABSTRACT

In this master's thesis, the production of landfill gas during the anaerobic decomposition of waste deposited at the „Možura“ landfill, the possibility of energy utilization of gas at the landfill, as well as the types of treatment aimed at the best, most efficient and cost-effective production of landfill gas were considered.

Special emphasis is placed on treatments: flaring or collecting gas for the production of electricity directly or indirectly with the help of a generator.

The research work was carried out through several stages: analysis of the amount of municipal waste deposited at the „Možura“ sanitary landfill, as a raw material for the production of landfill gas, analysis of the amount of emitted landfill gas on a daily, monthly and annual level in the period from 2010 to 2023., monitoring the composition of the landfill gas that is fed to the incineration flare, through the existing measuring device, a description of the technologies for the production of electricity in container cogenerators based on the existing data on the amount of landfill gas produced, a proposal for steps to produce electricity at the sanitary landfill „Možura“ and defining the measures to be taken in order to protect the environment.

The „Možura“ landfill is one of the largest waste disposal facilities in Montenegro, where a large amount of waste is deposited every day. According to the latest estimates, the landfill contains significant amounts of deposited waste that is continuously decomposed, creating biogas. Due to its size and volume of gas production, „Možura“ represents an ideal place for the implementation of technologies that can effectively convert landfill gas into useful energy.

The experimental part of the work includes measurements of the amount and composition of landfill gas at the „Možura“ sanitary landfill with the help of calibrated measuring devices and examination of the possibility of choosing the most suitable cogeneration plant for the production of electricity from landfill gas.

This paper analyzes the proposal of an energy plant at the „Možura“ landfill for the production of electricity, with an emphasis on the efficiency of the landfill gas purification process, incineration technology and the reduction of harmful gas emissions, especially NO_x, in order to achieve compliance with environmental standards.

The research results show that the production of electricity from landfill gas through the application of a cogeneration system (CHP) can significantly contribute to the reduction of harmful gas emissions and the use of renewable energy sources.

Key words : sanitary landfill „Možura“, landfill gas, methane, the effect of stacked garden, technologies for the production of electricity from landfill gas

SADRŽAJ

1. UVOD.....	9
2 . TEORIJSKI DIO	10
2.1. Komunalni otpad	10
2.2. Izvori komunalnog otpada.....	11
2.3. Fizička, hemijska i biološka svojstva komunalnog otpada	14
2.3.1. Fizička svojstva komunalnog otpada	14
2.3.2. Hemijska svojstva komunalnog otpada	14
2.3.3. Biološka svojstva komunalnog otpada	15
2.4. Upravljanje komunalnim otpadom.....	15
2.5. Deponija komunalnog otpada i odlaganje otpada na deponiji.....	16
2.6. Proces nastajanja deponijskog gasa.....	19
2.6.1. Parametri anaerobne digestije u procesu proizvodnje deponijskog gasa.....	24
2.6.1.1. Temperatura	24
2.6.1.2. Stopa organskog opterećenja (OLR).....	24
2.6.1.3. HRT (hidraulično retenciono vrijeme).....	24
2.6.1.4. Odnos ugljenika i azota (C/N).....	25
2.6.1.5. pH vrijednost.....	25
2.7. Sastav i karakteristike deponijskog gasa.....	25
2.8. Faktori koji utiču na proizvodnju deponijskog gasa.....	27
2.9. Tehnologije proizvodnje električne energije iz deponijskog gasa	27
2.9.1. Karakteristike koje utiču na korišćenje deponijskog gasa	30
2.9.2. Karakteristike koje utiču na mogućnost proizvodnje električne energije iz deponijskog gasa	31
3. EKSPERIMENTALNI DIO	33
3.1. Opis deponije „Možura“	33
3.2. Način sakupljanja deponijskog gasa.....	34
4. REZULTATI I DISKUSIJA.....	36
4.1. Procjena količina deponovanog otpada sa deponije „Možura“	36
4.2. Procjena količina deponijskog gasa	40
4.2.1. Primjeri dobre prakse energetskog iskorišćenja deponijskog gasa iz zemalja u okruženju	44
4.3. Predlog energetskog postrojenja i tehnologije procesa proizvodnje električne energije na deponiji „Možura“	46
4.3.1. Prečišćavanje deponijskog gasa	47
4.3.2. Proračun emisije NO _x u kogeneracijskom postrojenju na deponiji „Možura“	50

ZAKLJUČAK	54
LITERATURA.....	56
PRILOG.....	62

1. UVOD

Porast broja stanovnika, urbanizacija i industrijalizacija doveli su do drastičnog porasta količine produkovanog komunalnog otpada. Procijenjuje se da će količina komunalnog otpada na svjetskom nivou dostići oko 2,2 milijarde tona do 2025. godine. Otpad, u nedostatku adekvatnog upravljanja, može negativno uticati na zdravlje ljudi i životnu sredinu.

Sanitarna deponija, kao dio lokacije na kojoj se može bezbjedno odložiti komunalni otpad, predstavlja najjednostavnije prihvatljivo rješenje savremenog upravljanja otpadom. Na ovaj način se obezbjeđuje izolovanje otpada od okoline, što omogućava upravljanje njegovim produktima, kao što su generisani deponijski gas-biogas i procjedna voda, sa ciljem ograničavanja emisija zagađujućih materija u spoljašnju sredinu. Nekontrolisano ispuštanje deponijskog gasa dovodi do povećane emisije gasova sa efektom staklene bašte što negativno utiče na životnu sredinu.

Energetsko iskorišćenje otpada je vrlo obećavajući pristup njegovom zbrinjavanju koji obezbjeđuje energetske sigurnost i održivost životne sredine, a pruža i značajne ekonomske koristi.

Deponijski gas (LFG) je nusproizvod deponija, prirodno proizveden razgradnjom organskih komponenti otpada [1]. Deponijski gas ima pozitivna i negativna svojstva. Glavna negativna svojstva su neprijatan miris (uglavnom zbog sumpornih komponenti u gasu), doprinos problemu globalnog zagrijavanja i oštećenja vegetacije. Pozitivna svojstva su karakteristike sagorijevanja i energetske sadržaj [2]. Sagorijevanje deponijskog gasa je efikasnije rješenje od spaljivanja na baklji zbog mogućnosti iskorišćenja nastale toplotne energije.

Da bi se deponijski gas mogao direktno koristiti neophodno je da objekti u kojima će biti korišćen ne budu udaljeni više od 8 km od deponije [3].

Od brojnih prednosti iskorišćenja LFG u energetske svrhe ističu se: zaštita vazduha od zagađenja, smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte i ekonomska dobit.

Zahvaljujući dominantnom sadržaju metana u deponijskom gasu, druga mogućnost njegove upotrebe je proizvodnja električne energije na generatorima [4].

Predmet istraživanja ovog rada je mogućnost energetske valorizacije deponijskog gasa produkovanog na sanitarnoj deponiji komunalnog otpada anaerobnog tipa „Možura“ u Baru.

Rezultati rada ukazuju na pozitivne faktore proizvodnje električne energije iz deponijskog gasa koji nastaje na deponiji, a utvrđeno je i koji će benefiti biti ostvareni na ovaj način, kako sa ekološkog tako i sa ekonomskog aspekta.

2. TEORIJSKI DIO

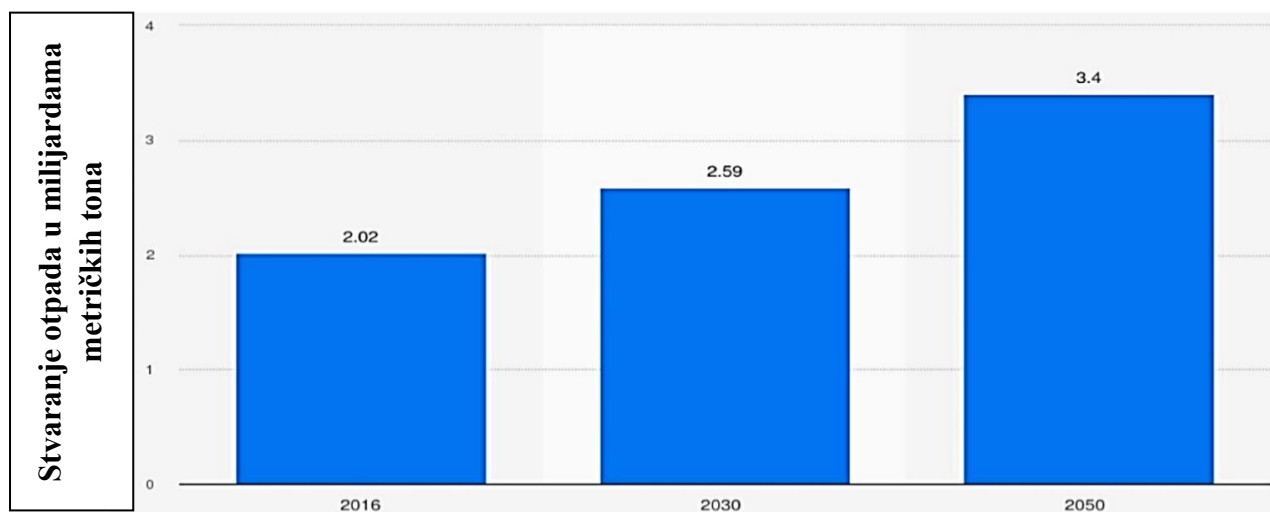
2.1. Komunalni otpad

Pod pojmom komunalnog otpada definišu se svi neželjeni materijali koji nastaju ljudskom aktivnošću [5]. Komunalni otpad je vrsta otpada koji se najčešće stvara u domaćinstvima, na javnim i gradskim površinama, institucijama industrijskih i privrednih djelatnosti [6]. U zavisnosti od njegovog sastava vrši se klasifikacija komunalnog otpada na: staklo, metal, papir, plastiku.

Na osnovu parametara opasnosti se klafisikuje na: zapaljiv, radioaktivan, toksičan, netoksičan, infektivan [5].

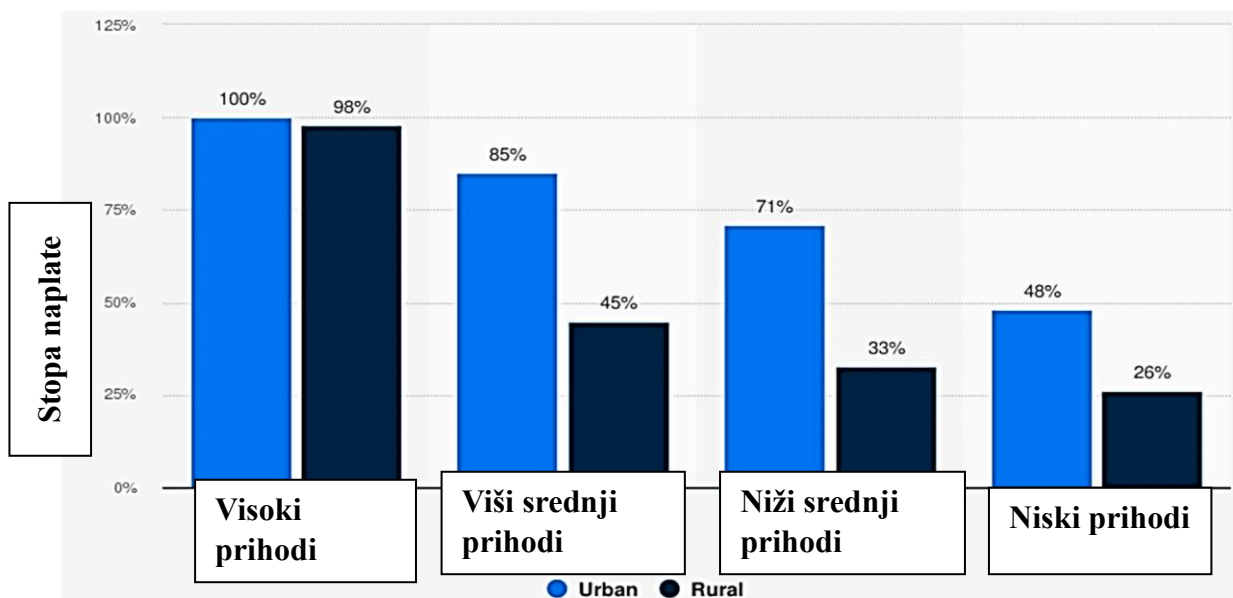
Zbog migracije stanovništva iz ruralnih područja u urbane sredine problem upravljanja komunalnim otpadom postaje svakodnevica na koju treba obratiti pažnju [7], zbog problema sa kanalizacijom, širenja bolesti u gradovima zemalja u razvoju, oštećenja biodiverziteta i zagađenja vazduha [5]. Procjenjuje se da se svake godine proizvede oko 2,01 milijardi tona komunalnog otpada [7]. Predviđanja govore da će na globalnom nivou biti proizvedeno 3,4 milijarde tona komunalnog otpada do 2050. godine.

Na slici 1 može se zapaziti porast količine komunalnog otpada u svijetu u periodu od 2016. godine do 2050. godine [7].



Slika 1. Količina komunalnog otpada u svijetu u periodu od 2016.godine do 2050. godine [7]

Pri sakupljanju otpada zapaža se razlika za urbana i ruralna područja gdje je stopa sakupljanja otpada veća u urbanim sredinama u odnosu na ruralna, što je i logičnije s obzirom na veću stopu širenja migracija i procesa ljudskih djelatnosti urbanizacije, što podaci na slici 2 jasno prikazuju [7].



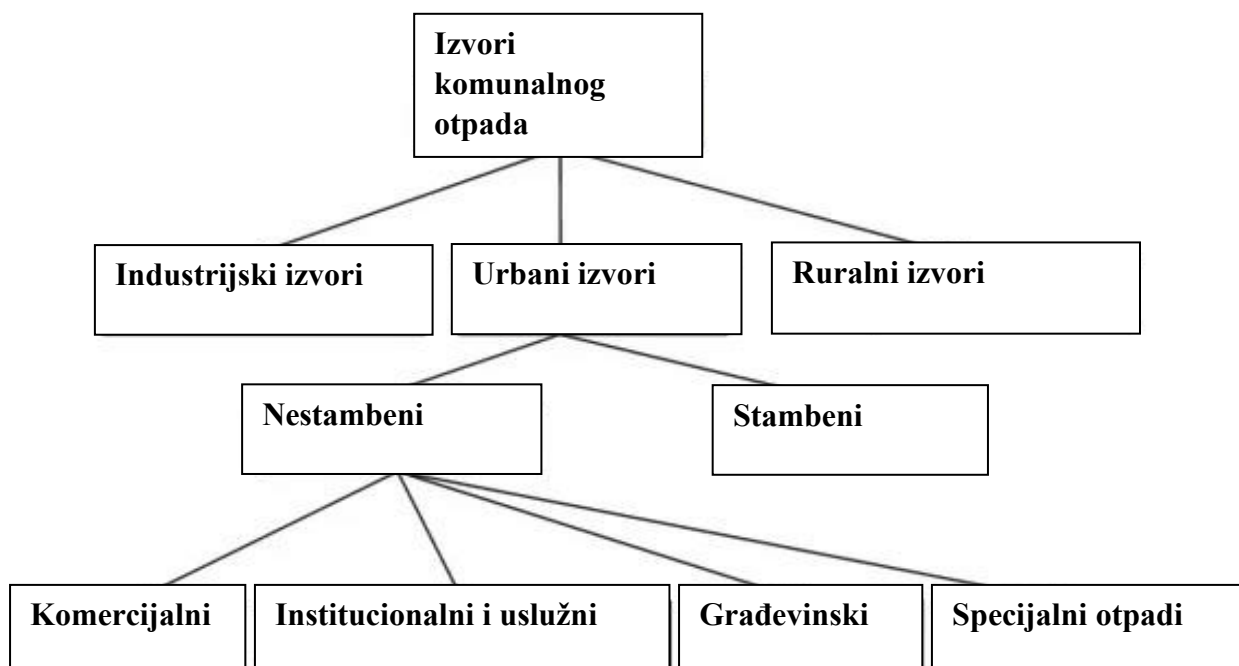
Slika 2. Stopa sakupljanja otpada u urbanim i ruralnim područjima u svijetu [7]

2.2. Izvori komunalnog otpada

Među glavnim izvorima komunalnog otpada mogu se svrstati sektori građevinstva, industrije, raznih institucija, komercijala, poljoprivrede i privatnih domaćinstava.

Karton, papir, plastika, metal, organski prehrambeni otpad su vrste čvrstog komunalnog otpada koje nastaju od navedenih izvora.

Takođe hemikalije, razna sredstva za čišćenje, baterije, farmaceutski lijekovi, električne sijalice, automobilske dijelove i vrste rušenih građevinskih materijala mogu se klasifikovati kao komunalni otpad [8].



Slika 3. Blok šema prikaza izvora komunalnog otpada [9]

Izvori otpada se mogu klasifikovati na urbane, industrijske i ruralne, a podvrste su prikazane na slici 3.

Industrijski otpad nastaje kao nusproizvod brojnih industrijskih procesa [9].

Otpad nastao poljoprivrednim aktivnostima, na primjer, đubriva, nusproizvodi životinjskog porijekla, otpad nastao u stočarstvu itd. pripada ruralnim izvorima [10].

U poseban otpad svrstavaju se hemijska sredstva koja potiču iz medicinskih izvora kao što su apoteke, ali i otpad sa aerodroma, servisnih službi.

Urbani izvori otpada obuhvataju: razne vrste stambenog i nestambenog otpada, na primjer, komercijalnog, institucionalnog/uslužnog otpada, građevinskog otpada i posebnih vrsta otpada [9].

U tabeli 1 dati su najvažniji izvori komunalnog otpada koji su opisani u prethodnom poglavlju kao i vrste komunalnog otpada koje su nastale od navedenih izvora [11].

Tabela 1. Klasifikacija izvora komunalnog otpada i njegovih vrsta [11]

Izvor	Tipični generatori otpada	Vrste čvrstog otpada
Stambeni	Pojedinačni višeporodični stanovi.	Otpad od hrane, papir, karton, plastika, tekstil, koža, otpad iz dvorišta, drvo, staklo, metali, pepeo, specijalni otpad (npr. kabasti predmeti, potrošačka elektronika, bijela tehnika, baterije, ulje i guma) i opasni otpad iz domaćinstva.
Industrijski	Laka i teška proizvodnja, proizvodnja, gradilišta, elektroenergetska i hemijska postrojenja.	Kućni otpad, ambalaža, otpad od hrane, građevinski materijali i materijali za rušenje, opasni otpad, pepeo, specijalni otpad.
Komercijalni	Prodavnice, hoteli, restorani, pijace, poslovne zgrade, itd.	Papir, karton, plastika, drvo, staklo, metali, specijalni otpad, opasni otpad.
Institucionalni	Škole, bolnice, zatvori, vladini centri.	Isto kao i komercijalni.
Izgradnja i rušenje	Nova gradilišta, popravka puteva, renoviranje, rušenje objekata.	Drvo, čelik, beton, prljavština, itd.
Opštinske službe	Čišćenje ulica, uređenje, parkovi, plaže, druge rekreativne površine, postrojenja za prečišćavanja vode i otpadnih voda.	Čišćenje ulica; obrezivanje pejzaža i drveća; opšti otpad iz parkova, plaža i drugih rekreativnih područja; mulj
Proces (proizvodnja, itd)	Teška i laka proizvodnja, rafinerije, hemijska postrojenja, elektrane, vađenje i prerada minerala.	Industrijski procesni otpad, otpadni materijali, proizvodi van specifikacije, šljaka, jalovina.
Poljoprivreda	Usjevi, voćnjaci, vinogradi, mljekare, tovilišta, farme.	Pokvareni otpad od hrane, poljoprivredni otpad, opasni otpad (npr. pesticidi).

2.3. Fizička, hemijska i biološka svojstva komunalnog otpada

Fizička, hemijska i biološka svojstva komunalnog otpada su pored količine, sastava i vrste otpada najznačajnija za sistem upravljanja otpadom posebno ako se radi o planiranju i projektovanju tretmana otpada poput termičkog tretmana, reciklaže, kompostiranja, deponovanja [12].

2.3.1. Fizička svojstva komunalnog otpada

Sastav otpada navodi se kao jedno od bitnijih fizičkih svojstava otpada pri čemu sastav zavisi od mnogobrojnih faktora poput godišnjeg doba, strukture stanovništva, klime, tipa naselja, načina života [12].

Za proračun veličine prostora odlaganja otpada kao i za proračune povezane sa brojem kontejnera i transportnih sredstava najčešće su primjenjivane zapremina i gustina [12].

Zapremina otpada nema konstantnu vrijednost, pa se iz tog razloga mijenja i **gustina otpada**.

Gustina otpada predstavlja jednu od osnovnih svojstava na osnovu koje se vrše proračuni za veličine kontejnera i transportnih sredstava, a zavisi od sastava, sadržaja vlage i stepena kompaktnosti. Izražava se u kg/m^3 [12].

Sadržaj vlage se tretira kao veoma važna karakteristika zbog biohemijskih procesa kod otpada i pri izboru metode za njegovu dispoziciju [12].

Vlažnost otpada se definiše na osnovu odnosa gubitka mase i preostalog materijala.

Vlažnost se klasifikuje na osnovu mehanizma zadržavanja tečnosti unutar otpada u prostorima njegovih pora na sledeći način:

vlažnost unutar čestica otpada odnosno vlažnost unutar čestica u porama otpada, čestice otpada sa slabom hidrauličkom provodljivošću koje imaju mogućnost zadržavanja vlažnosti i vlažnost između čestica, to jest u porama unutar čestica [13].

2.3.2. Hemijska svojstva komunalnog otpada

Hemijski sastav navodi se kao bitna karakteristika sa aspekta pravilnog izbora postupaka i opreme za njegovu preradu i korišćenje [12, 14].

Lipidi, proteini, ugljeni hidrati, vlakna i neorganska jedinjenja čine hemijski sastav komunalnog otpada.

pH vrijednost kao jedan od bitnijih parametara se određuje laboratorijskim putem. pH utiče na proces degradacije otpada, a važan je i za kontrolisanje kvaliteta procjednih voda [12]. Kod otpada u domaćinstvima pH vrijednost se kreće u opsegu od 5-6,5 [14].

Odnos azota i ugljenika (C/N) utiče na mogućnosti kompostiranja otpada. Sadržaj ugljenika

kao i sadržaj vode su bitni faktori koji određuju kalorijsku vrijednost frakcija otpada [12].

Sadržaj gorivih i negorivih sastojaka utiče na energetske vrijednosti otpada.

Nesagorivi sastojci doprinose manjoj energetske vrijednosti materijala dok gorivi sastojci imaju suprotan efekat [12].

Toplotna moć je jedna od najbitnijih karakteristika otpada zato što je njena vrijednost veća od toplotne moći goriva pa se otpad može koristiti u energetske svrhe kao gorivo, a zavisi od sposobnosti gorenja otpada i njegovog sastava [12].

Izražava se u kJ/kg i može se odrediti računskim ili eksperimentalnim putem [14].

2.3.3. Biološka svojstva komunalnog otpada

Biološka svojstva komunalnog otpada utiču na izbor tehnologija biološkog tretmana (anaerobna digestija, kompostiranje ili biosušenje) koje se primjenjuju u cilju proizvodnje energije ili korisnih proizvoda [12].

Biološka svojstva otpada mijenjaju se zbog njegovog starenja i razgradnje [12, 15]. Razgradnja organskog otpada stvara gasove (CH_4 , CO_2), a u manjoj mjeri (H_2S , N_2 , NH_3) koji utiču na životnu sredinu.

2.4. Upravljanje komunalnim otpadom

Primjenom odgovarajućih tehnologija upravljanja otpad se može uspješno pretvoriti u brojne energetske i ekonomske resurse. Tehnologije upravljanja komunalnim otpadom zavise od brojnih faktora: geografskog položaja, privrednog razvoja, demografskih faktora [16]. Odlaganje otpada na otvorenim odlagalištima, usljed nedostatka odgovarajućih sistema upravljanja otpadom je karakteristično za zemlje sa niskim i srednjim dohotkom. Spaljivanje otpada u cilju smanjenja količine otpada i proizvodnje energije je praksa, široko primjenljiva u zemljama u razvoju. Odlaganje na sanitarne deponije i termička obrada komunalnog otpada češći su u zemljama s visokim dohotkom [17].

U cilju maksimalnog iskorišćavanja otpada i njegovog pravilnog odlaganja, danas se u svijetu koriste različite tehnologije upravljanja otpadom. S obzirom da su neke od njih skuplje od drugih integrisani pristupi upravljanja otpadom omogućavaju prepoznavanje i izbor jeftinijih rješenja. Integrisani sistem može rezultovati nizom rješenja koja se međusobno dopunjavaju i čine cjelokupni sistem upravljanja otpadom prihvatljivim i opravdanim [18].

Upravljanje komunalnim otpadom obuhvata četiri glavne aktivnosti:

Sortiranje i sakupljanje. Sortiranje otpada predstavlja proces razdvajanja komunalnog otpada na različite vrste. Proces sakupljanja uključuje prikupljanje otpada iz domaćinstava, iz uličnih i kontejnera različitih institucija.

Recikliranje. Nakon sortiranja otpada, materijali koji se mogu reciklirati prerađuju se u korisne proizvode.

Prenos i prevoz. Ovaj proces uključuje isporuku sakupljenog otpada do transfer stanica ili postrojenja za obradu.

Obrada i zbrinjavanje. Obrada otpada je proces zbrinjavanja otpada nakon sakupljanja. Otpad se može odložiti na odlagalištima ili spaliti procesom spaljivanja. Otpad koji se ne može reciklirati može se pretvoriti u kompost ili energiju [19].

Jedna od najpopularnijih metoda za odlaganje otpada u današnjem vremenu je deponija. Pomoću ove metode vrši se zakopavanje otpada u zemlju pri čemu je poželjno koristiti procese za eliminisanje opasnosti otpada i mirisa prije nego što se otpad stavi u zemlju [20]. Međutim ova metoda ima i svoje nedostatke poput kontaminacije podzemnih voda i degradacije zemljišta, izazivanja požara, privlačenja pacova i ostalih prenosilaca bolesti, nemogućnost pronalaženja adekvatne lokacije za odlaganje otpada, nedostatak prostora, širenja gasova efekta staklene bašte poput metana što može dovesti do problema sa kontaminacijom [20]. Zbog navedenih razloga deponija treba da posjeduje način za odvodnjavanje, sagorijevanje i prikupljanje metana kako bi se spriječili problemi sa kontaminacijom što je prednost inženjerske projektovane deponije u odnosu na otvoreni tip deponije [20].

2.5. Deponija komunalnog otpada i odlaganje otpada na deponiji

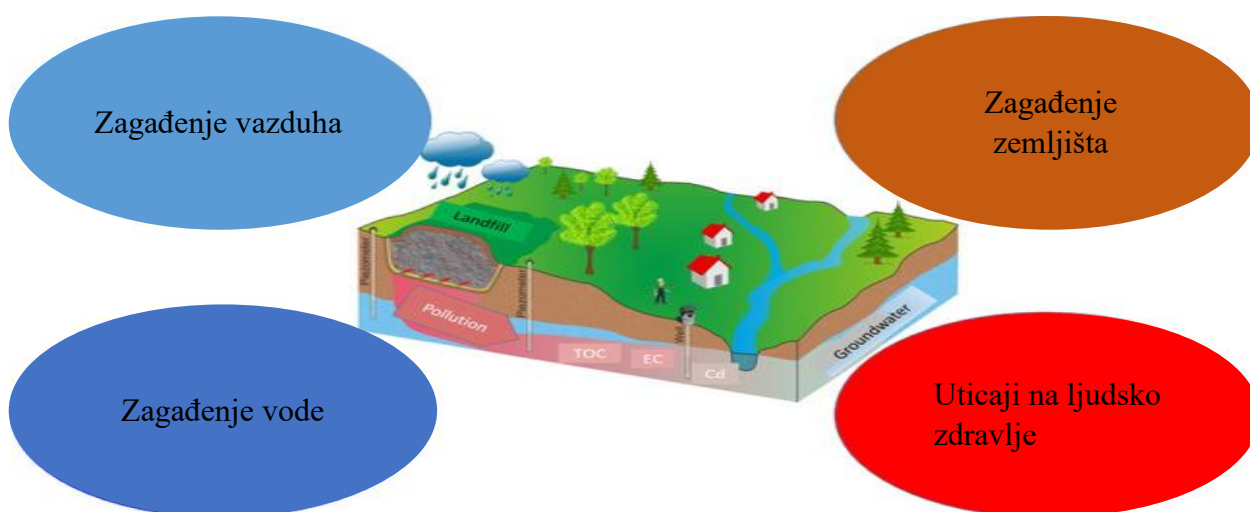
Deponija predstavlja jedan od najstarijih i najčešće primjenjivanih i najekonomičnijih tretmana za odlaganje otpada u cijelom svijetu.

Upravljanje deponijama je veoma značajno s aspekta zagađenja, zaštite životne sredine i zdravlja ljudi [21].

Otpad sa deponije može negativno uticati na okolinu i zdravlje ljudi odnosno može izazvati bolesti poput mutagenosti, genotoksičnosti (toksičnost koja uzrokuje oštećenje DNK) i kancerogenosti zbog zagađivača koje sadrži [21]. Na deponiji otpada mogu se naći zagađivači kao predstavnici izazivača bolesti i s aspekta zaštite životne sredine imaju negativan uticaj na biodiverzitet, gdje se kao primjer navode ptice kod kojih dolazi do zamjene sa onim vrstama koje mogu da se hrane otpadom što je način za prenošenje bolesti.

Takođe treba navesti i uticaj procjednih voda sa deponija na životnu sredinu zbog sastava raznih vrsta organskih i neorganskih zagađivača koje se slivaju u podzemne vode, doprinoseći toksičnosti i onemogućavanju njihovog konzumiranja, a time se dodatno zagađuje i zemljište [21].

Ispuštanjem gasova kao što su metan, ugljenik (IV)-oksid i ostali koji učestvuju u toksičnim procesima na deponiji doprinosi se stvaranju štetnih materija pri čemu dolazi do zagađenja vode, zemljišta, vazduha i biodiverziteta. Mogući štetni uticaji deponije na životnu sredinu prikazani su na slici 4.



Slika 4. Deponija i njen uticaj na životnu sredinu [21]

Postoji nekoliko vrsta deponija i mogu se klasifikovati na sljedeći način: deponije opasnog otpada, deponije komunalnog otpada, deponije industrijskog otpada i deponije pod nazivom „zelene deponije“.

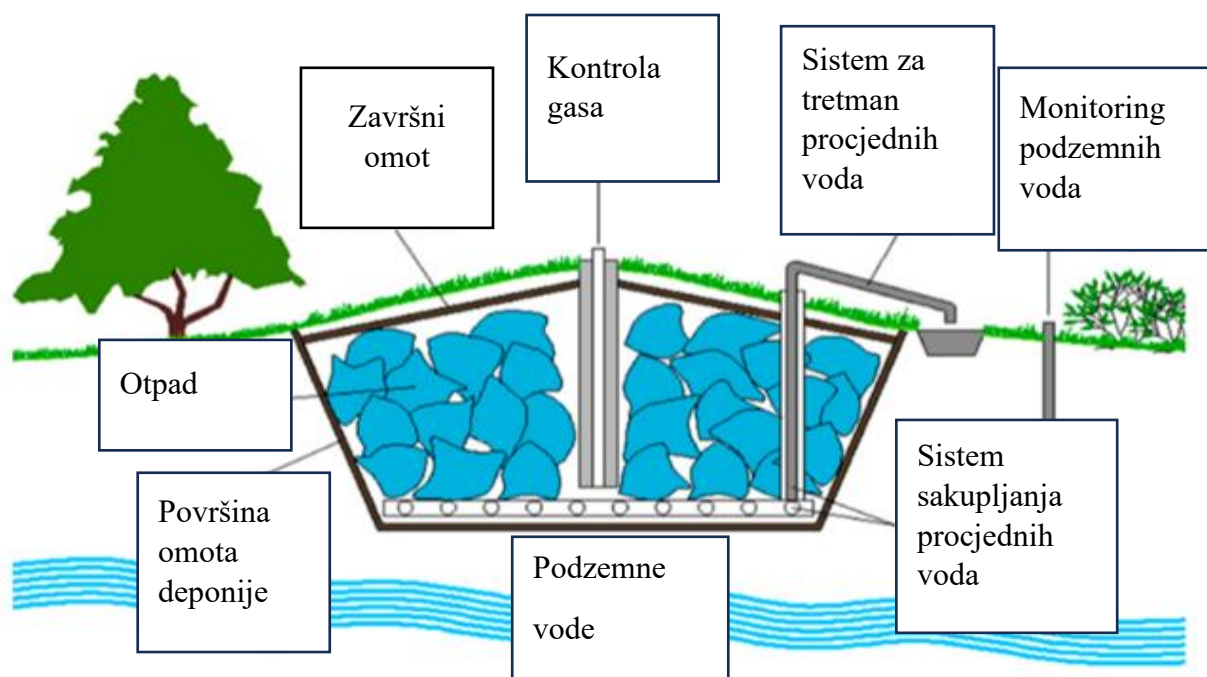
Prikupljanje i odlaganje komunalnog otpada pretežno se vrši na sanitarnim deponijama ili deponijama koje su neuređene.

Potreba za prikupljanjem i sanitarnim zbrinjavanjem komunalnog otpada nije bila prepoznata sve do nedavno. Prije pedeset godina, u cijelom svijetu većina komunalnog otpada odlagana je na otvorenim odlagalištima ili deponijama. Godine 1959. Američko društvo građevinskih inženjera (ASCE) definisalo je „sanitarno odlaganje otpada“ kao kontrolisanu operaciju u kojoj se otpad odlaže u definisanim slojevima, pri čemu se svaki sloj zbija i prekriva zemljom prije odlaganja sljedećeg sloja [22].

Neuređena deponija i sanitarna deponija razlikuju se po tome što se na neuređenim deponijama i đubrištima otpad može direktno odlagati pri čemu se otpad ne odvaja od tla i time negativno utiče na podzemne vode i zemljište, dok je sanitarna deponija dizajnirana inženjerskim postupcima i sastoji se od sistema za sakupljanje i uklanjanje procjednih voda, a tlo je obloženo

folijama od vještačkih materijala koje štite dno sprječavajući prodiranje procjednih voda čime se smanjuje negativan uticaj na zemljište i podzemne vode.

Uloga deponija je u skladištenju i tretmanu otpada [23]. Na slici 5 nalazi se prikaz strukture sanitarne deponije i procesa koji se na njoj odvijaju.



Slika 5. Struktura sanitarne deponije i procesi koji se na njoj odvijaju [23]

Zbog prijetnji i rizika po životnu sredinu i zdravlja ljudi neophodno je bazirati se na funkcionisanje i stabilnost deponije koji zavise od niza faktora poput dizajna i nagiba lokacije, količine i kvaliteta procjednih voda, klimatskih uslova, pokrivanja, sastava gasa, hidrogeologije lokacije [23].

U sistemu upravljanja otpadom jedan od najvažnijih tretmana predstavlja odlaganje otpada na deponiji, ali je ujedno i najmanje poželjan način upravljanja otpadom [24].

Upravljanje, sakupljanje i odlaganje otpada u urbanim sredinama jedan je najvećih ekoloških problema u današnjem vremenu [25].

2.6. Proces nastajanja deponijskog gasa

Jedan od proizvoda bioloških procesa koji se odvijaju na odlagalištima komunalnog otpada je biogas ili deponijski gas (LFG) koji nastaje razgradnjom biološki razgradive organske materije [26, 27].

Količina proizvedenog deponijskog gasa i njegov sastav mijenjanju se tokom životnog vijeka deponije.

Razgradnja komunalnog otpada se ostvaruje pod dejstvom fizičkih, hemijskih i bioloških procesa.

Fizička degradacija znači transformaciju komponenti komunalnog otpada, a kao rezultat nastaje izmjena fizičkih karakteristika otpada. Tu spadaju smanjenje zapremine, izdvajanje supstanci i njihovo taloženje, aspiracija gasa ili rastvora na površini otpada.

Hemijska degradacija otpada podrazumijeva kompleks hemijskih reakcija koje se odigravaju između različitih supstanci, a to se na kraju odražava na kvalitet ocjednih voda, rastvorljivost, pH rastvora.

Biološka degradacija otpada na sanitarnoj kadi jeste transformacija odložene materije pod dejstvom mikroorganizama i bakterija. Bakterije kontrolišu brzinu hemijske i fizičke degradacije utičući na promjene pH vrijednosti i redox potencijala.

Komunalni otpad se svakodnevno donosi na sanitarnu kadu-deponiju „Možura“ direktno iz opština sa primorja (Bar, Kotor, Budva, Tivat, Herceg-Novi, opštine sa sjevera (Berane) ili neke druge opštine i iz preduzeća Hemosan koje se nalazi u Baru. Na sanitarnoj kadi se vrši razastiranje novog K.O.-a dozerom, a zatim se vrši obavezno kompaktiranje otpada posebnom mašinom kompaktorom, prelazeći preko novog otpada minimum 6 puta. Prilikom razastiranja otpada i kompaktiranja komunalni otpad ima najviše kontakta sa vazduhom, koji sadrži koncentraciju kiseonika manju od 21%.

Uspješnost procesa razgradnje otpada zavisi od sastava, stepena vlažnosti, distribucije mikroorganizama, pH vrijednosti, temperature, kvaliteta materijala koji se koristi za prekrivanje komunalnog otpada, stepena infiltracije vode od atmosferskih padavina i prskanja komunalnog otpada tehničkom vodom. U procesu biorazgradnje je značajan uticaj godišnjeg doba na brzinu tog procesa, jer su proljeće, jesen i zima godišnja doba sa dovoljno kišovitih dana, što ne zahtijeva dodatno prskanje otpada vodom.

Ljeti je komunalni otpad suv, pa se u tim uslovima obavezno vrši svakodnevno prskanje-zalivanje komunalnog otpada, zbog normalnog rada bakterija i kvalitetnog kompaktiranja deponovanog komunalnog otpada.

Uzimajući u obzir da je u proces biorazgradnje uključeno više faktora, vrijeme sakupljanja gasa na sanitarnim kadama od početka deponovanja do prestanka sakupljanja iznosi minimum

15 godina, a maksimum 30 godina. Na osnovu ispitivanja raznih naučnika zaključeno je da proces proizvodnje deponijskog gasa prestaje nakon 30 godina.

Biološka razgradnja komunalnog otpada odigrava u tri faze:

1. Hidroliza
2. Zakiseljavanje
3. Formiranjem metana

Kao proizvod prethodno navedenog procesa razgradnje javlja se deponijski gas [28].

Prva faza biorazgradnje je aerobna - odigrava se na početku odlaganja komunalnog otpada i naziva se hidroliza. Ovaj proces uključuje razgradnju složenih organskih polimernih materijala kao što su: ugljeni hidrati, proteini i lipidi u manje složena jedinjenja rastvorljiva u vodi, (šećeri, aminokiseline i dugolančane masne kiseline) enzimima koje proizvode fermentacijske bakterije. Ovako nastala jednostavna organska jedinjenja podliježu apsorpciji i razgradnji od strane različitih anaerobnih bakterija čija sposobnost preživljavanja u prisustvu ili odsustvu kiseonika u acidogenom koraku, doprinosi proizvodnji kratkolančanih isparljivih masnih kiselina, koje se u reakciji sa alkoholima pretvaraju u acetat, vodonik i ugljenik (IV)-oksid [29]. Ova faza uključuje hidrolizu polisaharida u monosaharide, masti u glicerin i masnih kiselina i proteina u aminokiseline. Nakon toga se oslobađa određena količina toplotne energije, koja polako zagrijava deponovani komunalni otpad. Rezultat aerobne faze razgradnje komunalnog otpada je proizvodnja velike količine azota.

Druga faza biorazgradnje je anaerobna i naziva se acidogeneza. Ona nastaje, kada se vidljivo smanji sadržaj kiseonika, poslije kompaktiranja i prekrivanja komunalnog otpada slojem mješavine šljunak-zemlja debljine 30-40 cm, na taj način se stvaraju uslovi za smanjenje sadržaja kiseonika i djelovanje bakterija u anaerobnim uslovima.

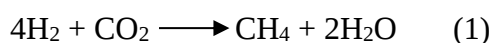
U tim uslovima određene vrste bakterija se razmnožavaju i počinju da razgrađuju organski dio komunalnog otpada, vršeći transformaciju organskih kiselina u sirćetnu kiselinu, a derivate kiselina u jednostavnije vrste jedinjenja uz stvaranje veće količine ugljenik (IV)-oksida, manje količine amonijaka, organskih kiselina, vode i veoma male količine vodonika [30]. U ovoj fazi veoma značajan proces biorazgradnje je fermentacija, koja kao rezultat daje ugljenik (IV)-oksid. Istovremeno se uz pomoć bakterija vrši razgradnja jednog dijela organskih jedinjenja, poput slabih organskih kiselina kao što su sirćetna (CH_3COOH) i buterna kiselina ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$) kao i oslobađanje određene količine toplotne energije, koja utiče na zagrijavanje tijela deponije-kade. Proces acidogeneze je važan zbog povećanja koncentracije vodonika onom vrstom bakterija koje proizvode prethodno navedene kiseline [31]. Proizvodnja ugljenik (IV)-oksida i organskih kiselina utiču na promjenu pH vrijednosti procjednih-ocjednih voda koje nastaju u sanitarnoj kadi.

Prije formiranja treće faze važno je napomenuti da veliki značaj ima acetogeneza - proces pomoću kojeg se formira acetat iz CO₂ i izvora elektrona (vodonika, ugljenik-monoksida) u anaerobnim bakterijama. Acetogeneza preko acetogenih bakterija utiče na procese metanogeneze da bi na taj način došlo do formiranja metana kao nusproizvoda u nekiseoničnim uslovima u cilju očuvanja energije mikrobama odnosno metanogenima što je veoma značajno za posljednju fazu razgradnje. U ovom predprocesu acetogene bakterije pretvaraju etanol i ostale alkohole sa 2 ili više ugljenikovih atoma u acetate. Kao finalni proizvodi izdvajaju se vodonik i ugljenik (IV)-oksid. Redukcija vodonika i ugljenik (IV)-oksida vrši se homoacetogenim mikroorganizmima smanjujući time akumulaciju vodonika.

Iz tog razloga parcijalni pritisak vodonika je neophodno održavati niskim kako bi acetogene bakterije mogle da nastave svoju reakciju pretvaranja u acetate jer im je pri visokim koncentracijama vodonika to onemogućeno [31].

Treća faza biorazgradnje organskog dijela komunalnog otpada je metanogeno anaerobno razlaganje. Ovu fazu karakterišu dva stepena, prvi nestabilni, a drugi stabilni. Prvi stepen karakteriše potpuno odsustvo kiseonika. Redukcija ugljenik (IV)-oksida i oksidacija vodonika vrše se uz pomoć metanogenih bakterija da bi došlo do formiranja metana, a s druge strane korišćenjem acetata pod dejstvom acetoklastičnih metanogena dolazi do formiranja metana. U završnoj fazi kao finalni proizvodi dobijaju se metan i ugljenik (IV)-oksid i manje količine vodonik-sulfida, koje metanogene bakterije transformišu u deponijski gas uz oslobađanje toplotne energije [31]. Rezultat oslobađanja toplotne energije je zagrijavanje tijela sanitarne kade u kojoj je deponovan otpad.

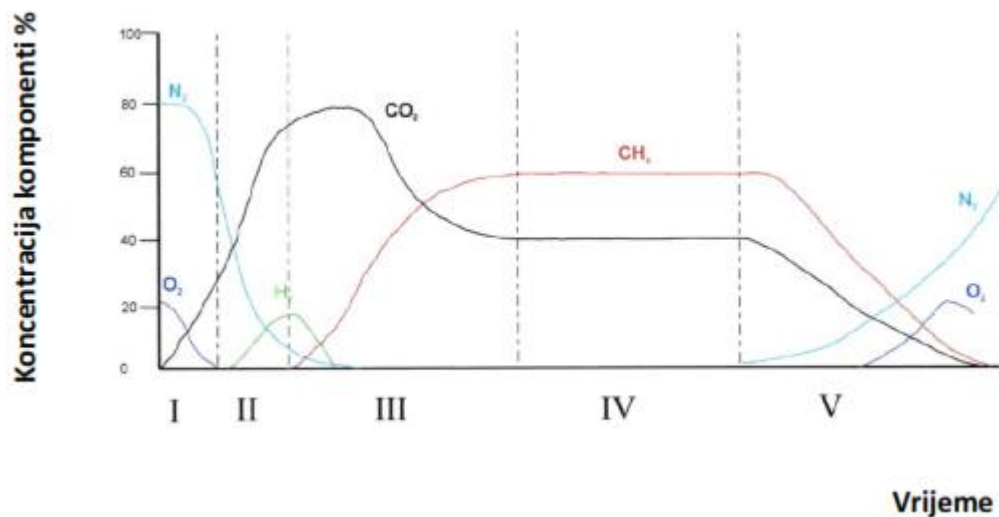
Reakcije koje se odigravaju u ovoj fazi:



Metanogenska anaerobna faza je najbitnija u procesu proizvodnje deponijskog gasa u sanitarnim kadama. Početak proizvodnje metana u sanitarnim kadama počinje 8-10 mjeseci od početka deponovanja komunalnog otpada u njima.

Sadržaj deponijskog gasa u metanogenskoj fazi stalno raste do koncentracije 50-54%, a sadržaj ugljenik (IV)-oksida je između 35-40%. Sadržaj kiseonika, azota, vodonik-sulfida i isparljivih materija je niži.

Na slici 6 su date biološke faze razgradnje komunalnog otpada.



Slika 6. Biološke faze razgradnje komunalnog otpada

Faza I: Aerobna razgradnja uz prisustvo O_2 / Trajanje: 7 - 30 dana

Faza II: Anaerobna - acidogenska nemetanogenska / Trajanje: 1 - 6 mjeseci

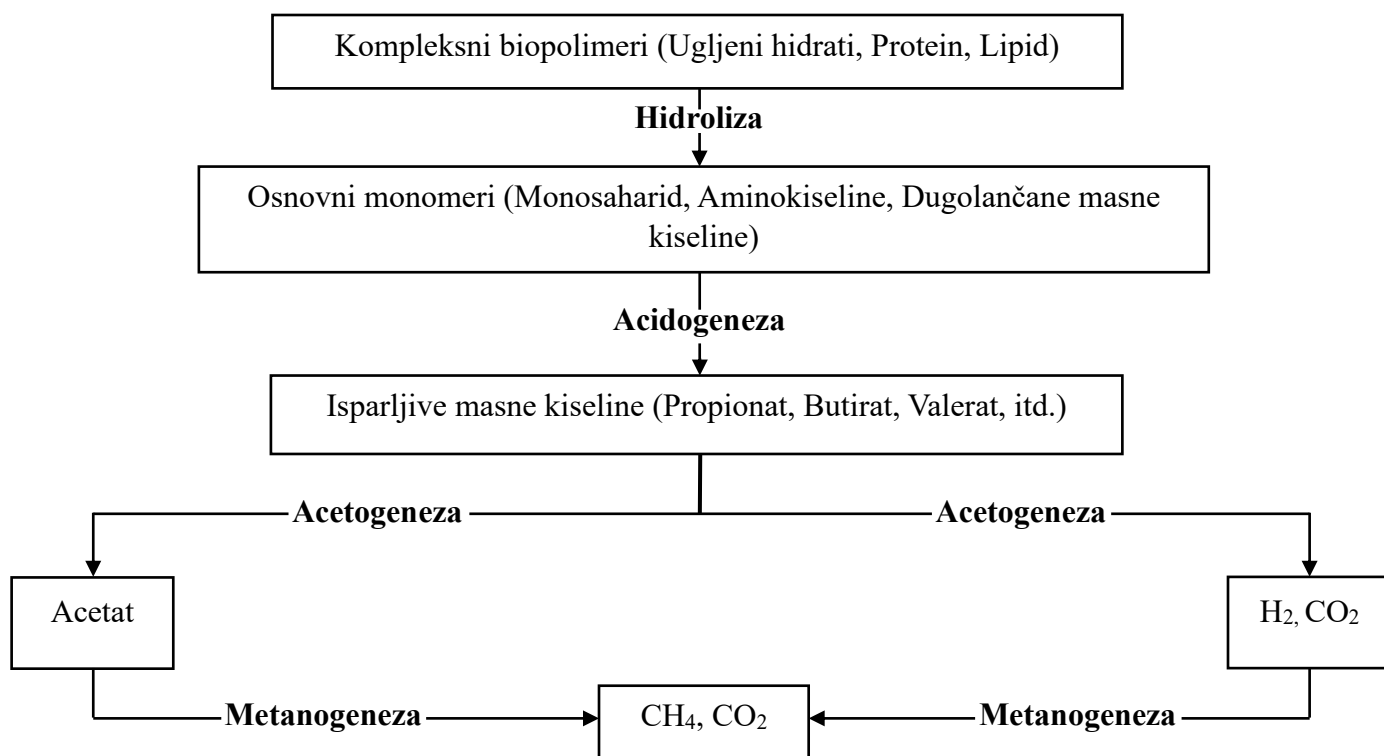
Faza III: Anaerobna nestabilna metanogenska / Trajanje: 3 - 36 mjeseci

Faza IV: Stabilna metanogenska / Trajanje: 10 - 12 godina

Faza V: Metanogenska sa smanjenjem % CH_4 ispod 50% / Trajanje: 10 - 40 godina

Šema procesa nastajanja gasa kao i njihovi produkti prikazani su na slici 7.

Na šemi se može uočiti značaj određenih vrsta bakterija u svakom procesu bez kojih funkcionisanje procesa i stvaranje prethodno navedenih proizvoda ne bi bili mogući. Svaki proizvod u procesu igra značajnu ulogu za formiranje narednih procesa biorazgradnje kao što je prikazano na slici 7 [32].



Slika 7. Šema procesa nastajanja deponijskog gasa [32]

Na bazi teorijskih i praktičnih rezultata utvrđeno je da poslije 36 mjeseci od trenutka zbrinjavanja komunalnog otpada na deponiju se očekuje proizvodnja deponijskog gasa prosječnog sastava datog u tabeli 2.

Tabela 2. Prosječan sastav deponijskog gasa i njegova gustoća u odnosu na vazduh

Gas	% gasova u deponijskom biogas	Gustoća u odnosu na vazduh
Metan (CH ₄)	50 %	0,56
CO ₂	35 %	1,53
N ₂	11 %	0,97
O ₂	3%	1,11
Ostali gasovi	1%	

2.6.1. Parametri anaerobne digestije u procesu proizvodnje deponijskog gasa

Najvažniji parametri pri procesu nastajanja deponijskog gasa u fazama anaerobne digestije su [32]:

1. Temperatura
2. Stopa organskog opterećenja (OLR)
3. Hidraulično retenciono vrijeme (HRT)
4. Odnos C/N (ugljenika i azota)
5. pH vrijednost

2.6.1.1. Temperatura

Postoje četiri temperaturna režima anaerobne digestije: psihrofilni, mezofilni, termofilni i ekstremofilni koji se definišu u temperaturnom intervalu od 4-25 °C, 30-40 °C, 50-60 °C i > 65 °C [33, 34]. Iako se anaerobna digestija može odvijati i na temperaturama nižim od 20 °C, ispod 10 °C, razgradnja je tri puta sporija od normalnog mezofilnog procesa, pri čemu metanogeneza postaje korak koji ograničava brzinu [35, 36]. U opsegu temperatura između mezofilnog i termofilnog režima, anaerobna digestija je najefikasnija, što rezultuje efikasnom hidrolizom i visokim prinosima biogasa.

2.6.1.2. Stopa organskog opterećenja (OLR)

OLR predstavlja količinu organskog materijala koja se dnevno unosi po jedinici zapremine digestora. U praksi se obično daje prednost visokom radnom OLR-u, jer to omogućuje obogaćene bakterijske vrste, smanjene veličine reaktora, smanjene zahtjeve za grijanjem i smanjene investicijske troškove [37].

2.6.1.3. HRT (hidraulično retenciono vrijeme)

Važan parametar uticaja na dizajn i optimizaciju anaerobne digestije je i vrijeme zadržavanja. Odnosi se na hidraulično vrijeme zadržavanja (HRT) tj. vrijeme zadržavanja tečne faze i vrijeme zadržavanja u čvrstom stanju (SRT) koje označava zadržavanje mikrobne kulture u digestoru. Izbor HRT-a zavisi od sastava sirovine i temperatura [33]. Supstrati bogati skrobom i šećerom zahtijevaju kraće retenciono vrijeme, dok su duža retenciona vremena potrebna za supstrate bogate celulozom. Visoka temperatura reaktora povećava brzinu razgradnje i posljedično snižava HRT, zbog čega većina termofilnih reaktora ima niži HRT od mezofilnih reaktora.

2.6.1.4. Odnos ugljenika i azota (C/N)

Odnos ugljenika i azota (C/N) jedan je od značajnijih parametara anaerobne digestije i često korišćen s aspekta hranljivosti materija [32, 38]. Odnos C/N u granicama od 20 do 30 preporučuje se za anaerobnu digestiju. Prenizak odnos C/N uzrokuje visoku količinu amonijaka koji postaje toksičan za metanogene bakterije, što rezultuje niskom proizvodnjom metana [39]. Vrlo visok odnos C/N pojačava rast populacije metanogena što uzrokuje malo ili nikakvo djelovanje na preostali ugljenik u supstratu, što takođe dovodi do niske proizvodnje metana [32, 49].

2.6.1.5. pH vrijednost

Funkcionisanje anaerobnih mikroorganizama i efikasnost procesa anaerobne digestije zavisi od pH vrijednosti. Iako se anaerobna digestija može postići unutar pH vrijednosti od 5,5 i 8,5 [40] metanogene bakterije su vrlo osjetljive na promjenu pH vrijednosti i zahtijevaju optimalnu pH vrijednost blizu 7 [33]. pH ispod 6,3 ili iznad 7,8 može nepovoljno uticati na metanogenezu [33]. Međutim, za razliku od metanogeneze, hidroliza i acidogeneza su efikasne pri pH između 5,5 i 6,5 [41]. Generalno, ekstremno kiseli uslovi (pH ~3 ili manje) ili ekstremno alkalni (pH~12 ili više) mogu inhibirati acidogenezu [42] i ograničiti brzinu hidrolize.

2.7. Sastav i karakteristike deponijskog gasa

Deponijski gas nastaje pri aerobnoj razgradnji na deponiji stvaranjem nadpritiska čijim se dejstvom ispušta u okolinu.

Najčešće se koristi za proizvodnju električne energije i spada u obnovljive izvore energije, a može se koristiti i kao gorivo [43]. Veoma je opasan po okolinu, a to se može zaključiti na osnovu njegovog sastava.

Metan jedan je od sastojaka deponijskog gasa koji može biti eksplozivan, goriv je i utiče na kvalitet deponijskog gasa. Pored toga jako je štetan pogotovo za ozonski omotač [43].

Iako **ugljenik (IV)-oksid** predstavlja jedan od nesagorivih sastojaka nije poželjno njegovo smanjivanje ispod 15%.

Voda ili vodena para takođe je jedan od nesagorivih sastojaka deponijskog gasa. Zbog boljeg kvaliteta gasa potrebno je smanjiti udio vlage [43].

Kiseonik je jedan od sastojaka gasa koji je potreban u minimalnim količinama ispod 0,5% zbog uticaja na proces rada anaerobnih bakterija.

Vodonik-sulfid - prisustvo sastojka vodonik-sulfida potrebno je svesti na količinu od 1% zbog stvaranja sulfidne i sulfatne kiseline koje svojim dejstvom mogu negativno uticati na opremu za proizvodnju [43].

Usljed negativnog uticaja sastojaka deponijskog gasa na životnu sredinu neophodno je usmjeravanje ka njegovom sagorijevanju i sakupljanju čime se pospješuje smanjenje otpadnih procjednih voda i njihovo zagađenje, a podstiče korišćenje proizvodnje električne energije [43].

Karakteristike prethodno navedenog sastava deponijskog gasa su: gustina i viskozitet, toplotna vrijednost, prisustvo vodene pare, vodonika i ugljenik (IV)-oksida [44].

- **Gustina i viskozitet**

Gustina i viskozitet kao najznačajnije karakteristike zavise od odnosa komponenata deponijskog gasa [44].

- **Toplotna vrijednost**

Realna toplotna vrijednost deponijskog gasa zavisi od starosti otpada, vrste pokrivača deponije i drugih faktora [44].

- **Vodena para**

Stvarni sadržaj vodene pare u deponijskom gasu zavisi prvenstveno od temperature i pritiska na deponiji [44].

- **Prisustvo vodonika (H_2) i ugljenik (IV)-oksida (CO_2)**

Prisustvo vodonika značajno je zbog stvaranja metana dok je ugljenik (IV)-oksid značajan zbog uticaja na raspone zapreminskih udjela vodonika [44].

2.8. Faktori koji utiču na proizvodnju deponijskog gasa

Temperatura, sadržaj vlage, količina kiseonika, sastav i starosti otpada su najvažniji parametri procesa nastanka deponijskog gasa i njegove količine na deponijama [45, 46]. Hranljive materije koje sadrži organski otpad pospješuju razvoj bakterija i proizvodnju deponijskog gasa. Što se više otpada odloži na deponiju to će proizvodnja deponijskog gasa biti sve veća [45, 46].

Na maksimalnu proizvodnju deponijskog gasa može uticati sadržaj vlage zato što se uz pomoć 40 % vlage hranljive materije i bakterije prenose širom odlagališta i u njegovu unutrašnjost.

Proizvodnja deponijskog gasa zavisi i od uticaja visoke ili niže temperature [45, 46].

Ako su temperature veće aktivnost bakterija će rasti i podstaći proizvodnju deponijskog gasa, a ako su temperature niže proces je suprotan.

Starost otpada jedan je od bitnijih faktora koji može uticati na proces proizvodnje i količinu deponijskog gasa [45, 46]. Što je duže otpad deponovan to će deponijski gas biti manje generisan, a maksimalna dužina generisanja deponijskog gasa je od 5 do 7 godina nakon deponovanja otpada.

Količina kiseonika znatno utiče na proizvodnju deponijskog gasa u zavisnosti od faze u kojoj se deponijski gas proizvodi [45, 46]. U prvoj fazi razgradnja otpada teče uz pomoć aerobnih bakterija, a dužina njenog trajanja zavisi od količine kiseonika na deponiji. Veća količina kiseonika doprinosi dužoj razgradnji otpada pa samim tim bakterije duže žive proizvodeći ugljenik (IV)-oksid i vodu, a razlog ovakvog procesa je slabo sabijanje otpada [45, 46]. Kada se aerobne bakterije zamijene anaerobnim bakterijama dolazi do ranije proizvodnje metana, nakon čega slijedi potrošnja kiseonika u trećoj fazi. Preostali kiseonik koji je neistrošen od strane anaerobnih metanogenih bakterija utiče na sporiju produkciju metana, a razlog za to je jako sabijanje otpada [45, 46].

2.9. Tehnologije proizvodnje električne energije iz deponijskog gasa

Sve veća upotreba fosilnih goriva i negativni uticaji na životnu sredinu uzrokovani emisijom gasova sa efektom staklene bašte i klimatskim promjenama podstiču sve veći interes za biogas kao alternativni izvor energije [47]. U prilog ovoj činjenici govori podatak da je u svijetu u posljednjih 10 godina konstatovan porast od ~ 90% u industriji biogasa (120 GW u 2019. godini u odnosu na 65 GW u 2010. godini) [48].

Za konverziju deponijskog gasa u električnu energiju najčešće se koriste **motori sa dva goriva, gasna turbina i gasni motor**.

Gasni motor je u odnosu na gasnu turbinu pogodniji za primjenu jer se gasna turbina ne može primjenjivati za gasna goriva zbog malih kapaciteta.

U udaljenim područjima gdje nije često napajanje ili je nedostupno primjenjuje se motor sa dva goriva [49].

Proces produkcije goriva u **motorima sa unutrašnjim sagorijevanjem** je različit u odnosu na ostale tehnologije.

Naime motori sa unutrašnjim sagorijevanjem konvertuju gas koji se koristi kao gorivo prvo u mehaničku energiju, a nakon toga dolazi do napajanja električnog generatora sa električnom energijom. S tehnološkog aspekta gledano korišćenje gasa kao goriva primjenljivo je kod svih tipova pomenutih motora pri čemu se najviše izdvajaju Otto motor, dizel motori, motori za miješanje [49].

Motori za miješanje (Stirlingovi motori) se zbog niske efikasnosti i visokih kapitalnih troškova znatno rjeđe koriste u procesima pretvaranja deponijskog gasa u električnu energiju.

Razlika između ove dvije vrste motora jeste različit način konvertovanja električne energije [49].

Stirling motori posjeduju visoku fleksibilnost za napajanje više vrsta goriva, a karakterišu ga ograničenja koja su povezana sa izmjenjivačem toplote pri čemu dolazi do smanjenja efikasnosti kod motora [47].

U motorima za miješanje spolja dolazi do sagorijevanja gasa dok se u međuvremenu motor za miješanje zagrijava preko izmjenjivača za toplotu.

Gas u motoru se širi čime pokreće mehanizam motora i tako dolazi do transformacije u električnu energiju [49].

Za **dizel motore** potrebno je dvostruko gorivo da bi bio u fazi funkcionisanja sa biogasom [49].

Dizel motori mogu da se pretvaraju u pilot motore sa ubrizgavanjem, što ga izdvaja od ostalih tehnologija i sistema samo što se za razliku od Otto motora miješanje vazduha i goriva vrši odvojeno [47].

Otto motori su karakteristični isključivo po tome što se za njihov način rada i funkcionisanje koriste gasovita goriva ili benzin pri čemu se vrši miješanje vazduha i goriva, a potom dolazi do kompresije, a mala količina benzina je potrebna za pokretanje motora. Ovi motori se najviše koriste kod velikih elektrana pretežno u Njemačkoj [49].

Gasne turbine se koriste kao motori na biogasu što se najčešće primjenjuje u SAD-u. Male su veličine i zadovoljavaju kriterijume emisija izduvnih gasova, što je bitna karakteristika za procese na deponiji i gasove u digestoru. Ove turbine kao tehnologije su veoma skupe i predstavljaju izazov za projektovanje [49]. Gasne turbine pretežno svoju upotrebu nalaze u većim energetske postrojenjima dok mikroturbine nude veću fleksibilnost. Sastav mikroturbina čine kompresor, ložište i turbina [47].

U tabeli 3 prikazane su sve prednosti i nedostaci prethodno navedenih tehnologija. Visoka kapitalna ulaganja i troškovi samo su neki od nedostataka navedenih tehnologija, a prednosti su jednostavno korišćenje i ugradnja naročito kod infracrvenih grijača i visoka efikasnost kod mikroturbina, turbina i motora sa unutrašnjim sagorijevanjem.

Tabela 3. Tehnologije i sistemi za pretvaranje deponijskog gasa u električnu energiju [1, 50]

Tehnologije	Prednosti	Nedostaci
Kotao, sušnica i grijač	Maksimalno korišćenje povraćenog gasa, ograničenje kondenzata i filtracije i miješanje sa ostalim gasovima.	Potrebna adaptacija opreme i poboljšanje kvaliteta gasa.
Infracrveni grijač	Jeftin je, ugradnja mu je jednostavna, funkcionisanje i kontrola. Zahtijeva uklanjanje kondenzata i filtracije.	Sezonsko korišćenje može ograničiti iskorišćenje LFG-a.
Isparavanje procjednih voda	Kad jer tretman procjednih voda skup onda predstavljaju najpogodniju tehnologiju.	Visoka kapitalna ulaganja skuplja u odnosu na tehnologije procjednih voda i primjenjuje se najčešće kod velikih deponija.
Motori sa unutrašnjim sagorijevanjem	Visoka efikasnost u odnosu na turbine i mikroturbine. Cijene su veoma povoljne po kW instalisanog uređaja.	Visoki troškovi održavanja i visoke emisije u vazduhu.
Gasna turbina	Ekonomična, povraćanjem toplote povećava se efikasnost, otporna na koroziju, niske emisije azotovih oksida.	Visoka opterećenost parazitima, kapacitet i efikasnost zavise pretežno od temperature, niska električna efikasnost, zaštita od buke.
Mikroturbina	Neophodan niži protok gasa, niska emisija oksida azota, jednostavna konstrukcija, zanemarljive emisije u vazduhu, čistije sagorijevanje u odnosu na motore, mogućnost dobijanja toplote i tople vode.	Zahtijeva predtretman LFG-a, niska efikasnost, neophodnost uklanjanja vlage, siloksana.
Stirlingov motor	Niske emisije i tihe vibracije, unutrašnji dijelovi nisu u dodiru sa zagađujućim materijama iz LFG-a, sagorijevanje na visokim temperaturama može da proizvede kvalitetnu struju.	Velikog gabarita, nije dostupan za komercijalnu upotrebu, nije provjerena tehnologija, visoki kapitalni troškovi.

Proizvodnja biometana	Membranska separacija, jednostavna konstrukcija i rad, može se prodavati kao prirodan gas.	Skupa tehnologija, visoki gubici metana, kratak životni vijek metana, visoka potrošnja energije.
------------------------------	--	--

2.9.1. Karakteristike koje utiču na korišćenje deponijskog gasa

Korišćenje deponijskog gasa putem direktne upotrebe najčešće je primjenljivo kada je prema tržištu i propisima ograničena prodaja električne energije. Prednost metode direktne upotrebe fokusira se na maksimalno iskorišćenje deponijskog gasa, a takođe omogućava mješanje sa drugom vrstom goriva [51, 52].

Karakteristike koje utiču na direktnu upotrebu energetskog projekta za iskorišćenje deponijskog gasa su:

- **Energetske potrebe krajnjih korisnika u pogledu kvaliteta i količine deponijskog gasa**

Sadržaj metana i količina deponijskog gasa koja je raspoloživa mora biti razmotrena u skladu sa potrebama postrojenja za toplotnom energijom i kapacitetima toplotnih izvora. Kod korisnika sa velikim sezonskim ili dnevnim fluktuacijama nije poželjna potražnja za gorivom zbog nemogućnosti skladištenja deponijskog gasa za potrošnju na postrojenju, a i zbog njegovog konstantnog protoka pri proizvodnji na lokaciji. Pored toga mora se pristupiti analizama ekonomske izvodljivosti kvaliteta i vrstama tretmana deponijskog gasa koji zahtijeva krajnji korisnik [51, 52].

- **Zahtjevi naknadne ugradnje pri smještaju deponijskog gasa**

Krajnji korisnici trebaju obratiti posebnu pažnju kada je u pitanju projektovanje opreme koja deponijski gas koristi kao rezervu sa nekom drugom vrstom goriva ili vrši njegovo sagorijevanje sa drugim vrstama goriva [51, 52]. Promjena oblikovanja pogona goriva se obavlja na način tako što se dodaju djelovi poput gorionika i sistema za smještaj izabranog izvora goriva [51, 52].

- **Odabir lokacije za krajnjeg korisnika**

Na dužinu i lokaciju gasovoda za tečni gas veliki uticaj ima lokacija krajnjeg korisnika. U cilju povrata investicija, deponija od krajnjeg korisnika mora biti udaljena manje od 10 ili 15 kilometara [51, 52].

- **Razmatranje troškova**

Razmatranje troškova koji su usko povezani sa tretmanom gasa, obnavljanjem opreme treba uzeti u obzir pri analizi postupaka korišćenja deponijskog gasa. Ekonomija projekta energetskog iskorišćenja deponijskog gasa zavisi od pristupačnosti i blizine krajnjeg korisnika određenoj lokaciji. Naime, što je krajnji korisnik bliži deponiji to se ekonomija prethodno navedenog projekta više poboljšava [51, 52].

Karakteristike koje utiču na određivanje prikladnosti upotrebe deponijskog gasa na licu mjesta su:

- **Zagrijavanje prostora uz pomoć infracrvenog grijača ili zagrijavanje na neki drugi način**

Kod infracrvenih grijača koji se koriste za grijanje prostorija kao što su škole i drugi tipovi zgrada potrebna je mala zapremina deponijskog gasa za njihovo funkcionisanje. Međutim, ova vrsta tehnologije iziskuje velike troškove u nedostatku sistema za sakupljanje i spaljivanje deponijskog gasa [51, 52].

- **Razmatranje sistema za isparavanje procjednih voda**

Postoji ekonomska izvodljivost za sisteme isparavanja procjednih voda čak i pored visokih troškova alternativnih metoda za procjedne vode [51, 52].

2.9.2. Karakteristike koje utiču na mogućnost proizvodnje električne energije iz deponijskog gasa

Potrebe za transformacijom i modelovanjem opreme za direktnu upotrebu deponijskog gasa, kao i geografska ograničenja, mogu se prevazići korišćenjem sistema za proizvodnju električne energije koji koristi deponijski gas. Kao najjeftinija i najefikasnija tehnologija za proizvodnju električne energije u odnosu na sve ostale navode se motori sa unutrašnjim sagorijevanjem [51, 52].

Karakteristike koje utiču na mogućnost proizvodnje električne energije iz deponijskog gasa su:

- **Efikasnost električnog pretvaranja**

Jedan od najvažnijih faktora koji uzima u razmatranje pretvaranje potrebnih djelova energetske vrijednosti deponijskog gasa u električnu snagu je efikasnost električne konverzije ili pretvaranje [51, 52]. Od odabrane tehnologije zavisi kolika će biti efikasnost električne konverzije gdje se kao primjer mogu navesti motori sa unutrašnjim sagorijevanjem koji imaju veću efikasnost od gasnih turbina [51, 52].

- **Potencijal proizvodnje električne energije**

Količina električne energije uveliko zavisi od sigurnosti opreme koja se koristi za proizvodnju električne energije i snabdijevanja goriva za postrojenja energetske projekata deponijskog gasa [51, 52].

- **Održavanje i popravka postrojenja energetske projekata deponijskog gasa**

Procjena rezervnih dijelova, kao i potreba i količina tih dijelova, vrši se na osnovu dostupnosti u određenoj zemlji kao i vremena koje je potrebno za dostavljanje tih dijelova koji su neophodni [51, 52]. Redovno planirano održavanje i pravilno rukovanje sa opremom postrojenja energetske projekata deponijskog gasa doprinosi smanjenju habanja tih rezervnih dijelova [51, 52].

- **Sposobnost reagovanja na promjene u količini deponijskog gasa tokom vremena**

Priroda modela motora sa unutrašnjim sagorijevanjem i gasne turbine doprinose prilagodljivosti za dodatna povećanja kapaciteta pri većoj proizvodnji [51, 52]. Zbog nižih kapitalnih troškova u promjenljivim povećanim fazama se mogu više koristiti mikroturbine i motori sa unutrašnjim sagorijevanjem u odnosu na gasne turbine [51, 52].

- **Međusobno povezivanje električne mreže na osnovu dostupnosti tačke**

Troškovi izgradnje novih infrastrukturnih objekata nisu dozvoljeni za dostavljanje električne energije pa se zbog toga energetske projekti deponijskog gasa fokusiraju na infrastrukture koje postoje za dostavljanje energije na tržište. Raspoloživost električnih trafostanica i vodova koji se nalaze na obližnjoj lokaciji mora biti ispitana od strane odgovornog lica ili projektanta [51, 52].

- **Razmatranje troškova**

Troškovi koji se razmatraju odnose se na troškove za opreme koje su neophodne za tretman gasa i proizvodnju električne energije, troškove koji su povezani sa popravkama, troškove za materijale koji služe za obavljanje rada sistema kao i kapitalne troškove gdje se kao primjer mogu navesti motori sa unutrašnjim sagorijevanjem čiji su kapitalni troškovi niski, ali su zato veoma visoki troškovi koji se tiču njihovog održavanja [51, 52].

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Opis deponije „Možura“

Deponija „Možura“ ukupne površine 22,5 ha, nalazi se između opština Bar i Ulcinj kao što je i prikazano na slici 8. Ova međuopštinska sanitarna deponija je projektovana sa ciljem pravilnog odlaganja komunalnog otpada proizvedenog u opštinama Bar i Ulcinj. Zbog nedostatka lokacije za deponovanje komunalnog otpada za primorske opštine Budva, Tivat, Kotor i Herceg-Novi, na sanitarnoj deponiji „Možura“ se posljednjih godina odlaže komunalni otpad i iz navedenih opština.



Slika 8. Sanitarna deponija „Možura“

Sanitarna deponija „Možura“ posjeduje 4 samostalne kade (kasete) odvojenog tipa od čega se i tijelo deponije sastoji. Projektovana visina deponije iznosi 25 m, a kapacitet deponije iznosi 1.056.036,21 m³. Dimenzije tijela deponije su 305 x 165 m. Postoje 4 faze rada deponije „Možura“ pri čemu se kod svake faze vrši punjenje otpadom do 6 m i nakon toga prekrivanje inertnim materijalom.

Sanitarna deponija „Možura“ sastoji se od tijela deponije, sistema za tretman deponijskog gasa, bazena za prihvrat ocjednih voda, postrojenja za tretman i ispuštanje ocjednih voda, spoljašnjeg drenaznog sistema za sakupljanje atmosferske vode i vode koja služi za pranje točkova, opreme za mjerenje otpada, prostora za kontrolu i prostora za skladištenje otpada.

Ukupni kapacitet sanitarne deponije „Možura“ obuhvata četiri faze:

1. faza s kapacitetom od 394.606,70 m³
2. faza s kapacitetom od 293.601,01 m³
3. faza s kapacitetom od 223.142,66 m³
4. faza s kapacitetom od 144.685,84 m³.

3.2. Način sakupljanja deponijskog gasa

Anaerobnim razlaganjem odloženog komunalnog otpada na deponiji nastaje biogas. Negativni efekti deponijskog gasa, usljed visokog sadržaja metana i ugljenik (IV)-oksida, na životnu sredinu su poznati.

U cilju smanjenja emisije deponijskog gasa u atmosferu, sprječavanja eksplozije, odstranjivanja neprijatnih mirisa, a prevashodno u cilju iskorišćavanja njegovog energetskog potencijala neophodno je razviti sistem sakupljanja deponijskog gasa. Sakupljanje deponijskog gasa vrši se na dva načina, a to su pasivni i aktivni sistem. Na sanitarnoj deponiji „Možura“ primjenjuje se pasivni sistem sakupljanja deponijskog gasa uz pomoć biotrnova (bunara) postavljenih po cijeloj površini deponije, a koji se zatim spaljuje na eko baklji kapaciteta 600 Nm³/h (slika 9).



Slika 9. Eko baklja na deponiji „Možura“

U slučaju intenzivne proizvodnje deponijskog gasa njegovo sakupljanje se postiže kontrolisanim usmjeravanjem do sabirnog cjevovoda pomoću rovova ispunjenih šljunkom. Lošije funkcionisanje ovakvog načina sakupljanja, kada je proizvodnja deponijskog gasa manja, prevaziđeno je ugradnjom vakuum uređaja na sabirnom cjevovodu prije eko baklje za spaljivanje.

Biotrнови koji služe za odvođenje deponijskog gasa sa sanitarnih kada i njegovo sakupljanje sastoje se od sledećih segmenata:

1. **Temelj biotrna** koji je dimenzija Ø 1,2 m donjeg sloja (betonske stope) i 0,3 m visine, dok je gornji sloj dimenzija Ø 0,8 m. Na dnu biotrna postavljene su zaštitne rešetke i plastične perforirane (degazacione) cijevi.

2. **Plastična perforirana (degazaciona cijev)** - polietilenska cijev je prečnika 160 mm koja ima ulogu ispuštanja gasa u životnu sredinu.

Od visine sloja otpada i inertnog materijala zavisi kako će se i koliko mijenjati dužina cijevi.

3. **Zaštitna rešetka** - prečnika 600 mm sastavljena od pletene žice i betonskog gvožđa i dužine koja zavisi od visine sloja otpada i inertnog materijala, postavlja se oko perforirane cijevi. Njena uloga je da zaštiti biotrn od mogućih oštećenja.

4. **Odušna lula** - u obliku plastičnog koljena na gornjem dijelu biotrna sa otvorom pod uglom za ispuštanje deponijskog gasa ima ulogu spriječavanja ulaska atmosferskih padavina.

Proces formiranja biotrna prati popunjavanje deponije. Neophodno je da biotrn ostane iznad površine posljednjeg sloja zemlje najmanje 0,2 m.

Nakon sakupljanja deponijskog gasa preko biotrnova vrši se njegovo transportovanje glavnim vodom koji je izrađen od HDPE do stanice za prikupljanje i pripremu gasa za spaljivanje.

Regulacija dotoka gasa u stanicu za sakupljanje vrši se pomoću ventila smještenog na glavnom vodu. Ventili pružaju mogućnost podešavanja protoka i pritiska i kućica ima otvor za provjetranje.

U stanici se vrše procesi odvajanja kondenzata i nečistoća iz deponijskog gasa i dalje se pomoću cijevne instalacije izrađene od čeličnih cijevi odvodi do eko baklje (gorionika) za njegovo spaljivanje. Za kontrolisano spaljivanje deponijskog gasa izvršena je instalacija baklje sa visokom efikasnošću spaljivanja i zatvorenom komorom. Opremanje gorionika sa nadzorom plamena preko UV fotoćelije i induktorskim sistemom za potpaljivanje smatra se neophodnim.

Dupla elektroda pri visokom naponu služi za uključivanje pilota.

Osnovni tok deponijskog gasa funkcioniše na osnovu prisustva pilota i aktivira se nakon potvrđivanja njegovog prisustva. U suprotnom dolazi do zatvaranja toka deponijskog gasa. Na pilot liniji nalaze se ventili on/off i odgovarajući blokatori plamena.

Toranj za spaljivanje deponijskog gasa predstavlja sastavni dio Ekstrakcije centrale (EC). Gorionik sa zatvorenom komorom služi za spaljivanje ekstrahovanog deponijskog gasa na kontrolisan način kako je i predviđeno. Opremljen je automatskim sistemom za kontrolu sagorijevanja preko UV fotoćelije. Uključivanje automatskog sistema vrši se pomoću duple elektrode pri naponu. Predviđen je sistem za utvrđivanje temperatura sagorijevanja u gorioniku. Ako temperatura sagorijevanja nadmaši standardnu temperaturu i za 10% u tom slučaju se mora aktivirati automatski sistem za odvod prema pomoćnom tornju.

Zračenje gorionika nije štetno ni za ljude ni za objekte na udaljenosti od 4 m od njegove ose. Električna instalacija ekstrakcije centrale konstruisana je na način da ne bude zapaljiva.

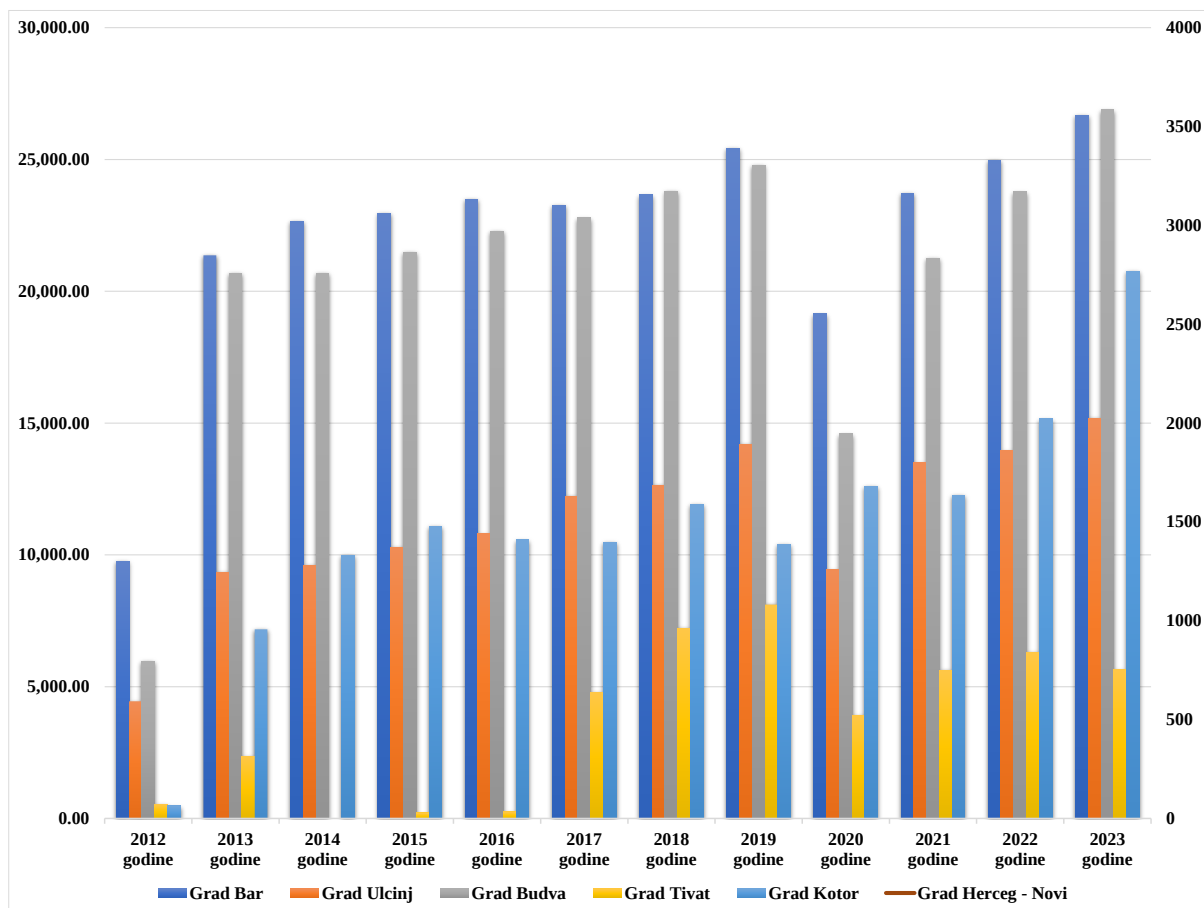
4. REZULTATI I DISKUSIJA

4.1. Procjena količina deponovanog otpada sa deponije „Možura“

Količine komunalnog otpada deponovane na deponiji „Možura“ od 2012. godine – 2023. godine prikazane su u tabeli 4.

Tabela 4. Količine otpada deponovane na deponiji „Možura“ za sve gradove u Crnoj Gori od 2012. godine do 2023. godine

Godine	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Gradovi Crne Gore												
Bar	9.757,71	21.364,81	22.658,66	22.946,07	23.477,34	23.254,30	23.656,88	25.417,74	19.142,54	23.717,94	24.961,88	26.670,90
Ulcinj	4.447,00	9.328,04	9.595,92	10.296,75	10.804,44	12.233,72	12.636,50	14.202,92	9.432,46	13.496,38	13.947,33	15.174,24
Budva	5.960,68	20.676,03	20.684,99	21.483,67	22.280,83	22.785,45	23.795,91	24.765,14	14.586,92	21.263,28	23.778,80	26.876,52
Tivat	543,54	2.366,84		214,34	254,3	4.796,26	7.203,68	8.112,84	3.901,18	5.611,14	6.305,18	5.645,72
Kotor	477,32	7.172,02	9.978,96	11.082,07	10.567,12	10.485,02	11.917,15	10.392,42	12.590,58	12.261,08	15.167,74	20.784,70
Berane	0,00	1.761,00	102,64									
Herceg - Novi									3.684,96			
Firma Hemosan	229,38	319,28	356,37	480,12	344,82	431,80	519,12	480,32	443,60	9.226,94	3.814,88	1.191,22
Neki drugi grad			0,20	15,44	7,86	7,30	12,74	85,20	111,11	38,32	19,52	127,60



Slika 10. Količine otpada deponovane na deponiji „Možura“ iz pojedinih gradova u Crnoj Gori od 2012. godine do 2023. godine

Na deponiji „Možura“ se odlaže komunalni otpad iz sljedećih opština: Bar, Ulcinj, Budva, Tivat, Kotor, Herceg-Novi i Berane.

Odloženi komunalni otpad na deponiji „Možura“ sakupljan je na mjesečnom i godišnjem nivou.

Podaci iz tabele 4 i sa slike 10 pokazuju da je od 2012. godine do 2023. godine na deponiji najveća količina otpada dovezena iz Bara i iz Budve, što je i očekivano, s obzirom da ovi gradovi imaju najveći broj stanovnika. Vrijednosti količine otpada iznose: 26.670,90 tone za Bar i 26.876,52 tone za Budvu u 2023. godini, a najmanje količine otpada zabilježene su na početku otvaranja deponije „Možura“ i to u vrijednostima: 9.757,71 tone za Bar i 543,54 tone za Budvu u 2012. godini. U ostalim primorskim gradovima količine otpada variraju u različitim vrijednostima. Zato su najveće količine otpada zabilježene u vrijednostima 15.175,24 tone za Ulcinj i 5.645,72 tone za Tivat u 2023. godini, 3.684,96 tone za Herceg-Novi i 12.590,58 tone za Kotor u 2020. godini, a najmanje su zabilježene za Ulcinj u vrijednostima 4.447,00 tone i za Tivat 543,54 tona u 2012. godini. Situacija za gradove Kotor i Herceg-Novi je drugačija jer nema adekvatnih podataka o najmanjim vrijednostima za Herceg-Novi, a najmanje količine zabilježene su u vrijednosti 477,32 tone za Kotor u 2012. godini.

Što se tiče firme Hemosan koja se nalazi u Baru iz koje se takođe deponuje otpad na „Možuru“ najveće količine otpada iznose 9.226,94 tone u 2021. godini, a najmanje 229,38 tona i to u 2012. godini.

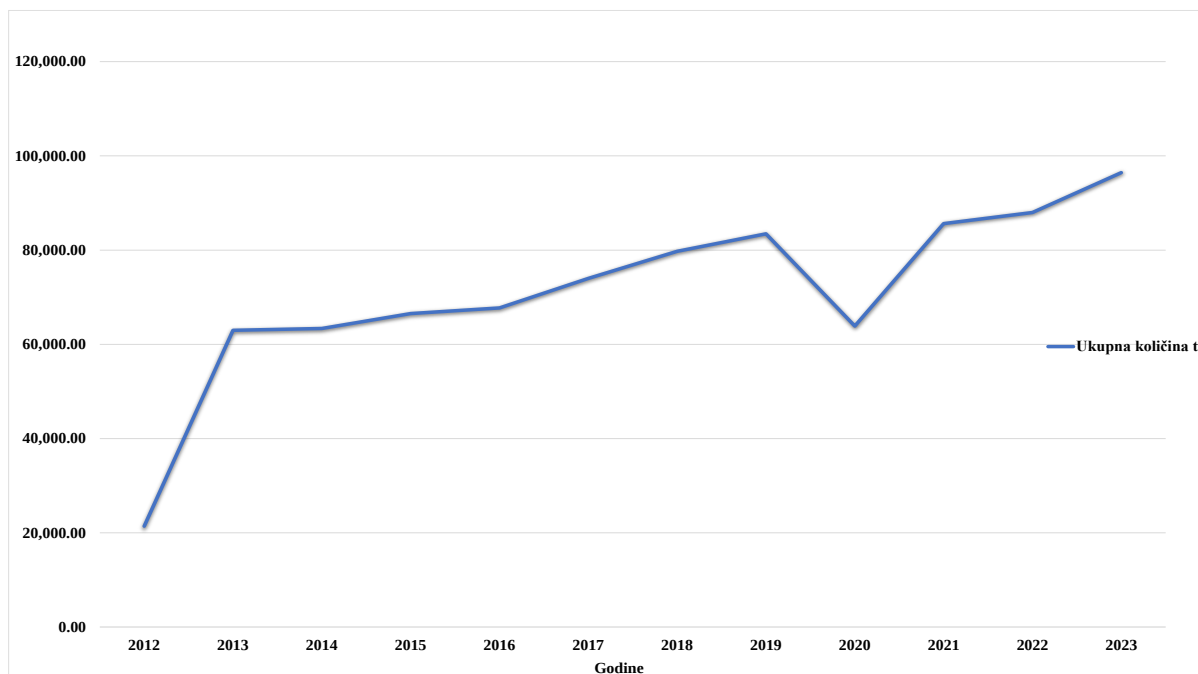
Treba naglasiti da se od početka otvaranja deponije, pa do 2023. godine deponovala jako mala količina otpada na „Možuri“ iz jedinog grada sa podneblja sjevera Berana i iz nekih drugih gradova što nas dovodi do zaključka da broj stanovnika ima uticaja na vrijednosti količina otpada.

Za opštinu Berane najveće količine otpada zabilježene su 2013. godine u iznosu od 1.761,00 tona, dok je najmanja količina otpada u iznosu od 0,00 tona registrovana 2012. godine. Za druge gradove najveća količina otpada je iznosila 127,60 tona u 2023. godini, a najmanja 0,20 tona u 2012. godini.

Na slici 11 i u tabeli 5 prikazane su ukupne godišnje količine otpada odložene na deponiji „Možura“ od 2012. godine do 2023. godine.

Tabela 5. Količine komunalnog otpada deponovane na deponiji „Možura“ od 2012. godine do 2023. godine

Godine	Ukupna količina (t)
2012	21.415,63
2013	62.988,02
2014	63.377,74
2015	66.518,46
2016	67.736,71
2017	73.993,85
2018	79.741,98
2019	83.456,58
2020	63.893,35
2021	85.615,08
2022	87.995,33
2023	96.435,90



Slika 11. Grafički prikaz količina komunalnog otpada deponovane na deponiji „Možura“ od 2012. godine do 2023. godine

Povećanje količine deponovanog otpada je zabilježeno u vremenskom periodu od 2019. godine, uz značajan pad tokom 2020. godine koji je uzrokovan pandemijom korona virusa, odnosno manjim brojem turista, što je rezultovalo manjim količinama produkovanog otpada.

Važno je naglasiti da se procijenjena količina otpada određuje na osnovu rasta i broja stanovnika, strukture lokacije, zakonodavnih propisa, razvoja ekonomije, a često su za količinu otpada presudni i klimatski faktori. U budućnosti biće neophodno uraditi transfer stanice za otpad iz svih gradova koji dovoze otpad na deponiju „Možura“, sa izuzetkom opština Bar i Ulcinj.

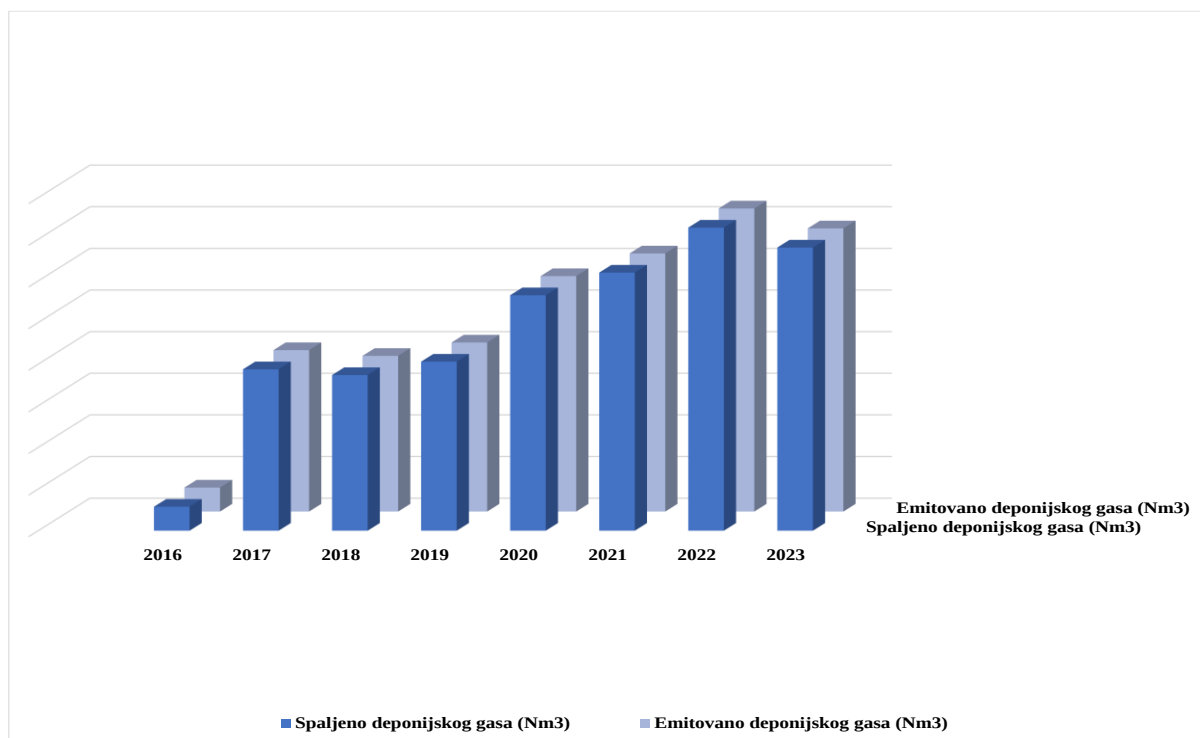
Na slici 11 može se zapaziti da je od početka rada deponije zabilježena najmanja količina otpada od 21.415,63 tone u 2012. godini, a najveća je iznosila 96.435,90 tone u 2023. godini.

4.2. Procjena količina deponijskog gasa

Prikaz procjena količina emitovanog i spaljenog deponijskog gasa u Nm^3 po satu (h) u periodu od 2016. godine do 2023. godine sa deponije „Možura“, predstavljen je na slici 12 i u tabeli 6.

Tabela 6. Procjena količine emitovanog i spaljenog deponijskog gasa u Nm^3 po satu (h)

Godina	Emitovano deponijskog gasa (Nm^3)	Spaljeno deponijskog gasa (Nm^3)	Sati (h)
2016	288000	288000	
2017	1938629	1938629	
2018	1869528	1869528	
2019	2030332	2030332	
2020	2827851	2827851	8680
2021	3099876	3099876	8566
2022	3640305	3640305	8731
2023	3400918	3400918	7814
UKUPNO	19.095,439	19.095,439	50.558



Slika 12. Histogramski prikaz procjene količine emitovanog i spaljenog deponijskog gasa u Nm^3

Spaljivanje deponijskog gasa vrši se uz pomoć eko baklje koje je automatizovano tako da proces emitovanja traje koliko i proces spaljivanja. Deponijski gas nije moguće emitovati preko eko baklje kada nema spaljivanja.

Podaci iz tabele 6 i sa slike 12 daju prikaz da je količina emitovanog i spaljenog deponijskog gasa gotovo identična svake godine, bez obzira na varijacije u broju sati. Ovaj nalaz potvrđuje prethodno izrečenu tvrdnju da su procesi emitovanja i spaljivanja deponijskog gasa usko povezani, jer spaljivanje gasa mora biti u realnom vremenu praćeno njegovim emitovanjem kroz eko baklju.

Ovaj sistem omogućava da se gasovi koji nastaju prilikom deponovanja i razgradnje otpada efikasno eliminišu sagorijevanjem, čime se sprječava njihovo širenje u atmosferu i smanjuje ekološki uticaj deponije.

Najveći broj sati spaljivanja deponijskog gasa zabilježen je od 2020. godine do 2023. godine, što ukazuje na stalni porast količine deponijskog gasa u tom periodu. Ovaj trend može biti povezan s povećanjem količine otpada na deponiji, što ujedno zahtijeva i veću efikasnost u upravljanju gasovima, kako bi se smanjile emisije i ekološki uticaji. Ovaj period, koji obuhvata četiri godine, takođe pokazuje da je deponija „Možura“ postigla stabilizaciju u procesu spaljivanja, što pokazuju visoke vrijednosti emitovanog i spaljenog gasa.

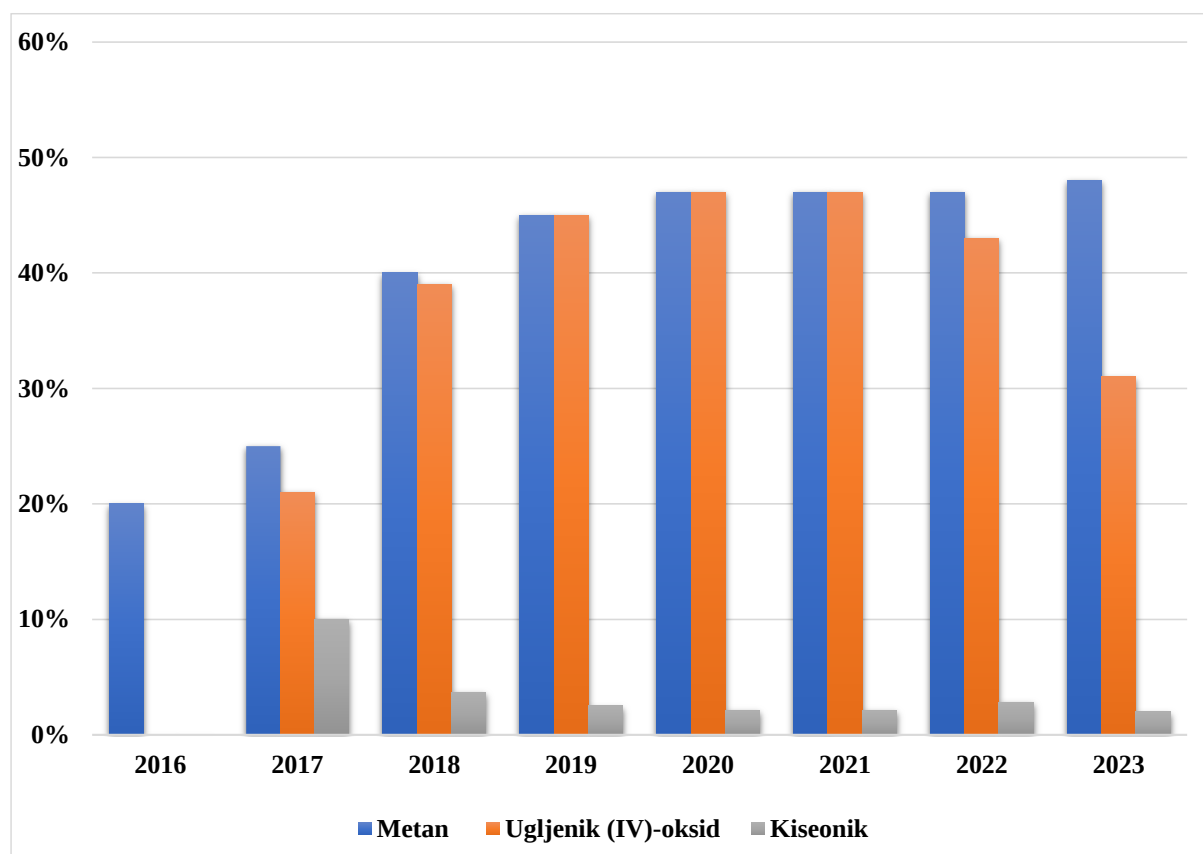
Ukupna količina emitovanog i spaljenog deponijskog gasa iznosi 19.095,439 Nm³ dok ukupan broj sati za prethodno navedene vrijednosti iznosi 50.558 sati (h) što je i prikazano u tabeli 6. Navedeni podaci ukazuju na efikasnost procesa upravljanja deponijskim gasom tokom pomenutog perioda, što ima veliki značaj sa aspekta zaštite životne sredine i povećanja energetske efikasnosti deponije.

Važno je naglasiti da je najveći broj sati pri formiranju ukupne količine emitovanog i spaljenog deponijskog gasa zabilježen od 2020. godine do 2023. godine što se može uočiti iz tabele 6.

Koncentracije metana, ugljenik (IV)-oksida i kiseonika u deponijskom gasu na deponiji „Možura“ u periodu od 2016. godine do 2023. godine prikazane su u tabeli 7 i histogramski su prikazane na slici 13.

Tabela 7. Koncentracije metana, ugljenik (IV)-oksida i kiseonika u deponijskom gasu na deponiji „Možura“ u periodu od 2016. godine do 2023. godine

Godine	Metan	Ugljenik (IV)-oksid	Kiseonik
2016	20%	0%	0%
2017	25%	21%	10%
2018	40%	39%	3.7%
2019	45%	45%	2.5%
2020	47%	47%	2.1%
2021	47%	47%	2.1%
2022	47%	43%	2.8%
2023	48%	31%	2%



Slika 13. Histogramski prikaz koncentracije metana, ugljenik (IV)-oksida i kiseonika u deponijskom gasu na deponiji „Možura“ u periodu od 2016. godine do 2023. godine

Podaci iz tabele 7 i sa slike 13 pokazuju da je metan dominantan gas u deponijskom gasu, sa koncentracijama koje se kreću od 20% u 2016. godini do 48% u 2023. godini. Metan, kao primarni gas koji nastaje anaerobnom razgradnjom organskog otpada je ključni sastojak deponijskog gasa. Njegov značaj ogleda se u mogućnosti korišćenja kao goriva za proizvodnju električne energije u gasnim turbinama i drugim energetske uređajima. Spaljivanje metana ne samo da doprinosi smanjenju emisije štetnih gasova, već ima i ekonomske koristi u obliku proizvodnje energije. Sa druge strane zapaljivost metana, a time i potencijalne opasnosti pri koncentracijama od 5% do 15% zahtijeva pažljivo upravljanje emisijama.

Koncentracije ugljenik (IV)-oksida kao drugog najzastupljenijeg gasa u deponijskom gasu se kreću u granicama od 21% u 2017. godini do 47% u 2020. godini i 2021. godini. Povećanje njegove koncentracije doprinosi globalnom zagrijavanju. Stoga, smanjenje emisije ugljenik (IV)-oksida iz deponijskog gasa predstavlja značajan ekološki izazov. Unapređenjem tehnologija spaljivanja deponijskog gasa, moguće je smanjiti njegov uticaj na životnu sredinu.

Kiseonik je prisutan u deponijskom gasu u znatno manjim koncentracijama, koje variraju od 10% (2017. godina) do 2,1% (2020. godina i 2021. godina). Ovako niske koncentracije kiseonika se mogu objasniti procesima anaerobne razgradnje u deponijama, što rezultuje brzim smanjivanjem njegove količine u deponijskom gasu. Kiseonik je važan element za sagorijevanje gasa, a njegovo smanjenje može ukazivati na efikasnost procesa sagorijevanja u eko baklji. Sa druge strane, kiseonik može imati i negativan uticaj na sigurnost samog procesa spaljivanja, jer prisustvo kiseonika u deponijskom gasu može povećati rizik od zapaljenja.

Pored navedenih gasova u deponijskom gasu u manjim količinama mogu se naći i smješe drugih gasova: sumpor-vodonika, amonijaka i merkaptana.

4.2.1. *Primjeri dobre prakse energetske iskorisćenja deponijskog gasa iz zemalja u okruženju*

Tabela 8 daje podatke o postojećim postrojenjima za proizvodnju električne energije koja su instalirana u zemljama u okruženju.

Tabela 8. Postrojenja za proizvodnju električne energije iz zemalja u okruženju [53]

Deponija	Vrsta tehnologije, motora, snaga motora	Protok gasa	Proizvodnja struje na godišnjem nivou
Deponija Viševac-Hrvatska	Generator koji pokreće motore sa unutrašnjim sagorijevanjem, snage 1,2 MW	/	6000 MWh na godišnjem nivou
Deponija ISTAÇ Odayeri- Turska	15 Jenbacher motora i 3 MWM motora (1,4 MWM za svaki)	10.800 m ³ /h	23 MW na godišnjem nivou
Regionalni centar za upravljanje otpadom- Celje, Slovenija	Dva motora sa unutrašnjim sagorijevanjem, snage 1,5 MW	480 GWh za 2030. godinu i 700 GWh za 2040. godinu	/
Deponije u Atini i Solunu, Grčka	MWTP snage 11,4 MW u Atini	/	/
	SWL snage 23,4 MW u Atini	/	/
	SWL snage 5 MW u Solunu	/	/
Punionica za gas- Češka	Crpna stanica koja se koristi na bazi MAR kontejnera, tehnološkog kontejnera za pumpanje i baklje za sagorijevanje gasa.	/	/

U zemljama u okruženju rađena su istraživanja za različite vrste energetske projekata iskorišćenja deponijskog gasa [53].

U zavisnosti od vrste generatora koji su korišćeni na deponijama, kapitalnih troškova i snage motora dobijeni su različiti podaci za proizvodnju električne energije i protoka deponijskog gasa na godišnjem nivou što se može zapaziti u tabeli 8 [53].

U Hrvatskoj na deponiji Viševac kao postrojenje koristi se generator koji pokreće motore sa unutrašnjim sagorijevanjem, podsisteme, trafostanice, sisteme upravljanja i zaštite [53]. Motori koji se koriste na deponiji imaju snagu od 1,2 MW, a na godišnjem novu proizvede se 6000 MWh struje [53].

U Turskoj je slučaj drugačiji jer se za razliku od deponije Viševac u Hrvatskoj na deponiji ISTAÇ Odayeri koriste 15 Jenbacher motora i 3 MWM motora (generatorski setovi) 1,4 MW za svaki u sklopu energetske postrojenja [53]. Na deponiji u Turskoj proizvede se 23 MW električne energije i 10.800 m³/h na godišnjem nivou [53].

Što se tiče Slovenije i Regionalnog centra za upravljanje otpadom u Celju (RKO) energetske postrojenje funkcioniše sa dva motora sa unutrašnjim sagorijevanjem koji imaju snagu od 1,5 MW, a ukupna proizvodnja deponijskog gasa za 2030. godinu iznosiće 480 GWh i 700 GWh za 2040. godinu jer je cilj projekta da se poveća proizvodnja gasa za 25 % [53].

Treba naglasiti da su u Grčkoj samo tri energetske postrojenja u funkciji. Dva energetske postrojenja nalaze se u Atini, a treće u Solunu [53].

Prvo energetske postrojenje u Atini MWTP je kapaciteta 11,4 MW, a drugo postrojenje SWL je kapaciteta 23,4 MW [53].

Energetske postrojenje SWL koje se nalazi u Solunu ima kapacitet od 5 MW [53].

Punionica za gas koju proizvodi firma „Institut za korišćenje plina Brno“ za sagorijevanje deponijskog gasa nalazi se u Češkoj [53].

Energetske postrojenje u Češkoj funkcioniše na bazi crpne stanice sastavljene od MAR kontejnera, tehnološkog kontejnera za sopstveno pumpanje i baklje za sagorijevanje gasa [53]. Glavni proces izvodi se u MAR kontejneru čije su dimenzije 3000 mm x 2500 mm x 3100 mm sa tehnologijom dimenzija 6000 mm x 3200 mm x 3100 mm dok se tehnološki kontejner sastoji od oprema za pumpanje i tehnologije za odvajanje gasova [53].

4.3. Predlog energetskeg postrojenja i tehnologije procesa proizvodnje električne energije na deponiji „Možura“

Tretman deponijskog gasa ima za cilj njegovo konvertovanje u koristan oblik energije odnosno sagorijevanje deponijskog gasa u sanitarnim kadama, odnosno njegovu konverziju u električnu energiju [53].

Energetska efikasnost postiže se primjenom (CHP) tehnologija odnosno kogenerativnog sistema koji se sastoji od kombinacije postrojenja kao što su gasni motori, gasna turbina, generator pare i izmjenjivači toplote čija je uloga osim procesa električne energije i omogućavanje proizvodnje toplote iz jedinice koja služi za sagorijevanje deponijskog gasa [53].

U tabeli 9 predstavljene su dostupne veličine motora sa unutrašnjim sagorijevanjem koje bi se mogle koristiti na deponiji „Možura“ [53].

Tabela 9. Dostupne veličine motora sa unutrašnjim sagorijevanjem u zavisnosti od njegovog protoka [53].

Instalisana snaga motora sa unutrašnjim sagorijevanjem *	Protok gasa (50%)
540 kW	350 m ³ /h
630 kW	400 m ³ /h
800 kW	600 m ³ /h
1,2 MW	850 m ³ /h

Motori sa unutrašnjim sagorijevanjem predstavljaju ne samo najčešće korišćenu tehnologiju za konvertovanje deponijskog gasa u električnu energiju već i najbolju što se tiče efikasnosti i održavanja motora [53].

Za energetske postrojenje na deponiji „Možura“ predlažu se kontejnerske jedinice 2 + 2 bez kogeneracije sa gasnim motorom JENBACHER [53]. Gasni motori JENBACHER nude brojne prednosti kada je u pitanju iskorišćavanje deponijskog gasa za proizvodnju električne energije. Visoka efikasnost, fleksibilnost u radu sa različitim gasovima, ekološka prihvatljivost, pouzdanost, mogućnost kogeneracije i jednostavno održavanje čine ih idealnim rešenjem za energetska postrojenja na deponijama. Ova tehnologija omogućava značajno smanjenje emisija, efikasnu upotrebu obnovljivih izvora energije i dugoročne uštede u poslovanju.

Kako bi se olakšalo funkcionisanje kogenerativnih sistema, razvijeni su kontejneri koji se koriste za različite projekte na deponijama, a koji omogućavaju proizvodnju električne energije iz deponijskog gasa. Dizajn i fleksibilnost tih kontejnera omogućavaju da se postave na način koji maksimalno optimizuje prostor, dok istovremeno obavljaju funkciju za koju su predviđeni [53].

Za lakše funkcionisanje kogenerativnih sistema konstruišu se kontejneri koji se koriste za različite primjene i projekte na deponijama u cilju dobijanja električne energije iz deponijskog gasa. Dizajn i fleksibilnost tih kontejnera omogućavaju da se postave na način koji maksimalno optimizuje prostor, dok istovremeno obavljaju funkciju za koju su predviđeni [53].

Kogeneracijske jedinice koje se nalaze u kontejneru mogu posjedovati gasnu turbinu, gasne motore, sistem za hlađenje, ventilacioni sistem, sistem za pokretanje sistema [53]. Svaki proizvođač ima osnovni tip kontejnera sa određenim komponentama, ali su detalji konstruisani na različite načine u zavisnosti od proizvođača [53].

Gasovod, gasna instalacija, sistemi kontrola, električne instalacije, sistem upravljanja, jedinice za transformaciju gasa, kao što su kotlarnice, CHP postrojenja i elektrane čine cjelinu sistema za korišćenje deponijskog gasa [53].

4.3.1. Prečišćavanje deponijskog gasa

Da bi se povećala eksploatacija biogasa, potrebno je modernizacijom tehnologija ukloniti razne nečistoće: voda, ugljenik (IV)-oksid, vodonik-sulfid, kiseonik, azot, ugljenik (II)-oksid, amonijak, siloksani, ugljovodonici, kao i aromatična i halogenovana jedinjenja [54]. Efikasna konverzija biogasa zahtijeva uklanjanje ugljenik (IV)-oksida i odsumporavanja sirovog biogasa. Međutim, procesi nadogradnje sistema za prečišćavanje povećavaju troškove proizvodnje biogasa. Stoga je važno da se proces nadogradnje optimizuje u smislu niske potrošnje energije, visoke efikasnosti i visokog prinosa metana [55].

U kontejneru gdje su smještene kogeneracijske jedinice na deponiji „Možura“ predlaže se nadogradnja jedinice za prečišćavanje deponijskog gasa kao vrsta predtretmana prije tretmana primarne i sekundarne obrade [53].

Primarnom obradom uklanjaju se čestice i vlaga kompresijom i hlađenjem dok se sekundarna obrada sastoji od niza postupaka prečišćavanja, fizičkih i hemijskih [53].

Primarna obrada

Primarna obrada funkcioniše po principu kondenzacionog sušenja koji dovodi do vlaženja deponijskog gasa [53]. Za ovaj proces upotrebljavaju se vodohlađeni izmjenjivači toplote sa školjkicama i cijevima. Do kondenzacije vlage dolazi kada se mlaz deponijskog gasa ohladi, a nakon toga se može ukloniti [53]. Ako se prilikom procesa hlađenja stvori kondenzat on se mora sakupiti u posudu za sakupljanje kondenzata, pri čemu se kondenzat ispušta uz pomoć kondenzacione pumpe, a deponijski gas se može propuštati kroz odmagljivač. Na paketu žičanih mreža (demistera) hvata se 99% kapljica kondenzata [53].

Sekundarna obrada

Tehnologije prečišćavanja biogasa njegovom sekundanom obradom uglavnom se temelje na procesima apsorpcije, adsorpcije i membranske separacije. Ove tehnologije omogućavaju visoku koncentraciju metana i visoku efikasnost uklanjanja raznih nečistoća. Primarni cilj sekundarne obrade je povećanje niske kalorične vrijednosti biogasa i njegova konverzija u vrijedno gorivo, odnosno u čisti metan [56].

Sekundarna obrada biogasa najčešće se vrši primjenom sljedećih tehnika:

- Ispiranje gasa pogodnim rastvaračem
- procesi adsorpcije
- kriogena separacija,
- membranska separacija.

Ispiranje rastvaračem je najčešće korišćeni postupak. Može se vršiti bilo fizičkom apsorpcijom, vodom ili specifičnim rastvaračima koja apsorbuju kontaminante biogasa, ili hemijskom apsorpcijom, uz korišćenje hemijskih sredstava. Postupak čišćenja vodom temelji se na većoj rastvorljivosti H_2S i CO_2 u vodi nego CH_4 [54]. Ekonomska održivost ove tehnologije, s obzirom na veliku potrošnju vode, zahtijeva njenu regeneraciju [57]. Nakon ispiranja vodom, potrebno je sušenje biogasa zbog povećanja sadržaja vode [58]. Konačno, nakon faze sušenja, čistoća metana može iznositi i do 99%.

Ispiranje biogasa se može izvesti i organskim rastvaračima. Ovaj postupak je proces fizičke apsorpcije sličan ispiranju vodom; međutim, korišćeni organski rastvarači pogodni su za apsorpciju ne samo CO_2 , već i za apsorpciju H_2S i H_2O . Polietilen glikol eter (PEG), metanol i N-metil pirolidon najčešće su korišćene mješavine organskih rastvarača za apsorpciju CO_2 i H_2S iz sirovog biogasa [59].

Adsorpcija predstavlja najčešće korišćenu metodu za prečišćavanje biogasa. Zasniva se na sposobnosti poroznog materijala (najčešće aktivnog uglja) da adsorbuje molekule nečistoća iz gasne smješe primjenom visokog pritiska koji se zatim oslobađaju pri nižim pritiscima [59].

Proces kriogene separacije se zasniva na različitim temperaturama ključanja gasova u biogasu, odnosno na principu da se CO_2 i H_2S pretvaraju u tečnost pri različitim pritiscima i temperaturama [59].

Membranska separacija se zasniva na svojstvima selektivne propustljivosti membrana (poliimidnih i celuložno acetatnih) koje omogućavaju odvajanje različitih komponenti biogasa. Predstavlja održivu alternativu tradicionalnom sistemu prečišćavanja biogasa adsorpcijom membrane [60].

Spaljivanje gasa u gasnom motoru

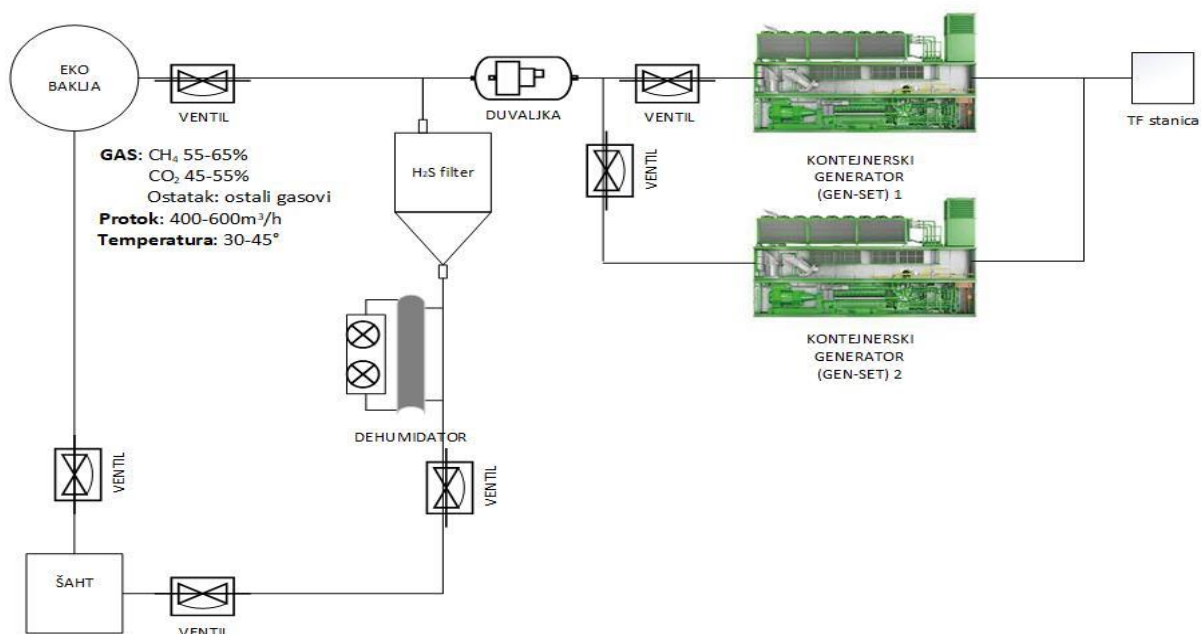
Po završetku procesa primarne i sekundarne obrade deponijskog gasa slijedi proces njegovog spaljivanja u motoru sa unutrašnjim sagorijevanjem [53]. Ovi motori imaju sposobnost pretvaranja linearnog kretanja klipa u kružno kretanje radilice uz pomoć klipnjače koja je spojena između klipa i radilice. Dio mašine koji ima mogućnost rotacija (osovine) dovode do pokretanja generatora koji služi za proizvodnju električne energije [53]. Motor sa unutrašnjim sagorijevanjem istovremeno sa proizvodnjom električne energije može proizvoditi i druge oblike energije koje se mogu koristiti u razne svrhe poput toplotne energije iz omotača i ulja za podmazivanje i tople vode (90°C) i to u cilju grijanja kućnih prostora pogotovo u mjestima gdje je zbog klimatskih uslova zastupljena velika količina vlage [53]. Motori sa unutrašnjim sagorijevanjem funkcionišu po sistemu Otto ciklusa.

U generatorima energetske sistema proizvodnjom električne energije iz deponijskog gasa dolazi do stvaranja emisije gasova u atmosferu.

Kao produkti sagorijevanja otpadnih gasova su: CO_2 , CO , H_2O [53].

Osim ovih gasova u gasnim motorima koji su u sklopu energetskog postrojenja za proizvodnju električne energije mogu se naći i smješe poput oksida azota, azot (II)-oksida i azot (IV)-oksida koji nastaju procesom sagorijevanja jedinjenja kao što je gasoviti azot i jedinjenja azota u gorivu [53].

Na slici 14 nalazi se uprošćen prikaz prethodno navedenih tehnologija za sagorijevanje deponijskog gasa, motora i kogeneratorskog energetskog postrojenja sa kontejnerskim jedinicama [53].



Slika 14. Uprošćen prikaz postrojenja za proizvodnju električne energije na deponiji „Možura“ [53]

Korišćenjem prethodno navedenih tehnologija koje služe za proizvodnju električne energije iz deponijskog gasa u generatorima energetske sistema dolazi do emisije gasova u atmosferu [53].

Izmjereni sastav deponijskog gasa na deponiji „Možura“ kreće se u sljedećem opsegu:

- Početna količina metana = 50%
- Početna količina ugljenik (IV)-oksida = 30%
- Početna količina kiseonika = 10%
- Početna količina ostalih gasova = 10%

Električni kapacitet od 0,999 MW i generisanje tog kapaciteta zahtijevaju sagorijevanje između 500 i 540 m³/h deponijskog gasa sa udjelom metana od 50% [53].

Osim ovih gasova u gasnim motorima koji su u sklopu energetskeg postrojenja za proizvodnju električne energije mogu se naći i smješe poput oksida azota, azot (II)-oksida i azot (IV)-oksida koji nastaju procesom sagorijevanja jedinjenja kao što je gasoviti azot i jedinjenja azota u gorivu [53].

4.3.2. Proračun emisije NO_x u kogeneracijskom postrojenju na deponiji „Možura“

Funkcionisanjem kogenerativnog kontejnerskog postrojenja na deponiji „Možura“, tj, u toku procesa proizvodnje električne energije iz deponijskog gasa, dolazi do emisije gasova u atmosferu. Jedan od ključnih zagađivača nastao sagorijevanjem biogasa je NO_x (oksidi azota). U narednom tekstu je opisan proračun količine emitovanog NO_x, zasnovan na materijalnom bilansu sagorijevanja.

Količina proizvedenog NO_x može se prikazati sljedećom jednačinom:

Proizvedeni NO_x = NO_x nastao sagorijevanjem goriva – NO_x potrošen iz biogasa:

Količina NO_x koja nastaje sagorijevanjem biogasa zavisi od njegovog sastava i uslova sagorijevanja u motoru. Kada gas sagorijeva u motoru, azot u gorivu i u vazduhu reaguje sa kiseonikom, stvarajući okside azota (NO i NO₂). Tačan nivo proizvedenog NO_x zavisi od nekoliko faktora:

Temperatura: Viša temperatura sagorijevanja povećava brzinu reakcije i proizvodnju NO_x.

Pritisak: Povećani pritisak može favorizovati formiranje NO_x.

Odnos vazduh-gorivo: Viši odnos vazduha u procesu sagorijevanja obično dovodi do veće emisije NO_x.

Vrijeme boravka u komori za sagorijevanje: Duže vrijeme boravka gasova u komori za sagorijevanje omogućava više vremena za reakciju i može dovesti do veće proizvodnje NO_x.

Tokom sagorijevanja, dio NO_x može biti smanjen ili konvertovan u druge oblike azota kroz specijalizovane tehnologije kao što su selektivna katalitička redukcija (SCR) ili selektivna nekatalitička redukcija (SNCR). Korišćenjem ovih tehnologija može se smanjiti emisija NO_x. Na primjer, u SCR sistemu, amonijak ili urea se dodaju u izduvne gasove, gdje reaguju sa NO_x i pretvaraju ih u azot i vodenu paru, čime se značajno smanjuje emisija NO_x. Količina NO_x koja se konvertuje zavisi od efikasnosti primijenjenih tehnologija i specifičnih uslova rada.

U cilju proračuna materijalnog bilansa NO_x potrebno je prikupiti sljedeće podatke:

- Sastav deponijskog gasa, uključujući koncentraciju jedinjenja koja sadrže azot, kao što su amonijak ili druga jedinjenja azota koji mogu doprinijeti emisiji NO_x.
- Radni uslovi motora, uključujući temperaturu, pritisak i odnos vazduh-gorivo, jer svi ovi faktori utiču na formiranje NO_x tokom sagorijevanja.

Prema mjerenjima Centra za ekotoksikološka ispitivanja koncentracija NO_x iznosi 36,6 mg/Nm³. Budući da se u motorima sa temperaturom iznad 900 °C očekuje potpuna konverzija azota iz deponijskog gasa u NO_x, preporučuje se nastavak redovnog mjerenja emisija u skladu sa važećim propisima, kao i instalacija sistema za smanjenje NO_x emisija (filtera za NO_x).

Materijalni bilans NO_x:

Na osnovu prethodnih mjerenja koncentracija, pretpostavlja se da koncentracija jedinjenja azota u deponijskom gasu iznosi oko 40 mg/Nm³. Ako je protok biogasa 540 m³/h, ukupna emisija NO_x iz biogasa iznosi:

$$40 \text{ mg/Nm}^3 \times 540 \text{ Nm}^3/\text{h} = 21,6 \text{ g/h NO}_x.$$

U gasnom motoru, osim deponijskog biogasa, dolazi i do sagorijevanja azota iz vazduha koji sadrži 78% azota. Sa protokom vazduha od 4000 Nm³/h, procjenjuje se da 78% azota (3.120 Nm³/h) potiče iz vazduha, dok ostatak tj. 2% potiče iz deponijskog gasa (10,8 m³/h).

S obzirom da količina od jednog mola N₂ (28 g/ mol) pri idealnim uslovima zauzima zapreminu od 22,4 slijedi da u 3120 litara/h ima oko 139 molova N₂/h.

Na osnovu pretpostavke da je vrijeme zadržavanja gasa u motoru oko 3 sekunde, može se procijeniti da je u ovom vremenskom intervalu prisutno 0,1158 molova, odnosno 3,28 g azota.

U slučaju maksimalnog protoka gasa u motoru očekivana maksimalna emisija NO_x (mg/h) iznosi 189.000 mg/h, ili 189 g/h. Dakle, očekivana srednja koncentracija NO_x je manja od 189 g/h.

Rezultati mjerenja vrijednosti emisije NO_x u ppm prikazani su u tabeli 10.

Tabela 10. Datumi mjerenja i vrijednosti NO_x u ppm

Datum	NO _x (ppm)
07.11.2023.	46
08.11.2023.	52
09.11.2023.	70
10.11.2023.	56
13.11.2023.	49
15.11.2023.	54
17.11.2023.	48

Za proračun količina emitovanog NO_x se uzima očekivana srednja koncentracija NO_x do 190 mg/m³. U cilju upoređivanja izmjerenih i proračunatih količina NO_x, neophodno je izvršiti konverziju količina izraženih u ppm u količine izražene u mg/m³, primjenom sljedeće jednačine:

$$\text{Koncentracija u mg/m}^3 = (\text{Koncentracija u ppm}) \times (\text{Molekulska masa NO}_x) \times k$$

k predstavlja faktor konverzije koji zavisi od temperature i pritiska. Za uslove ambijentalnog vazduha (25 °C i 1 atmosfera) za faktor k se obično uzima vrijednost od 24,45. Uvrštavanjem navedene vrijednosti k i molekulske mase NO_x (46,0055 g/mol) dobija se:

$$46 \text{ ppm (NO}_x) \times 46,0055 \text{ g/mol} \times 24,45 = 51,74 \text{ mg/m}^3 \text{ (NO}_x)$$

Analognim postupkom dobijene su vrijednosti emisija NO_x izražene u mg/m³ i prikazane su u tabeli 11.

Tabela 11. Konvertovane vrijednosti koncentracija NO_x u ppm u mg/m³

NO _x (ppm)	NO _x (mg/m ³)
46	51,74
52	58,49
70	78,74
56	62,99
49	55,12
54	60,74
48	53,99

Podaci u tabelama ukazuju da prosječne vrijednosti emitovanih količina NO_x iznose 53,6 ppm odnosno 60,26 mg/m³.

Prema tome, ukupna vrijednost emisije NO_x iznosi:

$$190 \text{ mg/m}^3 (\text{NO}_x) + 60,26 \text{ mg/m}^3 (\text{NO}_x) = 250,26 \text{ mg/m}^3 (\text{NO}_x)$$

Rezultati proračuna i mjerenja pokazuju da je maksimalna ukupna emisija NO_x veća od dozvoljenih vrijednosti. Da bi se obezbijedila usklađenost sa ekološkim standardima i smanjili negativni uticaji na okolinu, preporučuje se ugradnja sistema za smanjenje emisije NO_x. Sistem selektivne katalitičke redukcije (SCR) predstavlja efikasnu opciju za smanjenje emisija NO_x, jer može smanjiti emisije do više od 90%. Takođe, sistem selektivne nekatalitičke redukcije (SNCR) može biti alternativa ako je potreban jeftiniji sistem sa nižom efikasnošću smanjenja NO_x.

ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata istraživanja mogu se izvući sljedeći zaključci:

- podaci o količini emitovanog i spaljenog deponijskog gasa, kao i koncentracijama metana, ugljenik (IV)-oksida i kiseonika, ukazuju na značaj deponije „Možura“ kao potencijalnog izvora energije. Uzimajući u obzir visoke koncentracije metana i ugljenik (IV)-oksida, deponija ima mogućnost da kroz optimizovane procese sagorijevanja smanji negativni ekološki uticaj i poveća energetske efikasnost.
- Odlaganjem i anaerobnim razlaganjem komunalnog otpada na deponiju „Možura“ proizvode se značajne količine deponijskog gasa koje je potrebno kontrolisati. Kontrolisanjem emisija deponijskog gasa smanjuju se rizici od eksplozije, rizici za okolinu, a sagorijevanjem metana smanjuje se uticaj na efekat staklene bašte.
- Predloženi sistem konverzije biogasa tehnologijom kogeneracije (CHP), koja omogućava simultanu proizvodnju električne i toplotne energije iz deponijskog gasa povećava ukupnu efikasnost. Gasni motori i gasne turbine optimalno konvertuju biogas u električnu energiju, dok se višak toplote može iskoristiti za druge potrebe, kao što je grijanje prostora. Korišćenje kontejnerskih kogenerativnih jedinica smanjuje prostor potreban za instalaciju, čineći sistem fleksibilnim i kompaktnim.
- Efikasnost proizvodnje energije zavisi od kvaliteta biogasa, što zahtijeva primjenu tehnologija za prečišćavanje gasa. Procesi primarne i sekundarne obrade gasa omogućavaju uklanjanje nečistoća, uključujući vodu, ugljenik (IV)-oksid, vodonik-sulfid i druge štetne komponente. Implementacija ovih tehnologija povećava efikasnost konverzije biogasa u energiju, ali istovremeno povećava troškove, zbog čega je važno optimizovati ove procese za visoku efikasnost i nisku potrošnju energije.
- Emisija gasova, kao što su NO_x, CO₂, i drugi, nastaje tokom sagorijevanja deponijskog gasa u motorima. Korišćenje gasnih motora sa unutrašnjim sagorijevanjem može značajno doprinijeti smanjenju emisije, ali ipak predstavlja izazov u pogledu kontrole emisija NO_x. Proračuni i mjerenja emisije NO_x ukazuju na to da je emisija NO_x viša od dozvoljenih granica, što znači da je potrebna implementacija dodatnih tehnologija za smanjenje emisija, kao što je sistem selektivne katalitičke redukcije (SCR), koji može smanjiti emisije NO_x i do 90%.
- Iako je sistem tehnološki dobro postavljen, preporučuje se dalje unaprijeđenje sistema za smanjenje emisija NO_x u cilju usklađivanja sa ekološkim standardima. Ugradnja SCR ili SNCR sistema predstavlja efikasne opcije za smanjenje emisije NO_x, čime bi se postigli pozitivni efekti na ekosistem.
- Korišćenje deponijskog gasa kao izvora energije doprinosi smanjenju zavisnosti od tradicionalnih izvora energije i može donijeti ekonomske koristi kroz proizvodnju električne energije i smanjenje emisije metana, koji bi inače bio emitovan u atmosferu. Međutim, važno je optimizovati troškove prečišćavanja gasa, kao i ugradnje sistema za smanjenje emisije NO_x,

kako bi se postigla ekonomska održivost projekta.

- Predloženi sistem energetske iskorisćenja deponijskog gasa na deponiji „Možura“ predstavlja održiv način korišćenja deponijskog gasa za proizvodnju energije, ali zahtijeva dalja unaprijeđenja u pogledu prečišćavanja gasa i smanjenja emisije zagađivača kako bi se postigla optimalna ekološka i ekonomska efikasnost.

LITERATURA

1. Dudek D.J., K.P. Klimek, K.G. Kolodziejak, N.J. Niemczewska, J. Zaleska-Bartos, Landfill gas energy technologies, Institut nafty i gazy, Kraków (2010)
2. Directive 1999/31/ EC on the landfill of waste. Off J Eur Union L. vol.182, pp. 1-19 (1999)
3. Stevanović-Čarapina S.C.H., S.J.Stepanov, S.D.Savić, M.A.Mihajlov, Emisija toksičnih komponenti kao faktor izbora najbolje opcije za upravljanje otpadom primenom koncepta ocenjivanja životnog ciklusa, Hem.Ind., vol.65, No.2, pp. 205-209, (2011)
4. Budisulistiorini B.S.H., Electricity generation from landfill gas, Jurnal Presipitasi, vol.3, No.2
5. Prakash Awasthi, Gopi Chataut, Ram Khatri, Solid waste composition and its management: A case study of Kirtipur Municipality -10, Helyon, volume 9, No. 11, November (2023)
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.helyon.2023.e21360>
6. Kristina Lazić, Bojan Batinić, Mogućnost implementacije sistema odvojenog sakupljanja komunalnog otpada u opštini Vršac, Zbornik radova, Fakultet tehničkih studija, Novi Sad, vol.37, No.3, (2022)
DOI: <http://doi.org/10.24867/16HZ08Lazic>
7. Maria Triassi, Bruna de Simone, Paolo Montuori, Immacolata Russo, Elvira de Rosa, Fabiana di Duca, Claudio Crivaro, Vittorio Cerullo, Patrizia Pontillo and Sergi Díez, Determination of Residual Municipal Solid Waste Composition from rural and urban areas : A step toward the optimization of a Waste Management System for Efficient Material recovery, Journal sustainability, vol.15, No.18, 13378, (2023)
DOI: <https://doi.org/10.3390/su151813378>
8. Hosam M. Saleh and Martin Koller, Introductory Chapter: Municipal Solid Waste, (2019)
<https://www.intechopen.com/chapters/67974>
9. Hridoy Roy, Samiha Raisa Alam, Rayhan Bin-Masud, Tonima Rahman Prantika, Md. Nahid Pervez, Md. Shahinoor Islam and Vincenzo Naddeo, A review on characteristics, techniques, and waste-to-energy aspects of Municipal Solid Waste Management: Bangladesh Perspective, vol.14, No.16, 10265 (2022)
DOI: <https://doi.org/10.3390/su141610265>
10. Buenrostro, O., G., Cram, S. Classification of sources of municipal solid wastes in developing countries. Resour. Conserv. Recycl. vol. 32, No. 29- 41, (2001)
11. Hoornweg Daniel with Laura Thomas, What a waste : Solid Waste Management in Asia, 1999, Working Paper Series Nr. 1. Urban Development Sector Unit. East Asia and Pacific Region., pp. 5, (1999)
<https://web.mit.edu/urbanupgrading/urbanenvironment/sectors/solid-waste-sources.html>
(Massachussets Institute of Technology)

12. Pešević Dušica, Upravljanje otpadom, Univerzitet u Banjoj Luci, Prirodno-matematički fakultet, januar (2023) ISBN 978-99976-86-08-4
https://www.researchgate.net/publication/366839679_UPRAVLJANJE_OTPADOM_knjiga
<https://core.ac.uk/download/pdf/296572616.pdf>
13. Dragoslav R. Rakić, Konstitutivne zavisnosti komunalnog otpada sa deponija u Srbiji, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd (2013)
<https://core.ac.uk/download/pdf/296572616.pdf>
14. Plan upravljanja otpadom, Punionica UNP-a na lokaciji Kraševo bb, Tešanj, 14. 5. 2012, broj: 199 - p - 06/12
<https://core.ac.uk/download/pdf/296572616.pdf>
15. Levanić Matea, Biološka svojstva otpada, Završni rad, Geotehnički fakultet, Zagreb, (2016)
<https://repozitorij.gfv.unizg.hr/islandora/object/gfv%3A174/datastream/PDF/view>
16. Nanda. S., Berruti. F., Municipal solid waste management and landfilling technologies: A review. Environ. Chem. Lett. vol.19, pp. 1433-1456 (2021)
17. Ferronato, N.; Torretta, V. Waste Mismanagement in Developing Countries: A Review of Global Issues. Int. J. Environ. Res. Public Health, vol.16, pp.1060 (2019)
18. Ng, W.P.Q., Lam, H.L., Varbanov, P.S., Klemeš, J. Waste-to-Energy (WTE) network synthesis for Municipal Solid Waste (MSW). Energy Convers. Manag., vol.85, pp.866-874, (2014)
19. Safwat Hemidat, Ouafa Achouri, Loubna El Fels, Sherien Elagroudy, Mohamed Hafidi, Benabbas Chaouki, Mostafa Ahmed, Isla Hodgkinson and Jinyang Guo, Solid Waste Management in the Context of a Circular Economy in the MENA Region, Sustainability, vol.14, No.1, pp.480, (2022)
<https://doi.org/10.3390/su14010480>
20. Digambar Singh, Rayesh Kumara Nema, Municipal Solid Waste and Management, International Journal of Engineering research and technology (IJERT), vol.3, No.3, (2014)
DOI: <https://doi.org/10.17577/IJERTCONV3IS03024>
<https://www.ijert.org/municipal-solid-waste-management-and-disposal>
21. Ayesha Siddiqua, John N. Hahladakis and Wadha Ahmed K A Al-Attiya, An overview of the environmental pollution and health effects associated with waste landfilling and open dumping, Environ Sci Pollut Res Int. Vol.22, No.39, pp. 58514-58536, July (2022)
DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-022-21578-z>
22. Vallero, D.A., Blight, G., The Municipal Landfill. In Waste, 2nd ed., Academic Press: Cambridge, MA, USA, (2019)

23. Magdalena Daria Vaverková, Landfill Impacts on the Environment-Review , Geosciences, vol.9, No.10, pp. 431, (2019)
DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences9100431>
24. Danijel S. Marković, Razvoj logističkog modela za upravljanje komunalnim otpadom primenom heurističkih metoda, doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, Niš, (2018)
<https://www.scribd.com/document/395106300/Danijel-Markovic-Doktorska-Disertacija>
25. Hussein I. Abdel-Shafy, Mona S. M. Mansour; Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization, Egyptian Journal of Petroleum, vol.27, No.4, pp. 1275-1290, December (2018)
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110062118301375?via%3Dihub>
26. Shen, S., Chen, Y., Zhan, L., Xie, H., Bouazza, A., He, F., Zuo, X., Methane hotspot localization and visualization at a large-scale Xi'an landfill in China: Effective tool for landfill gas management. J. Environ. Manag., vol.225, pp.232-241, (2018)
27. Rada, E.C., Ragazzi, M., Stefani, P., Schiavon, M., Torretta, V., Modelling the Potential Biogas Productivity Range from a MSW Landfill for Its Sustainable Exploitation. Sustainability, vol.7, pp.482-49, (2015)
28. Askari /asgari, Mohamamd & Safavi, Kamran & Mortazaeinezhad, Forogh., Landfill Biogas production process, vol.9 (2011)
DOI: <https://doi.org/10.13140/2.1.1761.0886>
29. Chandra, R., Takeuchi, H., Hasegawa, T. (2012), Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production. Renewable and Sustainable. Energy Reviews, vol.16, No.3, pp.1462-1476, (2012)
30. Kalyuzhnyi, S., Veeken, A., Hamelers, B. (2000), Two-particle model of anaerobic solid state fermentation. Water Science and Technology, vol.41, pp.43 – 40, (2000)
31. Sawyerr Nathaniel & Trois Cristina & Seyoum Workneh, Tilahun & Okudoh Vincen, An Overview of Biogas Production: Fundamentals, Applications and Future Research, International Journal of Energy Economics and Policy, vol.9, No.2, pp. 105-115, (2019)
DOI: <https://doi.org/10.32479/ijeep.7375>.
32. Uddin, Mosleh & Wright, Mark, Anaerobic digestion fundamentals, challenges, and technological advances, Physical Sciences Reviews, vol.8, No.9, pp. 2819 – 2837, (2022)
DOI: <https://doi.org/10.1515/psr-2021-0068>
33. Schnürer, A., Jarvis, Å., Microbiological Handbook for Biogas Plants-Swedish Waste Management U2009: 03, Swedish Gas Centre Report 207; Avfall Sverige, Svenskt Gastekniskt Center AB: Malmo, Sweden, (2009)

34. Bramstedt, S., Temperature Optimization of Anaerobic Digestion at the Käppala Waste Water Treatment Plant; The Royal Institute of Technology: Stockholm, Sweden, (2016)
35. Bouallagui, H., Torrijos, M., Godon, J., Moletta, R., Cheikh, R.B., Touhami, Y., Delgenes, J., Hamdi, M., Two-phases anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Bioreactors performance. *Biochem. Eng. J.*, vol.21, pp. 193-197, (2004)
36. Cysneiros, D.; Thuillier, A., Villemont, R., Littlestone, A., Mahony, T., O'Flaherty, V., Temperature effects on the trophic stages of perennial rye grass anaerobic digestion. *Water Sci. Technol.*, vol.64, pp.70-76, (2011)
37. Liu, C., Wang, W., Anwar, N., Ma, Z., Liu, G., Zhang, R., Effect of organic loading rate on anaerobic digestion of food waste under mesophilic and thermophilic conditions. *Energy Fuels*, vol.31, 2976-2984, (2017)
38. Meegoda, J N, Li B, Patel, K, Wang, L B, A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion, *Int J Environ Res Public Health*, vol.15, No.10, October 11 (2018)
DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph15102224>
39. Karlsson A., Björn A., Yekta S. S., and Svensson B., Improvement of the biogas production process, 2014, Linköping University, Linköping, Sweden.
40. Verma, S., Anaerobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solid Wastes. Master's Thesis, Columbia University, New York, NY, USA, (2002)
41. Shiplu Sarker, Jacob J. Lamb, Dag R. Hjelm and Cristian M. Lien, A Review of the Role of Critical Parameters in the Design and Operation of Biogas Production Plants, *Appl. Sci.*, vol.9, No.9, (2019)
DOI: <https://doi.org/10.3390/app9091915>
42. Liu, Y., Zhang, Y., Quan, X., Li, Y., Zhao, Z., Meng, X., Chen, S., Optimization of anaerobic acidogenesis by adding Fe₀ powder to enhance anaerobic wastewater treatment. *Chem. Eng. J.*, (2012)
43. Snežana Nemeš, Obnovljivi izvori energije, diplomski rad, Prirodno-matematički fakultet (Departman za fiziku), Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, jul (2007)
[https://www.df.uns.ac.rs/wp-content/uploads/publikacije/snezana_nemes_-_diplomski_rad_\(d-481\).pdf](https://www.df.uns.ac.rs/wp-content/uploads/publikacije/snezana_nemes_-_diplomski_rad_(d-481).pdf)
44. U.S. Army Corps of Engineers, DEPARTMENT OF THE ARMY, Environmental quality, LANDFILL GAS COLLECTION AND TREATMENT SYSTEM, Washington, DC 20314-1000, Aprile 30, (2013)
https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_200-1-22.pdf

45. Romić Jure, Proizvodnja bioplina iz komunalnog otpada, Diplomski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, (2023)
<https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:934648>
46. Pokrajinski sekretarijat za energetiku i mineralne sirovine, DEPARTMAN ZA INŽINJERSTVO ZAŠTITE ŽIVOTNE SREDINE, STUDIJA MOGUĆNOSTI KORIŠĆENJA KOMUNALNOG OTPADA U ENERGETSKE SVRHE (WASTE TO ENERGY) NA TERITORIJI AUTONOMNE POKRAJINE VOJVODINE I REPUBLIKE SRBIJE, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, oktobar (2008)
<https://www.psegs.vojvodina.gov.rs/wp-content/uploads/2013/03/Studija-mogucnosti-koriscenja-komunalnog-otpada-u-energetske-svrhe-u-RS-i-APV-2008.pdf>
47. Moses Jeremiah Barasa Kabeyi and Oludolapo Akanni Olanrewaju, Biogas Production and Applications in the Sustainable Energy Transition, vol.2022, pp. 43, (2022)
48. Abanades, S., Abbaspour, H., Ahmadi, A. et al., A critical review of biogas production and usage with legislations framework across the globe. Int. J. Environ. Sci. Technol., vol.19, No.4, pp. 3377-3400 (2022)
49. Aksha Joshi, Joslin Jose, Nehal Bansiwali, Nisha Soni, Study on Electricity generation through biogas on small scale, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, vol.6, No.4, April (2017)
https://www.ijirset.com/upload/2017/april/81_20_Study_N.pdf
50. Ana S. Dajić, Razvoj procesa završnog tretmana čvrstih i tečnih zagađujućih materija primenom principa čistije proizvodnje, doktorska disertacija, Tehnološki-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, (2019)
<https://nardus.mpn.gov.rs/bitstream/handle/123456789/12106/Disertacija.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
51. N. Džolev, Model energetske iskorisćenja deponijskog gasa na deponijama sa recirkulacijom koncentrata i procesne vode, doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, (2018)
52. Global Methane Initiative, U.S. Environmental Protection Agency, International Best Practices Guide for Landfill Gas Energy Projects, (2012)
https://www.globalmethane.org/documents/toolsres_lfg_ibpgcomplete.pdf
53. Studija izvodljivosti za proizvodnju električne energije iz deponijskog gasa dobijenog na sanitarnim kadama komunalnog otpada deponije „Možura“ D.O.O. Bar, jun (2022)
https://mozura.me/wp-content/uploads/2022/10/Studija-izvodljivosti-sa-idejnim-rjesenjem-za-pretvaranje-energije-biogasa-u-el.-energiju-Deponija-Mozura-Finalni-izvjestaj_24062022.pdf
54. Debora Mignogna, Paolo Ceci, Claudia Cafaro, Giulia Corazzi and Pasquale Avino, Production of Biogas and Biomethane as Renewable Energy Sources: A Review, Appl. Sci. 2023, vol.13, No.18, pp. 10219 (2023)

55. Bozorg, M., Ramírez-Santos, Á.A., Addis, B., Piccialli, V., Castel, C., Favre, E. Optimal process design of biogas upgrading membrane systems: Polymeric vs high performance inorganic membrane materials. *Chem. Eng. Sci.*, vol.225, pp. 11576 (2020)
56. Kougias, P.G., Treu, L., Benavente, D.P., Boe, K., Campanaro, S., Angelidaki, I. Ex-situ biogas upgrading and enhancement in different reactor systems. *Bioresour. Technol.* 2017, vol.225, pp. 429-437, (February, 2017)
57. Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H., Kougias, P.G., Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnol. Adv.* 2018, vol.36, pp. 452-466, (March-April, 2018)
58. Wang, H., Ma, C., Yang, Z., Lu, X., Ji, X., Improving high-pressure water scrubbing through process integration and solvent selection for biogas upgrading. *Appl. Energy* (2020)
59. Khan, I.U., Othman, M.H.D., Hashim, H., Matsuura, T., Ismail, A.F., Rezaei-DashtArzhandi, M., Azelee, I.W., Biogas as a renewable energy fuel - A review of biogas upgrading, utilisation and storage. *Energy Convers. and Manag.*, vol.150, pp. 277-294 (2017)
60. Kapoor, R.; Ghosh, P., Kumar, M., Vijay, V.K. Evaluation of biogas upgrading technologies and future perspectives: A review. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol.26, pp. 11631-11661, (2017)

PRILOG

Tabela 4. Količine otpada deponovane na deponiji „Možura“ za sve gradove u Crnoj Gori u periodu od 2012. godine do 2023. godine

Godine	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Gradovi Crne Gore												
Bar	9.757,71	21.364,81	22.658,66	22.946,07	23.477,34	23.254,30	23.656,88	25.417,74	19.142,54	23.717,94	24.961,88	26.670,90
Ulcinj	4.447,00	9.328,04	9.595,92	10.296,75	10.804,44	12.233,72	12.636,50	14.202,92	9.432,46	13.496,38	13.947,33	15.174,24
Budva	5.960,68	20.676,03	20.684,99	21.483,67	22.280,83	22.785,45	23.795,91	24.765,14	14.586,92	21.263,28	23.778,80	26.876,52
Tivat	543,54	2.366,84		214,34	254,3	4.796,26	7.203,68	8.112,84	3.901,18	5.611,14	6.305,18	5.645,72
Kotor	477,32	7.172,02	9.978,96	11.082,07	10.567,12	10.485,02	11.917,15	10.392,42	12.590,58	12.261,08	15.167,74	20.784,70
Berane	0,00	1.761,00	102,64									
Herceg - Novi									3.684,96			
Firma Hemosan	229,38	319,28	356,37	480,12	344,82	431,80	519,12	480,32	443,60	9.226,94	3.814,88	1.191,22
Neki drugi grad			0,20	15,44	7,86	7,30	12,74	85,20	111,11	38,32	19,52	127,60

