



UNIVERZITET CRNE GORE

METALURŠKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET

TIJANA PIĆURIĆ

**ISKORIŠĆENJE KANALIZACIONOG MULJA U
ENERGETSKE SVRHE**

MASTER RAD

Podgorica, 2024.godina



UNIVERZITET CRNE GORE

METALURŠKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET

ISKORIŠĆENJE KANALIZACIONOG MULJA U ENERGETSKE SVRHE

Studijski program: Zaštita životne sredine

Student: Pićurić Tijana

Broj indeksa: 13/22

Mentor: Prof.dr Jelena Šćepanović

Podgorica, 2024.godina

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU

Ime i prezime: Tijana Pićurić Datum
rođenja: 15.10.2000.

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina diplomiranja: Zaštita životne sredine,
2022.

INFORMACIJE O MASTER RADU:

Metalurško-tehnološki fakultet

Postdiplomske master akademske studije

Smjer: Zaštita životne sredine

Naslov rada: Iskorišćenje kanalizacionog mulja u energetske svrhe

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA:

Datum prijave master rada: 17. 10. 2024.

Datum sjednice Vijeća univerzitetske jedinice na kojoj je prihvaćena tema: 11. 11. 2024.

KOMISIJA ZA OCJENU RADA I PODOBNOSTI MAGISTRANDA:

Prof.dr Jelena Šćepanović, MTF, Podgorica, mentorka

Prof.dr Darko Vuksanović, MTF, Podgorica

Prof.dr Žarko Radović, MTF, Podgorica

KOMISIJA ZA OCJENU RADA I PODOBNOSTI MAGISTRANDA:

Prof.dr Jelena Šćepanović, MTF, Podgorica, mentorka

Prof.dr Darko Vuksanović, MTF, Podgorica

Prof.dr Žarko Radović, MTF, Podgorica

Lektor:Autolektura

Datum odbrane:25.12.2024.

Univerzitet Crne Gore

Metalurško -tehnološki fakultet

IZJAVA O AUTORSTVU

Kandidat: **Tijana Pićurić**

Na osnovu člana 22 Zakona o akademskom integritet, ja, dolje potpisani/potpisana

IZJAVLJUJEM

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

„ISKORIŠĆENJE KANALIZACIONOG MULJA U ENERGETSKE SVRHE“

rezultat sopstvenog istraživačkog rada, da nijesam kršio/kršila autorska prava i koristio/koristila intelektualnu svojinu drugih lica i da je navedeni rad moje originalno dijelo.

U Podgorici,

Potpis studenta

IZJAVA O AUTORSTVU

Kandidat: **Tijana Pićurić**

Na osnovu člana 22 Zakona o akademskom integritet, ja, dolje potpisani/potpisana

IZJAVLJUJEM

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

„ISKORIŠĆENJE KANALIZACIONOG MULJA U ENERGETSKE SVRHE“

rezultat sopstvenog istraživačkog rada, da nijesam kršio/kršila autorska prava i koristio/koristila intelektualnu svojinu drugih lica i da je navedeni rad moje originalno dijelo.

U Podgorici,

Potpis studenta

ZAHVALNICA

Veliku zahvalnost dugujem mojoj mentorki prof.dr Jeleni Šćepanović na pruženoj prilici da se detaljnije bavim ovom inspirativnom tematikom. Veliko hvala na pomoći prilikom razrade ovog rada.

Želim da se zahvalim i članovima komisije prof.dr Darku Vuksanoviću i prof.dr Žarku Radoviću na užurnosti i sugestijama.

Najveću zahvalnost za neizmjereno razumijevanje i motivaciju dugujem mojoj porodici koja je uvijek bila uz mene i pružala mi bezrezervnu podršku u svemu.

Izvod

Ovaj rad istražuje potencijal za efikasnu upotrebu kanalizacionog mulja u proizvodnji energije, s fokusom na održivost i smanjenje ekološkog uticaja. Istraživanje potvrđuje da tretiranje kanalizacionog mulja kao resursa, a ne otpada, može značajno doprinijeti smanjenju emisije gasova sa efektom staklene bašte i smanjenju upotrebe fosilnih goriva. Primjenom naprednih tehnologija kao što su anaerobna digestija i zgazinjavanje, održivost ovog pristupa je dokazana. Rezultati sugerišu da je moguće ostvariti dvostruke koristi, i ekološke i ekonomske, kroz valorizaciju mulja na ovaj način.

Ključne riječi: Kanalizacioni mulj, održivost, energetska valorizacija, anaerobna digestija, ekološki uticaj

Abstract

This paper explores the potential for efficient use of sewage sludge in energy production, with a focus on sustainability and reducing environmental impact. The research confirms that treating sewage sludge as a resource rather than waste can significantly contribute to reducing greenhouse gas emissions and decreasing the use of fossil fuels. By employing advanced technologies such as anaerobic digestion and gasification, the sustainability of this approach has been demonstrated. The results suggest that it is possible to achieve dual benefits, both environmental and economic, through the valorization of sludge in this manner.

Keywords: Sewage sludge, sustainability, energy valorization, anaerobic digestion, environmental impact

Sadržaj

UVOD.....	1
1. PREGLED TEHNOLOGIJA ZA PRETVARANJE MULJA U BIOENERGIJU.....	4
1.1 Biohemijska konverzija	4
1.1.1 Aerobna digestija	4
1.1.2 Anaerobna digestija	8
1.1.3 Alkoholna fermentacija	11
1.2 Metode mikrobne fermentacije	12
1.2.1 Biofotoliza	12
1.2.2 Tamna fermentacija	13
1.2.3 Foto-fermentacija	14
1.2.4 Fotokataliza	16
1.3 Termohemijske metode za dobijanje električne energije	18
1.3.1 Spaljivanje	18
1.3.2 Proliza	21
1.3.3 Gasifikacija	24
1.3.4 Hidrotermalna karbonizacija	26
1.3.5 Hidrotermalna likvifikacija	28
2. EKOLOŠKI I REGULATORNI ASPEKTI.....	30
2.1. Smanjenje emisija i ekološki uticaji	30
2.1.1. Komparacija biohemijske konverzije sa tradicionalnim metoda obrade kanalizacionog mulja	30
2.1.2. Komparacija termohemijskih i tradicionalnih metoda obrade kanalizacionog mulja	31
2.1.3. Komparacija hidrotermalnih postupaka i tradicionalnih metoda obrade kanalizacionog mulja	35
2.2. Regulatorni zahtjevi.....	36
2.2.1. Međunarodni zakoni i regulative	36
2.2.2. Nacionalni propisi	37
2.2.3. Analiza zahtjeva i standarda.....	38
2.2.4. Presjek stanja upravljanja kanalizacionim muljem u Crnoj Gori	39
2.2.6. Usklađenost sa ciljevima održivog razvoja (SDG)	47
2.3. Održivo upravljanje otpadom	48
ANALIZA NAUČNIH STUDIJA I TEHNOLOŠKIH DOSTIGNUĆA.....	49
3. PREPORUKE ZA PRAKTIČNU PRIMJENU	57
3.1. Smjernice za implementaciju	58
3.2. Preporuke za dalji razvoj tehnologija	58
3.3. Strategije za ekonomsku održivost	60
4. ZAKLJUČAK	61
LITERATURA	63

UVOD

Kanalizacioni mulj predstavlja bogat izvor organske materije koji nastaje kao nusprodukt procesa prečišćavanja otpadnih voda u postrojenjima za preradu komunalnih otpadnih voda. S obzirom na rastuću globalnu potražnju za električnom energijom i sve veće izazove u vezi sa održivim razvojem i upravljanjem otpadom, istraživanje potencijala kanalizacionog mulja za proizvodnju električne energije postaje sve aktuelnije. Ovo istraživanje je posebno relevantno s obzirom na činjenicu da se kanalizacioni mulj često smatra samo otpadnim proizvodom, dok se ne prepoznaje njegov potencijal kao resursa za proizvodnju električne energije. Osim toga, s obzirom na sve veću zabrinutost zbog emisija gasova sa efektom staklene bašte i potrebe za stvaranjem dostupnih izvora električne energije (tzv. "exergy"), istraživanje potencijala ovog oblika energije može pružiti korisne uvide u smanjenje zagađenja i promociju održivijih energetske rješenja. Takođe, praktična primjena tehnologije za pretvaranje kanalizacionog mulja u električnu energiju omogućice razvoj održivih energetske rješenja u Crnoj Gori. Master rad pokazuje temeljnu analizu potencijala korišćenja kanalizacionog mulja u svrhu proizvodnje električne energije. Analizom različitih tehnoloških pristupa i procesa za konverziju mulja u električnu energiju, istražujemo ne samo tehničku izvodljivost, već i širi uticaj ovog pristupa na ekologiju i društvo. Fokus nije samo na istraživanju tehnologija, već i na razumijevanju kompleksnih uticaja primjene mulja na društvenu zajednicu i životnu sredinu. Identifikacija ključnih izazova i prepreka pomaže u razvoju smjernica za efikasno korišćenje ovog resursa, doprinoseći kreiranju održivih energetske rješenja. Kroz sagledavanje potencijalnih nepoznatih aspekata ovog procesa, istraživanje teži stvaranju puta ka optimalnom iskorišćavanju kanalizacionog mulja kao važnog resursa za energetiku.

Istraživanje tehnologija za proizvodnju električne energije iz kanalizacionog mulja proizilazi iz sve veće potrebe za pronalaženjem održivih energetske rješenja čijom primjenom se može efikasno upravljati velikim količinama otpada. Svjetska proizvodnja otpadnih voda je ogromna i očekuje se da će rasti u narednim decenijama, a veliki dio te otpadne vode ostaje neobrađen što predstavlja ozbiljnu prijetnju po životnu sredinu. Osim toga, postojeći načini upravljanja kanalizacionim muljem, poput korišćenja za poljoprivredu ili deponovanja na otpadnim mjestima, često su neefikasni i skupi, te stvaraju dodatne probleme poput zagađenja voda i zemljišta. Korišćenje naprednih tehnologija za konverziju kanalizacionog mulja u električnu ili toplotnu energiju predstavlja održivo rješenje koje može istovremeno da smanji količinu otpada i da ga valorizuje. Stoga je istraživanje ovih tehnologija ključno za unaprijeđenje

energetske efikasnosti, smanjenje emisija gasova sa efektom staklene bašte (GHG) i efikasnije upravljanje otpadom. Ovo istraživanje ima za cilj sveobuhvatno sagledavanje potencijala kanalizacionog mulja za proizvodnju električne energije, s posebnim naglaskom na njegovu važnost u svjetlu rastuće globalne potražnje za energijom. Istražuju se različiti tehnološki pristupi za konverziju mulja u električnu energiju, s ciljem identifikacije najefikasnijih i najodrživijih rješenja. Osim tehničkih aspekata, posebna pažnja posvećuje se evaluaciji ekoloških i društvenih uticaja, uključujući smanjenje zagađenja i promociju održivih energetske rješenja. Takođe, istraživanje prepoznaje ključne izazove i prepreke koji mogu otežati efikasno korišćenje kanalizacionog mulja, te pruža smjernice za njegovo optimalno iskorišćavanje u energetici. Kroz ova istraživanja, teži se stvaranju puta ka optimalnom iskorišćavanju kanalizacionog mulja kao važnog resursa za proizvodnju električne energije, istovremeno doprinoseći održivijoj energetici i zaštiti životne sredine.

Osnovna pretpostavka ovog istraživanja leži u ideji da efikasna upotreba kanalizacionog mulja u proizvodnji energije može podstaći održivosti i smanjenju negativnog ekološkog uticaja. S obzirom na često zanemareni status kanalizacionog mulja kao resursa, ova hipoteza sugerise da se njegovo iskorišćenje može pokazati kao ekološki prihvatljiva opcija, otvarajući mogućnosti za proizvodnju električne energije. Ovo proizilazi iz potrebe da se istraži potencijal kanalizacionog mulja kao dostupnog izvora energije u kontekstu rastućih izazova u vezi sa održivim razvojem i upravljanjem otpadom. U mnogim urbanim sredinama širom svijeta, kanalizacioni mulj se tretira kao otpadni proizvod i često se deponuje na odlagalištima, što može izazvati štetne uticaje na životnu sredinu. Međutim, takav pristup ne iskorišćava potencijal ovog resursa za proizvodnju električne energije i može predstavljati propuštenu priliku za smanjenje zagađenja i eksploatacije fosilnih goriva. Time se sugerise da bi efikasno iskorišćenje kanalizacionog mulja u energetske svrhu moglo imati dvostruke koristi: smanjenje zagađenja životne sredine putem efikasnog tretmana otpada i proizvodnju električne energije koja bi mogla doprinijeti smanjenju emisija gasova sa efektom staklene bašte. Ova hipoteza implicira da je potrebno ispitati tehnološke i ekološke aspekte ovog procesa kako bi se utvrdilo da li je iskorišćenje kanalizacionog mulja u energetske svrhu stvarno održiva opcija. U srcu istraživanja leži pitanje kako najbolje iskoristiti potencijal kanalizacionog mulja kao dostupnog izvora energije. Fokusirajući se na faktore poput tehničke izvodljivosti, ekonomske održivosti i uticaja na okolinu, istraživačko pitanje postavlja temelje za identifikaciju ključnih izazova i potencijalnih koristi u korišćenju ovog resursa.

U ovom istraživanju biće primijenjene raznovrsne naučne, istraživačke i projektne metode s ciljem testiranja postavljenih hipoteza i istraživačkog pitanja, kao i prikupljanja relevantnih podataka, analize rezultata i izvođenja zaključaka koji će doprinijeti ostvarivanju ciljeva istraživanja. Metoda literaturne analize koristiće se za pregled i analizu naučne literature, istraživačkih studija i tehničkih izvještaja kako bi se steklo dublje razumijevanje teorijskih osnova i postojećih praksi u oblasti korišćenja kanalizacionog mulja za energetske svrhe. Analiza podataka prikupljenih iz različitih izvora, kao što su istraživačke studije i javno dostupne baze podataka, omogućiće identifikaciju trendova i faktora koji utiču na iskorišćenje ovog resursa. Intervjui sa stručnjacima i ankete među zainteresovanim stranama pružiće dodatne uvide u trenutne prakse, izazove i mogućnosti u energetici. Studije slučaja postojećih projekata poslužiće za analizu konkretnih primjena i iskustava iz stvarnih situacija. Sve ove metode će se međusobno dopunjavati kako bi se osigurala sveobuhvatna analiza i interpretacija rezultata, omogućavajući bolje razumijevanje potencijala i izazova korišćenja kanalizacionog mulja kao resursa za proizvodnju električne energije.

Predviđeni ishodi istraživanja obuhvataju širok spektar ključnih aspekata koji su od izuzetne važnosti za dalji razvoj i praktičnu primjenu tehnologija korišćenja kanalizacionog mulja u proizvodnji električne energije. Prvo, istraživanje će identifikovati optimalne tehnološke procese za pretvaranje kanalizacionog mulja u električnu energiju. Ovo uključuje procjenu različitih tehnoloških pristupa, kao što su anaerobna digestija, termička konverzija, fermentacija i druge metode, te analizu njihovih prednosti, nedostataka i potencijala za skaliranje na različitim nivoima. Drugo, očekuje se detaljna procjena energetskog potencijala kanalizacionog mulja kao resursa za proizvodnju električne energije. To uključuje kvantifikaciju dostupnih energetskih resursa u kanalizacionom mulju, procjenu potencijalne proizvodnje električne, toplotne ili drugih oblika energije, kao i analizu faktora koji utiču na efikasnost procesa konverzije. Treće, istraživanje će se fokusirati na procjenu ekoloških uticaja korišćenja kanalizacionog mulja u energetici. To obuhvata analizu emisija gasova sa efektom staklene bašte, potencijalne negativne uticaje na životnu sredinu kao i identifikaciju mogućnosti za smanjenje ekološkog uticaja ovih procesa. Konačno, očekuje se da će rezultati ovog istraživanja imati praktičnu primjenu u planiranju i implementaciji projekata korišćenja kanalizacionog mulja za proizvodnju električne i toplotne energije. To uključuje razvoj smjernica i preporuka za industrijske aktere, vladine institucije i druge donosioce odluka, kako bi se podržala efikasna i održiva upotreba ovog resursa.

1. PREGLED TEHNOLOGIJA ZA PRETVARANJE MULJA U BIOENERGIJU

Ovo poglavlje obuhvata razne tehnike i procese koji se koriste za pretvaranje organskih materijala u energiju putem biohemijskih i termohemijskih metoda.

1.1 Biohemijska konverzija

Biohemijska konverzija podrazumijeva upotrebu kvasca i/ili specijalizovanih bakterija za pretvaranje biomase ili otpada u korisne izvore energije. Ključni procesi u ovom pristupu uključuju anaerobnu digestiju, alkoholnu fermentaciju i fotobiološke tehnike, pri čemu svaki od njih dovodi do proizvodnje različitih vrsta biogoriva. Ove metode koriste prirodne metaboličke sposobnosti mikroorganizama za razgradnju organskih materijala, čime se na kraju dobija energijom bogat spoj koji se može iskoristiti kao održiva opcija goriva.

1.1.1 Aerobna digestija

Aerobna digestija, kao i anaerobna digestija, koristi se za stabilizaciju organske materije u čvrstim otpadnim materijama, smanjenje količine mulja, te smanjenje patogena i neprijatnih mirisa. Glavna razlika između ove dvije metode leži u prisustvu kiseonika u aerobnoj digestiji, što dovodi do formiranja oksidovanih jedinjenja poput ugljen-dioksida, nitrata i sumpordioksida, za razliku od metana, organskih kiselina, amonijaka i sulfida koji se proizvode u anaerobnim uslovima. Mikroorganizmi u aerobnoj digestiji troše sopstvene zalihe i ćelijsku protoplazmu kako bi preživjeli, što rezultira biološki stabilnim materijalom pogodnim za različite metode odlaganja [1].

Aerobna digestija je biološki proces koji se odvija u prisustvu kiseonika, pri čemu bakterije u aktivnom mulju koriste kiseonik da bi razgradile organsku materiju, pretvarajući je u ugljen-dioksid i vodu. Tokom ovog procesa, aerobni mikroorganizmi stvaraju čestice koje se mogu sedimentirati i ukloniti iz otpadnih voda, dok se preostali mikroorganizmi vraćaju u aeracioni proces kako bi nastavili razgradnju nove organske materije. Time se održava gusta kultura aerobnih mikroorganizama u aeracionom rezervoaru, što omogućava efikasno oksidovanje organske materije u ugljen-dioksid i vodu u predviđenom vremenskom okviru [2].

Osnovni koraci u procesu prerade kanalizacionog mulja su: (1) aeracija otpadnih voda u prisustvu aerobnih mikroorganizama, (2) recirkulacija istaloženih bioloških čvrstih materija nazad u aerirane otpadne vode, i (3) uklanjanje bioloških čvrstih materija sedimentacijom. U primarnom tretmanu otpadnih voda, supstance kao što su sediment i ulje se uklanjaju, a zatim

se organska materija razgrađuje korišćenjem kiseonika. Tokom ovog procesa, nusprodukti su toplota, voda i ugljen-dioksid [3,4].

Digestovani mulj se zatim prebacuje na viši nivo, gdje se dalje tretira u centrifugama za dehidraciju. Ovaj mulj se prije toga usmjerava kroz aerobne digestore. Uobičajeno je da se jedan digester puni dok se u drugom odvija proces digestije, a njegov sadržaj se zatim preusmjerava u centrifuge za dehidraciju. Glavni operativni elementi aerobnih digestora uključuju bazene, opremu za supernatant ili dekantiranje, aeraciju, operativnu strategiju, primjenu na zemljištu i odlaganje na deponijama [5].

Prvi korak u razvijanju aerobnog tretmana je adsorpcija i djelimična metabolizacija organskih materija, nakon čega mikrobiološka biomasa formira pelete i taloži se, omogućavajući dobijanje bistrice otpadne vode. Jedan od izazova u aerobnom tretmanu je relativno niska gustina mikrobiološke biomase u reaktoru, što može uticati na efikasnost procesa [6].

Jedan od ključnih elemenata aerobnog digestivnog sistema je njegova sposobnost da izdrži sve vrste otpadnih voda, uključujući one sa visoko promjenjivim sastavom i povremenim prisustvom toksičnih supstanci. Poboljšanje metaboličke raznolikosti mikrobiološke zajednice može se postići pružanjem matrica u kojima mikroorganizmi mogu kolonizovati, stvarajući time raznovrsniju mikrobiološku zajednicu. Aerobna degradacija je slična procesu aktivnog mulja, pri čemu se ćelijska tkiva bakterija oksiduju u prisustvu kiseonika, ugljen-dioksida i amonijaka, a dio ćelijskog tkiva se razgrađuje u inertne i biorazgradive organske supstance [7].

Određeni parametri su ključni za efikasan dizajn i operaciju sistema aerobne digestije. Hidrauličko vrijeme zadržavanja (HRT) označava koliko dugo otpadna voda ostaje u sistemu za tretman i varira od 10 do 20 dana, u zavisnosti od vrste mulja—od 10-15 dana za otpadni kanalizacioni mulj do 15-20 dana za kombinaciju primarnog i aktivnog mulja. Opterećenje organskom suvom materijom (ODM) izražava se kao količina ODM po kubnom metru dnevno i kreće se od 1.6 do 4.8 kg/ODM/m³/dan. Biološka potrošnja kiseonika (BPK) po kilogramu potrošenog ODM iznosi između 1.6 i 1.9 kg/kg, dok energetske zahtjevi za miješanje variraju od 20 do 40 kW na 1.000 m³ tretiranog materijala. Količina rastvorenog kiseonika u vodi treba da bude između 1 i 2 mg/l, dok je preporučena temperatura procesa oko 15°C. Efikasnost uklanjanja organske suve materije iznosi između 40 i 50% [8].

Aerobna digestija je ključan proces za stabilizaciju otpadnog aktivnog mulja, smanjujući sadržaj patogena, neprijatne mirise i rizik od truljenja. Tehnologije poput

stabilizacije krečom, termičke obrade, aerobne i anaerobne digestije, kao i kompostiranje, koriste se za postizanje ovih ciljeva. Kompostiranje, koje se bazira na aerobnoj razgradnji organske materije, smanjuje volumen otpada i uništava patogene organizme, dok aerobni mikroorganizmi pretvaraju organsku materiju u ugljen-dioksid, ostavljajući stabilnu supstancu koja može poslužiti kao đubrivo. Ovaj proces simulira prirodne procese, ali u kontrolisanim uslovima, omogućavajući lakše praćenje i održavanje [9].

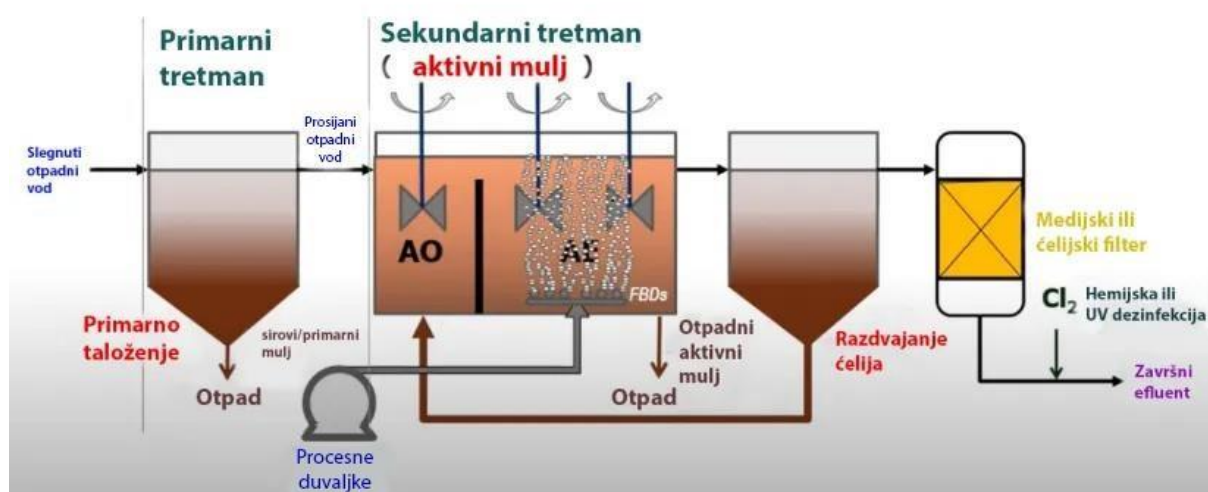
Sušenje mulja je jedan od najkompleksnijih procesa u tretmanu kanalizacionog mulja i zahtijeva visoke operativne troškove. Iako mulj čini samo mali procenat otpadnih voda (1–6%), jedinice za tretman mulja čine čak 50% ukupnih troškova rada postrojenja za preradu otpadnih voda. Zbog toga je odabir najprikladnije metode za zbrinjavanje mulja od velike važnosti. Da bi se olakšalo konačno uklanjanje mulja, potrebno je povećati sadržaj čvrstih materija ili smanjiti sadržaj vode. Uklanjanje mulja može se obaviti vakuumom, presama, horizontalnim trakastim filterima, centrifugalnim metodama ili sušenjem na sušnim krevetima i u lagunama za mulj. Sušenje značajno smanjuje masu mulja, povećavajući sadržaj suve materije sa 20-25% na 90%, ali zahtijeva mnogo energije, oko 2,750–3,100 kJ/kg isparene vode [10].

Aerobna digestija (AD) ima nekoliko prednosti u poređenju sa anaerobnom digestijom, uključujući niže kapitalne troškove, jednostavniji i sigurniji rad, te manji potencijal za neprijatne mirise i eksploziju gasova. Takođe, proizvodi supernatant sa nižom koncentracijom biohemijske potrošnje kiseonika (BPK) i nutrijenata, uklanja amonijačna jedinjenja i postiže sličan stepen uklanjanja nestabilnih suspendovanih čvrstih materija (40–50%), kao AD. Međutim, glavni nedostatak aerobne digestije je visoka energetska potrošnja zbog potrebe za kiseonikom, digestovani mulj nije lako mehanički dehidrirati, osjetljivost na promjene temperature, proizvodnju većih količina mulja za odlaganje i nedostatak energetske proizvodnje [11].

Postoji nekoliko varijacija aerobne digestije, uključujući mezofilnu konvencionalnu, kiseoničku, termofilnu i kriofilnu aerobnu digestiju, pri čemu je mezofilna konvencionalna aerobna digestija najčešće korišćena. Aerobna digestija može biti dizajnirana kao proces sa jednim ili više rezervoara, gdje proces sa više rezervoara omogućava veću efikasnost smanjenjem potrebnog vremena zadržavanja čvrstih materija. Proces se može voditi u mezofilnim (sobna temperatura) ili termofilnim (povišene temperature, obično 55–70°C) uslovima, pri čemu termofilni uslovi omogućavaju brže biohemijske reakcije, smanjujući

vrijeme zadržavanja u reaktoru i veličinu rezervoara, što čini osnovu za autotermalnu termofilnu aerobnu digestiju (ATAD) [12]. ATAD proces se može održavati bez spoljnog izvora toplote, pod uslovom da je mulj dovoljno zgusnut i da je rezervoar dobro izolovan.

Međutim, pri visokim operativnim temperaturama, nedostaci klasične aerobne digestije, poput problema sa mirisom zbog odsustva nitrifikatora, postaju izraženiji. Takođe, smanjena rastvorljivost kiseonika zahtijeva veću potrošnju energije za aeraciju ili upotrebu tehničkog kiseonika visokog stepena čistoće za održavanje biohemijskih procesa [13]. Standardna aerobna digestija može se kombinovati sa procesom konvencionalnog aktivnog mulja (CAS) kako bi se smanjila zapremina otpadnog mulja, što je osnova za proces produžene aeracije. U ovom procesu, produženo vrijeme zadržavanja čvrstih materija omogućava dalju degradaciju organskog i biološkog sadržaja, a sličan pristup se koristi i u kompostiranju [14]. Slika 1.1. prikazuje klasičan proces aerobnog tretmana otpadnih voda kroz sistem aktivnog mulja, koji se odvija u nekoliko faza. Prvo, otpadne vode prolaze kroz filtraciju kako bi se uklonile veće čestice, a zatim kroz primarnu sedimentaciju gdje se odvaja primarni mulj koji se dalje tretira kao otpad. U sekundarnom tretmanu, prečišćena voda prelazi u sistem aktivnog mulja, gdje mikroorganizmi razgrađuju preostalu organsku materiju uz prisustvo kiseonika koji se dodaje putem mjehurića vazduha. Nakon toga, prečišćena voda ulazi u rezervoar za sedimentaciju, gdje se odvaja biološki aktivan mulj od vode; mulj se može vratiti u proces ili ukloniti kao otpad. Konačno, voda prolazi kroz medijski ili membranski filter i dezinfikuje se hemikalijama ili UV zračenjem, čime postaje spremna za ispuštanje kao finalni efluent. Ovaj dijagram jasno prikazuje ključne korake u aerobnom tretmanu otpadnih voda, uključujući prečišćavanje vode i upravljanje muljem [15].



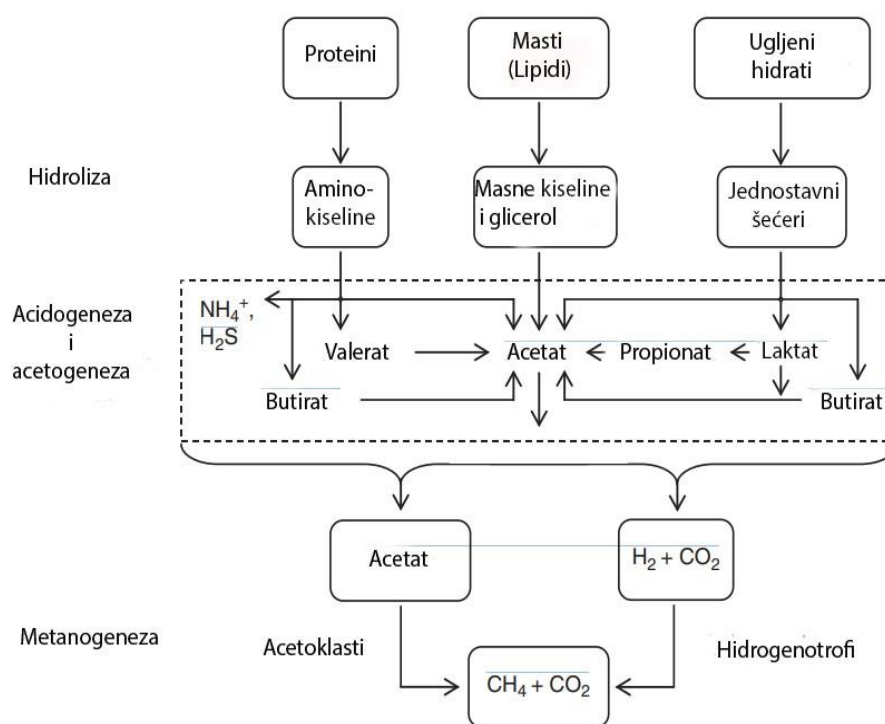
Slika 1.1. Standardna aerobna digestija [15]

1.1.2 Anaerobna digestija

Anaerobna digestija je proces koji se koristi za stabilizaciju organske materije u otpadnim vodama, smanjenje količine mulja, kao i za redukciju patogena i neprijatnih mirisa. Tokom ovog procesa, mikroorganizmi razgrađuju organske materije u odsustvu kiseonika, pri čemu nastaje gas koji se uglavnom sastoji od metana i ugljen-dioksida, poznat kao biogas. Ovaj biogas se može koristiti za grijanje, proizvodnju električne energije ili, ako se pročisti, kao gorivo za vozila ili za ubrizgavanje u gasne mreže [16].

Anaerobna digestija je složen hemijski i biološki proces koji uključuje nekoliko vrsta anaerobnih bakterija i odvija se u tri glavne faze: hidroliza, fermentacija kiselina (acidogeneza) i formiranje metana (metanogeneza). Prema slici 1.2. u fazi hidrolize, složene organske materije poput proteina, masti (lipida) i ugljenih hidrata se razgrađuju u jednostavnije komponente aminokiseline, masne kiseline sa glicerolom i jednostavne šećere.

U fazi acidogeneze i acetogeneze, ovi jednostavni molekuli se dalje konvertuju u nestabilne masne kiseline kao što su valerijanska, sirćetna, propionska i buterna kiselina, uz oslobađanje amonijaka (NH_3) i vodonik-sulfida (H_2S). U završnoj fazi, metanogenezi, sirćetna kiselina (acetat) i gasovi poput vodonika i ugljen-dioksida se konvertuju u metan (CH_4) i ugljen-dioksid (CO_2), uz pomoć specifičnih mikroorganizama acetoklasta i hidrogenotrofa. Ovaj dijagram jasno prikazuje kako se složena organska jedinjenja razgrađuju do jednostavnih molekula, a zatim konvertuju u biogas tokom anaerobne digestije [17].



Slika 1.2. Pojednostavljeni dijagram anaerobne digestije [17]

Kada se organska materija oksidira anaerobno, dešavaju se sljedeće reakcije:

Organska materija $\rightarrow$ CO₂ + CH₄ + nove ćelije + električna energija za ćelije + drugi proizvodi (anaerobne bakterije) (H₂S, H₂, N₂, itd.) [17].

Ovaj proces, poznat i kao metanska fermentacija ili anaerobna stabilizacija mulja, može smanjiti sadržaj organske materije u mulju za 40 do 50%. Postoje dva tipa anaerobne digestije mulja: spora i brza digestija. Spora digestija koristi velike rezervoare sa povremenim zagrijavanjem, dok brza digestija uključuje predzgušnjavanje sirovog mulja, potpuno miješanje, zagrijavanje i ravnomjerno hranjenje sirovim muljem. Količina organske materije koja se unosi u sistem izražava se kao opterećenje čvrstih materija (VS), i obično iznosi 0,5–0,6 kg VS/m³/dan za sporu digestiju i 3,2–7,2 kg VS/m³/dan za brzu digestiju [1]. Vrijeme zadržavanja u sistemu je obično oko mjesec dana, a proces se može odvijati u termofilnim uslovima (na 55°C) ili mezofilnim uslovima (oko 36°C), u jednoj ili dvije faze, sa periodičnim ili kontinuiranim dodavanjem mulja. Biodigestor je struktura koja je hermetički zatvorena, omogućavajući anaerobne uslove za odvijanje procesa. Ovaj proces zahtijeva pažljivu kontrolu temperature, koja treba da bude u mezofilnom (32–38°C) ili termofilnom (50–60°C) opsegu, kao i pH vrijednosti, koja treba da bude oko 6,8 za optimalno funkcionisanje. Metanogeni su osjetljivi na prisustvo teških metala i varijacije pH, što može uticati na efikasnost procesa. Iako anaerobna digestija ima svoje izazove, poput potrebe za zagrijavanjem i kontrolom sastava mulja, ona se široko koristi zbog svoje sposobnosti da smanji količinu biorazgradivog materijala za 55–65%, smanji nivo patogena i proizvede metan kao izvor energije [2].

Anaerobna digestija se tradicionalno koristi za smanjenje zapremine i težine mulja, stabilizaciju mulja, uništavanje patogena i reciklažu bioenergije iz mulja kroz proizvodnju metana. Smatra se da je anaerobna digestija kontrolisaniji i održiviji način tretmana kanalizacionog mulja u poređenju sa drugim metodama kao što su deponovanje ili kompostiranje. Međutim, brzina i efikasnost anaerobne digestije su relativno niske, posebno kada se ne dodaju inokulatori. U posljednjih deset godina razvijena je metoda proizvodnje biovodonika iz kanalizacionog mulja putem anaerobne fermentacije kao odgovor na globalno interesovanje za vodonik kao čisto i efikasno gorivo. Iako se može postići proizvodnja vodonika iz mulja, prinos je niži u poređenju sa drugim supstratima poput glukoze, pa su potrebni dodatni predtretmani, kao što su zamrzavanje, odmrzavanje, sterilizacija i alkalni predtretman, kako bi se postigli veći prinosi vodonika. Takođe, proučavana je sekvencijalna

proizvodnja vodonika i metana iz mulja, što pokazuje mogućnost dobijanja oba gasa iz istog procesa uz upotrebu klostridijum sojeva i predtretmana mulja [17].

Anaerobni sistemi za tretman otpadnih voda imaju nekoliko značajnih prednosti, uključujući proizvodnju biogasa koji se može koristiti kao izvor obnovljive električne energije, čime se smanjuju troškovi energije i doprinosi održivom upravljanju resursima. Pored toga, anaerobni procesi generišu znatno manje količine mulja u poređenju sa aerobnim sistemima, a proizvedeni mulj je stabilizovan i lako dehidriran, što olakšava njegovo odlaganje i smanjuje troškove zbrinjavanja. Ovi sistemi su takođe manje složeni i jeftiniji za implementaciju i održavanje, s obzirom na to da ne zahtijevaju velike količine električne energije za aeraciju, što ih čini energetske efikasnijim. Dodatno, anaerobni tretman je fleksibilan i prilagodljiv različitim vrstama otpadnih voda, posebno onim sa visokim organskim opterećenjem, kao što su otpadne vode iz prehrambene i industrije pića.

Međutim, anaerobni sistemi imaju i nekoliko nedostataka. Nakon tretmana, otpadne vode obično zahtijevaju dodatni post-tretman kako bi ispunile standarde za ispuštanje u recipijent, što može povećati ukupne troškove i složenost sistema. Pored toga, anaerobni procesi mogu proizvesti neugodne mirise, prvenstveno zbog prisustva sumpor-vodonika (H_2S), koji takođe može uzrokovati koroziju opreme, povećavajući troškove održavanja. Ovi sistemi često zahtijevaju duži start-up period kako bi se uspostavila stabilna mikrobiološka populacija, a takođe su osjetljivi na promjene u pH vrijednosti, temperaturi i prisustvu toksičnih supstanci, što može uticati na efikasnost procesa. Uprkos ovim izazovima, anaerobni tretman ostaje ključna tehnologija u slučajevima kada je potrebno tretirati otpadne vode sa visokim organskim opterećenjem i kada postoji fokus na održivo upravljanje energijom.

Većina anaerobnih digestivnih sistema koji se danas koriste u komunalnim postrojenjima za tretman otpadnih voda dizajnirana je kao konvencionalni mezofilni anaerobni digestori (MAD). Ovi sistemi rade u temperaturnom rasponu od približno 32 do 38°C, uz obezbjeđivanje grijanja i miješanja kako bi se održali ujednačeni uslovi unutar digestora. U konvencionalnoj mezofilnoj digestiji, svi procesi anaerobne razgradnje odvijaju se u istom rezervoaru, što može izazvati operativne izazove zbog različitih optimalnih uslova za rast acetogenih i metanogenih bakterija. Ipak, ovaj proces je dobro uspostavljen i, kada se pravilno upravlja, može pouzdano proizvesti stabilizovane biosolide [5].

Termofilna anaerobna digestija (TAD) uključuje jedan ili više stepeni procesa koji se odvijaju na temperaturama od približno 50 do 60°C. Glavna prednost termofilne digestije je

postizanje viših bioloških reakcijskih brzina i povećane redukcije nestabilnih čvrstih materija, što rezultira manjom zapreminom digestora i boljim uništavanjem patogena. Pored toga, TAD pruža poboljšanu dehidraciju, povećanu proizvodnju biogasa i kraće vrijeme zadržavanja. Međutim, ovaj proces zahtijeva znatno više električne energije za grijanje, osjetljiv je na promjene temperature i može uzrokovati pojačani miris digestovanih čvrstih materija u poređenju sa mezofilnim procesom. Takođe, veće koncentracije amonijaka u vodi iz dehidracije mogu uticati na sekundarni tretman otpadnih voda [16].

Kako bi se optimizovala anaerobna digestija, razvijene su strategije koje odvajaju biološke faze ovog procesa, omogućavajući odvojeno stvaranje optimalnih uslova za acidogene i metanogene bakterije. Jedan od pristupa je serijska konfiguracija mezofilne digestije, koja je niskotroškovna opcija, ali ne pruža potpunu separaciju mikrobioloških procesa. Efikasnija separacija zahtijeva kontrolu kinetike (kraće vrijeme zadržavanja za prvu fazu) ili rad prve faze na termofilnim temperaturama. Ove modifikacije, kao što su acid/gas digestija ili temperaturno fazna anaerobna digestija (TPAD), povećavaju kapitalne troškove i složenost procesa, ali donose značajne prednosti u performansama [17].

Acid/gas digestija je dvostepeni proces koji se sastoji od faze kiseline i faze gasa. U prvom digestoru, koji radi sa kratkim vremenom zadržavanja od 1,5 do 2 dana, dolazi do hidrolize supstrata i formiranja nezasićenih masnih kiselina (VFAs). Metanogeni, koji zahtijevaju duže vrijeme zadržavanja, isključeni su iz ovog digestora, koji može raditi na termofilnim ili mezofilnim temperaturama. Nezasićene Masne kiseline se zatim koriste u drugom digestoru, gdje metanogeni proizvode biogas. Ovaj pristup poboljšava redukciju čvrstih materija i povećava proizvodnju gasa, ali efekti mogu biti skromni. Takođe, smanjuje se potencijal za stvaranje pjene. Ako se koristi termofilna faza, proces može zadovoljiti zahtjeve za smanjenje patogena klase A. Međutim, jedan od nedostataka je značajna pojava neprijatnih mirisa u fazi kiseline, kao i niska pH vrijednost koja može uzrokovati koroziju rezervoara i opreme, čime se povećavaju troškovi održavanja [11].

1.1.3 Alkoholna fermentacija

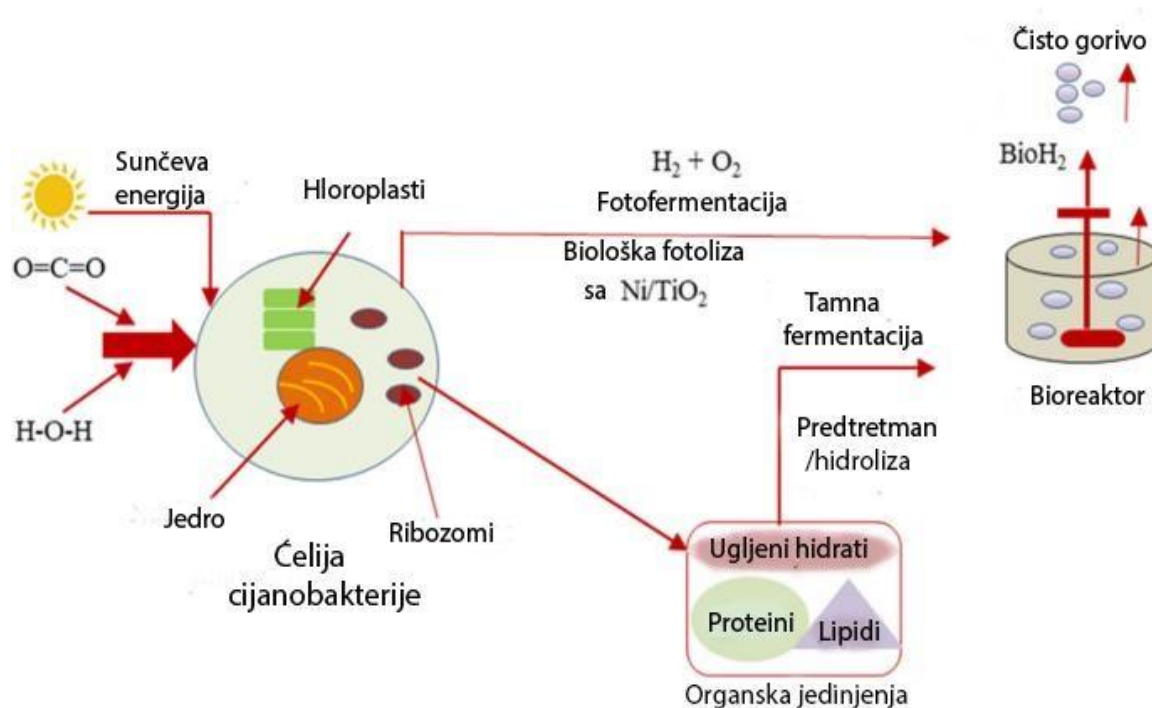
Bioetanol se može dobiti alkoholnom fermentacijom ostataka biomase koji sadrže fermentabilne šećere, a koji se dobijaju razgradnjom celuloze i hemiceluloze iz biomase u prisustvu kvasca ili bakterija [1]. Na primjer, vrste mikroalgi kao što su *Chlorella*, *Chlamydomonas*, *Scenedesmus*, *Dunaliella*, i *Spirulina* sakupljaju velike količine skroba, glikogena i celuloze, koje su ključne sirovine za proizvodnju bioetanola [2]. Međutim,

mikroorganizmima je teško metabolizovati ove složene polisaharide, pa se prije fermentacije vrši hidroliza kako bi se oni razložili na jednostavne šećere [3]. Hidroliza se najčešće izvodi korišćenjem kiselina, baza ili enzima [4]. Kiselinski tretman je brz i jeftin, ali može dovesti do stvaranja nepoželjnih nusprodukata [5]. S druge strane, enzimska obrada je efikasnija i ne stvara neželjene proizvode, ali je sporija i skuplja [6]. Prije hidrolize mogu se primijeniti metode razbijanja ćelija kako bi se povećala efikasnost i skratilo vrijeme hidrolize [7]. Dobijeni sirovi alkohol, koji sadrži 10–15% etanola, mora proći proces koncentracije destilacijom [8]. Preostali čvrsti ostatak može se dalje preraditi u vrijedne proizvode koristeći tečne procese, gasifikaciju ili pirolizu uz pomoć mikrotalasne električne energije [1].

1.2 Metode mikrobne fermentacije

1.2.1 Biofotoliza

Biofotoliza je proces u kojem se svjetlosna energija koristi za razgradnju molekula, u ovom slučaju za proizvodnju vodonika. Kod biofotolize, svjetlost se koristi za razdvajanje vode (H_2O) na kiseonik (O_2) i vodonik (H_2) putem fotosintetičkih mikroorganizama kao što su cijanobakterije. Ovaj proces je zanimljiv jer predstavlja održiv način proizvodnje vodonika, obnovljivog i čistog izvora električne energije.



Slika 1.3. Grafički prikaz biofotolize [8]

Slika 1.3. prikazuje proces proizvodnje čistog goriva, odnosno vodonika (BioH_2), korišćenjem cijanobakterija kroz nekoliko bioloških i fotokatalitičkih metoda. U centru slike je ćelija cijanobakterija koja koristi solarnu energiju (svjetlost) i ugljen-dioksid (CO_2), zajedno sa vodom (H_2O), za fotosintezu u hloroplastima, proces koji se odvija u prisustvu sunčeve svjetlosti. Unutar cijanobakterijske ćelije, fotosinteza u hloroplastima vodi ka produkciji ugljenih hidrata, proteina i lipida, koji su osnovne komponente organskog materijala. Ove komponente mogu biti pretvorene u vodonik (BioH_2) kroz različite procese. Na primjer, ugljeni hidrati, proteini i lipidi prvo prolaze kroz predtretman ili hidrolizu, a zatim tamnu fermentaciju, gdje se dalje razgrađuju, proizvodeći vodonik i ugljen-dioksid. Alternativno, bioprotoliza, koja se odvija sa Ni/TiO_2 katalizatorom, koristi ove organske materije za direktno dobijanje vodonika. Fotofermentacija je još jedan proces prikazan na slici, gdje se cijanobakterije koriste za proizvodnju vodonika u prisustvu svjetlosti. Svi ovi procesi se odvijaju unutar bioreaktora, gdje se vodonik i kiseonik ($\text{H}_2 + \text{O}_2$) generisani tokom ovih reakcija skupljaju i pročišćavaju kako bi se dobilo čisto gorivo, odnosno BioH_2 , koji se može koristiti kao obnovljivi izvor električne energije.

1.2.2 Tamna fermentacija

Tamna fermentacija kanalizacionog mulja predstavlja anaerobni biološki proces u kojem se organski materijali razgrađuju putem mikroorganizama, rezultirajući proizvodnjom bio-vodonika (Bio-H_2) i drugih nusproizvoda. Ovaj proces se odvija u odsustvu svjetlosti i kiseonika, i koristi bakterije koje su specijalizovane za ovakve uslove, čineći ga efikasnim načinom za pretvaranje otpadnih organskih materijala u obnovljivu energiju.

U osnovi, tamna fermentacija započinje razgradnjom složenih organskih molekula, poput ugljenih hidrata, proteina i lipida, u manje jedinice putem anaerobnih bakterija. Primarni proces koji se dešava tokom tamne fermentacije je glikoliza, u kojoj se šećeri poput glukoze pretvaraju u piruvat. Ovaj proces oslobađa energiju koju mikroorganizmi koriste za preživljavanje i rast. Tokom razgradnje piruvata, dolazi do formiranja acetil-koenzima A, kao i ugljen-dioksida (CO_2) i vodonika (H_2), pri čemu je vodonik osnovni korisni produkt.

Kanalizacioni mulj, koji obično sadrži mješavinu organskih supstanci poput ostataka hrane, fekalija i drugih biorazgradivih materijala, pruža idealan supstrat za tamnu fermentaciju zbog visokog sadržaja organskih materija, naročito ugljenih hidrata. Mikroorganizmi prisutni u mulju, uključujući fakultativne i striktno anaerobe, razgrađuju ove organske supstance u jednostavnije molekule, oslobađajući pri tome vodonik i druge nusproizvode, poput

ugljendioksida i male količine metana. Ovaj proces je posebno značajan za gradove i industrijske centre gdje se generišu velike količine kanalizacionog mulja, jer omogućava njegovo pretvaranje u vrijedan energetske resurs.

Mikrobne gorivne ćelije (MGC) predstavljaju naprednu tehnologiju koja koristi mikroorganizme za pretvaranje organske materije u električnu energiju, posebno efikasno tretirajući kanalizacioni mulj. Autori dalje detaljno analiziraju tehničku izvodljivost MGC-a, s posebnim naglaskom na optimizaciju bio-elektroemijskih procesa kako bi se maksimizirala proizvodnja električne energije i smanjio ekološki uticaj. Autori ističu da ova tehnologija ima veliki potencijal za integraciju u održive sisteme za tretman kanalizacionog mulja, pružajući ekološke i ekonomske koristi za zajednice koje je primjenjuju. U ovom radu, takođe su istraženi različiti parametri, kao što su izbor mikroorganizama, tipovi elektroda i operativni uslovi, kako bi se postigla optimalna efikasnost MGC-a u praksi [11].

Jedan od ključnih aspekata tamne fermentacije je mogućnost integracije sa drugim tehnologijama, kao što su mikrobijalne elektrolizne ćelije (MEC), što može dodatno povećati proizvodnju vodonika. Ovaj integrisani pristup omogućava bolju efikasnost i veću iskorišćenost supstrata, što rezultira većim prinosom vodonika. Na primjer, studije su pokazale da kombinacija tamne fermentacije sa pirolizom kanalizacionog mulja može dovesti do proizvodnje biomase, koja ima primjenu u tretmanu otpadnih voda i proizvodnji energije [4, 5].

Dalje, upotreba kanalizacionog mulja kao resursa za proizvodnju električne energije kroz tamnu fermentaciju doprinosi održivom upravljanju otpadom. Korišćenje mulja na ovaj način ne samo da smanjuje potrebu za njegovim odlaganjem na deponije, već i smanjuje emisije gasova sa efektom staklene bašte (GHG), što je ključni korak ka održivoj budućnosti [6]. Takođe, tehnologija mikrobijalnih gorivnih ćelija (MFC) može biti komplementarna tamnoj fermentaciji, jer omogućava proizvodnju električne energije direktno iz otpadnih materijala, dodatno povećavajući efikasnost cijelog procesa [7].

1.2.3 Foto-fermentacija

Fotofermentacija je sofisticirani biološki proces u kojem specifične bakterije koriste svjetlosnu energiju za pretvaranje organskih supstrata u vodonik (H_2) i ugljen-dioksid (CO_2) u anaerobnim uslovima. Ovaj proces je značajan zbog svoje sposobnosti da proizvodi vodonik kao čisti izvor električne energije, koristeći otpadne organske materijale. Fotofermentacija se

oslanja na bakterije koje su fotoheterotrofne, što znači da one koriste svjetlost kao izvor energije, dok istovremeno metabolišu organske supstance za dobijanje ugljenika [7]. Najvažniji mikroorganizmi u procesu fotofermentacije su purpurne nesumporne bakterije (PNSB), među kojima su najpoznatiji rodovi *Rhodobacter* i *Rhodopseudomonas*. Ove bakterije su izuzetno prilagodljive i mogu da koriste širok spektar organskih supstrata, uključujući fermentacione kiseline (kao što su acetat, butirat), alkohole (etanol, propanol), te šećere kao što je glukoza. Ova sposobnost čini ih idealnim za proizvodnju vodonika iz raznovrsnih biomaterijala, uključujući otpadne vode i druge organske otpade [8].

U procesu fotofermentacije, bakterije koriste svjetlosnu energiju koja se apsorbuje kroz fotosintetičke pigmente poput hlorofila i karotenoida. Ovi pigmenti su smješteni u unutrašnjim membranama bakterija, gdje igraju ključnu ulogu u apsorpciji svjetlosti i pretvaranju te energije u hemijsku energiju. Tokom ovog procesa, svjetlosna energija se koristi za pokretanje fotosintetičkog lanca transporta elektrona, gdje se elektroni prenose do proteina zvanog feredoksin [7].

Feredoksin, koji djeluje kao prenosilac elektrona, prenosi elektrone do nitrogenaze, ključnog enzima u procesu fotofermentacije. Nitrogenaza je odgovorna za redukciju protona (H^+) u molekularni vodonik (H_2). Ova reakcija je energetski zahtjevnija, ali je ključna za proizvodnju vodonika u bakterijama [8].

Za optimalan rad nitrogenaze, potrebni su specifični uslovi. Najvažniji je niska koncentracija azota u okruženju, jer kada su azotne materije ograničene, bakterije preusmjeravaju svoju energiju ka proizvodnji vodonika umjesto sinteze proteina i drugih azotnih jedinjenja. Ovo čini fotofermentaciju efikasnijom u proizvodnji vodonika u poređenju sa drugim biološkim procesima [9].

Fotofermentacija, iako obećavajuća, suočava se s nizom izazova. Jedan od najvećih je relativno niska efikasnost pretvaranja svjetlosne energije u vodonik, što može ograničiti primjenjivost ove tehnologije u velikim razmjerama. Drugi izazov je niska efikasnost proizvodnje vodonika, što znači da su potrebni veliki bioreaktori za proizvodnju značajnih količina vodonika. Pored toga, procesi fotofermentacije obično zahtijevaju kontrolisane uslove i čiste bakterijske kulture, što može biti skupo i nepraktično u industrijskim uslovima [10]. Zbog ovih izazova, istraživanja se fokusiraju na nekoliko pravaca poboljšanja. Prvi je razvoj novih bioreaktora koji maksimiziraju upotrebu svjetlosti i poboljšavaju efikasnost proizvodnje vodonika. Drugi pravac je genetičko inženjerstvo bakterija s ciljem stvaranja sojeva koji imaju poboljšanu

sposobnost za proizvodnju vodonika, otpornost na nepovoljne uslove i smanjenu potrebu za specifičnim nutrijentima [11]. Na kraju, fotofermentacija se može kombinovati sa drugim fermentativnim procesima, kao što je tamna fermentacija, kako bi se povećala ukupna proizvodnja vodonika [12].

1.2.4 Fotokataliza

Fotokataliza kanalizacionog mulja je napredna tehnologija za tretman otpadnih voda koja koristi kombinaciju svjetlosti i katalizatora kako bi razgradila organske zagađivače prisutne u mulju. Ova metoda postaje sve važnija zbog potrebe za smanjenjem količine mulja koji nastaje tokom procesa prečišćavanja otpadnih voda. Fotokatalitički proces se pokazao kao efikasno rješenje koje ne samo da smanjuje količinu mulja, već i poboljšava njegova svojstva, čineći ga manje štetnim i pogodnijim za dalji tretman ili odlaganje [14].

Fotokataliza, koja koristi svjetlost i katalizatore za pokretanje hemijskih reakcija, istražuje se kao inovativan pristup za valorizaciju kanalizacionog mulja, s ciljem transformisanja ovog otpada u korisne proizvode poput biogasa ili biološki aktivnih supstanci. Određeni autori su posebno istakli potencijal fotokatalize u razgradnji organskih zagađivača, što bi moglo značajno doprinijeti smanjenju ekološkog uticaja i povećanju održivosti upravljanja kanalizacionim muljem. Autori su se fokusirali na efikasnost različitih katalizatora i operativnih uslova, razmatrajući kako optimizacija procesa može maksimizirati prinos korisnih proizvoda, dok se istovremeno minimizira generisanje otpada. Ova istraživanja ukazuju na mogućnost razvoja održivih tehnologija za obradu otpadnih materijala, što je od ključne važnosti za postizanje ekoloških i ekonomskih koristi u budućnosti [16].

Tehnološki proces fotokatalitičkog tretmana mulja sastoji se iz nekoliko ključnih koraka koji su pažljivo optimizovani da bi se postigla maksimalna efikasnost. Prvi korak u ovom procesu je priprema mulja i odabir odgovarajućih katalizatora. Titan-dioksid (TiO_2) je najčešće korišćeni katalizator zbog svoje visoke fotokatalitičke aktivnosti, hemijske stabilnosti i relativno niske cijene. Pored TiO_2 , u ovom procesu se koriste i željezo u različitim oblicima (Fe^{2+} i Fe^0) i vodonik-peroksid (H_2O_2), koji dodatno pojačavaju oksidativne reakcije. Mulj se potom miješa sa ovim katalizatorima u specijalizovanim reaktorima, gdje se izlaže UV svjetlosti.

UV svjetlost igra ključnu ulogu u ovom procesu jer aktivira katalizatore. Proces počinje kada UV svjetlost određene talasne dužine (najčešće UV-A, UV-B ili UV-C) padne na površinu

TiO₂. Ova svjetlost uzrokuje pobuđenje elektrona u kristalnoj rešetki katalizatora, što dovodi do stvaranja parova elektrona i praznina. Ovi parovi potom reaguju sa molekulima vode i kiseonika prisutnim u mulju, stvarajući reaktivne grupe radikala, kao što su hidroksilni radikali (OH). Ovi radikali su izuzetno reaktivni i mogu razgraditi kompleksne organske molekule prisutne u mulju, pretvarajući ih u manje toksične ili potpuno mineralizovane oblike [15].

Optimizacija procesa je od suštinskog značaja za postizanje maksimalnog stepena disintegracije mulja. Faktori poput pH vrijednosti, koncentracije katalizatora, vremena reakcije i vrste UV svjetlosti moraju biti pažljivo kontrolisani. Na primjer, istraživanja su pokazala da je optimalna pH vrijednost za ovaj proces oko 3, što omogućava najefikasniju proizvodnju hidroksilnih radikala. Takođe, koncentracija TiO₂ i H₂O₂, kao i vrsta i intenzitet UV svjetlosti, igraju ključnu ulogu u određivanju efikasnosti procesa. Na osnovu ovih parametara, moguće je značajno smanjiti količinu mulja, istovremeno smanjujući njegovu toksičnost, što olakšava njegovo dalje zbrinjavanje ili upotrebu.

Završni dio procesa obuhvata procjenu efikasnosti tretmana kroz mjerenje stepena disintegracije i analizu toksičnosti tretiranog mulja. Uspješnost tretmana se ogleda u smanjenju čestične veličine mulja, kao i u smanjenju toksičnih komponenti koje mogu negativno uticati na životnu sredinu. Sve ove karakteristike čine fotokatalitički proces izuzetno atraktivnim za primjenu u modernim postrojenjima za prečišćavanje otpadnih voda [18].

Redukcija količine mulja je jedan od ključnih benefita fotokatalitičkog procesa. Ovaj proces može smanjiti ukupnu količinu mulja za 19,2% do 34,6%, što predstavlja značajno smanjenje za postrojenja koja se bave prečišćavanjem otpadnih voda. Ovo smanjenje količine mulja ne samo da smanjuje troškove odlaganja i upravljanja muljem, već i olakšava dalji tretman ili eventualnu ponovnu upotrebu. Manja količina mulja takođe znači manje prostora potrebnog za skladištenje, što može biti od posebnog značaja u urbanim sredinama gdje je prostor ograničen.

Poboljšanje razgradljivosti mulja je još jedna važna primjena fotokatalitičkog procesa. Tokom tretmana, složeni organski zagađivači u mulju se razgrađuju na jednostavnije oblike, što povećava njihovu biorazgradljivost. Ovo poboljšanje omogućava efikasniji dalji tretman, kao što je anaerobna digestija, proces kojim se proizvodi biogas. Biogas je obnovljiv izvor električne energije, što doprinosi održivosti cijelog sistema za prečišćavanje otpadnih voda.

Takođe, smanjenje količine organske materije može smanjiti neugodne mirise i potencijalne probleme s toksičnošću [19].

Smanjenje toksičnosti mulja nakon fotokatalitičkog tretmana predstavlja značajan ekološki benefit. Toksičnost mulja može biti problematična za životnu sredinu, posebno ako se mulj odlaže na zemljište ili koristi u poljoprivredne svrhe. Fotokatalitički tretman razgrađuje toksične supstance i smanjuje ukupnu toksičnost mulja, čime se olakšava bezbjednije odlaganje ili ponovna upotreba mulja. Ovo smanjenje toksičnosti može omogućiti upotrebu mulja kao đubriva ili za druge korisne namjene, smanjujući negativan uticaj na životnu sredinu [10, 14].

Efikasnost fotokatalitičkog tretmana mulja zavisi od niza faktora koji moraju biti pažljivo kontrolisani. Kontrola pH je esencijalna za održavanje stabilnosti procesa i postizanje maksimalne efikasnosti razgradnje zagađivača.

Vrsta UV svjetlosti koja se koristi u procesu je takođe od presudnog značaja. Različite talasne dužine UV svjetla (UV-A, UV-B, UV-C) imaju različite efekte na efikasnost fotokatalitičkog procesa. Na primjer, UV-A svjetlost, sa dužim talasnim dužinama, može prodrijeti dublje u mulj, dok UV-C svjetlost, koja ima kraću talasnu dužinu, generiše više električne energije, što može dovesti do brže i efikasnije razgradnje određenih zagađivača.

Izbor prave vrste UV svjetlosti zavisi od specifične kompozicije mulja i željenih rezultata tretmana.

Katalizatori, kao što su TiO_2 u kombinaciji sa željezom (Fe) ili vodonik-peroksidom (H_2O_2), značajno povećavaju efikasnost fotokatalitičkog procesa. Ove kombinacije mogu povećati stepen razgradnje zagađivača, naročito kada se svi faktori optimalno kombinuju. Kada se TiO_2 koristi zajedno sa Fe ili H_2O_2 , dolazi do sinergijskog efekta koji ubrzava reakcije razgradnje i poboljšava ukupnu efikasnost procesa, čineći ga održivim rješenjem za tretman kanizacionog mulja. Fotokataliza se zbog ovih razloga smatra jednim od najefikasnijih metoda za smanjenje otpada i poboljšanje ekološke prihvatljivosti postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda.

1.3 Termohemijske metode za dobijanje električne energije

1.3.1 Spaljivanje

Spaljivanje kanizacionog mulja je sofisticirana i dobro uspostavljena metoda za konačno zbrinjavanje mulja, nusproizvoda procesa obrade otpadnih voda. Ovaj proces je široko prihvaćen kao alternativa rasprostriraju mulja na zemljištu, zahvaljujući svojoj efikasnosti u smanjenju zapremine otpada i mogućnosti generisanja električne energije. Spaljivanje se temelji na termičkoj razgradnji organskih materijala putem oksidacije, čime se ugljenik, azot, sumpor i fosfor u mulju pretvaraju u gasovite oblike i pretežno anorganske čvrste ostatke [14].

U radu su analizirani termodinamički i kinetički aspekti konverzije kanalizacionog mulja u energetske nosače poput gasa i tečnih goriva. Autori López, Artetxe, Amutio i Bilbao pružili su sveobuhvatan pregled termohemijskih procesa kao što su piroliza, gasifikacija i hidrotermalna karbonizacija. Fokusirali su se na ocjenjivanje efikasnosti ovih procesa i njihovu ekonomsku održivost, istražujući mogućnosti za proizvodnju obnovljive električne energije iz kanalizacionog mulja i ukazali na potencijalne izazove i prilike za primjenu ovih tehnologija u industriji [8].

Spaljivanje se može definisati kao termički tretman u kome se koriste visoke temperature za oksidaciju ugljeničnih materijala. Ovaj proces rezultira oslobađanjem toplote, stvaranjem ugljen-dioksida (CO_2) i drugih gasova, vode, pepela. Toplota koja se generiše tokom sagorijevanja može se iskoristiti za različite svrhe, uključujući proizvodnju toplotne i električne energije, sušenje sirovina i proizvodnju pare putem izmjene toplote. Pepeo, kao preostali čvrsti proizvod, ima potencijal za dalje korišćenje u proizvodnji materijala kao što su keramika, cigle, pjenasti beton i drugi građevinski materijali [18].

Međutim, proces spaljivanja proizvodi i neželjene zagađivače, uključujući jedinjenja sumpora i azota, halogene elemente, teške metale i druge supstance koje mogu značajno zagađivati životnu sredinu. Zbog toga su potrebne dodatne mjere za kontrolu emisija, što povećava troškove procesa. Spaljivanje je visokotemperaturni proces u kojem se dio toplote zadržava u dimnim gasovima, dok se preostala toplota gubi kroz zidove postrojenja [19].

Idealno sagorijevanje u procesu spaljivanja mulja podrazumijeva potpunu oksidaciju goriva.

Ovaj proces se opisuje sledećim reakcijama:



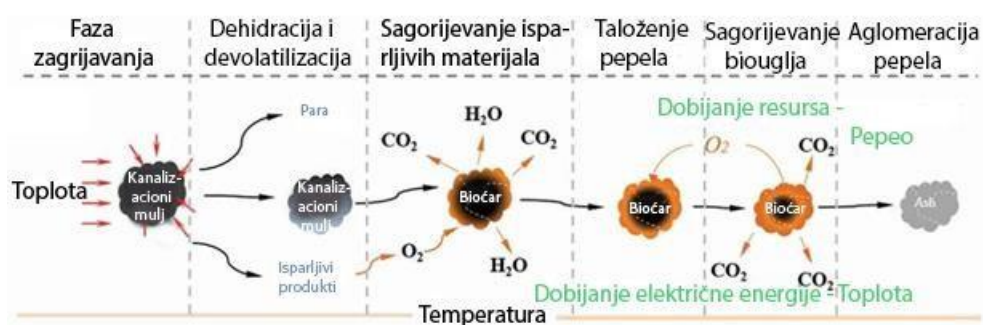
Ove reakcije pokazuju kako vodonik (H_2) i ugljenik (C) reaguju sa kiseonikom (O_2) da bi stvorili vodu i ugljen-dioksid, oslobađajući značajne količine energije. Međutim, u praksi, postizanje potpunog sagorijevanja nije uvijek moguće. U mnogim slučajevima, ugljenik može nepotpuno sagorjeti, pri čemu nastaje ugljen-monoksid (CO) umjesto ugljen-dioksida (CO_2). Da bi se osiguralo dovoljno kiseonika za sagorijevanje, obično se koristi višak vazduha, koji sadrži više kiseonika nego što je stehiometrijski potrebno za potpunu oksidaciju goriva. Prva postrojenja za spaljivanje kanalizacionog mulja postavljena su sredinom 1930-ih godina, a danas u svijetu funkcionišu stotine velikih postrojenja koja sagorijevaju mulj. Mnoge od ovih instalacija, osim što pretvaraju mulj u pepeo, generišu i električnu energiju, čime postaju

energetski pozitivne. Ipak, ukupna energetska efikasnost ovih postrojenja zavisi od potrebe za prethodnim sušenjem mulja, što može uticati na energetski bilans procesa [12].

Najčešće korišćeni reaktori za spaljivanje mulja danas su oni sa fluidizovanim slojem. Ovaj tip reaktora u velikoj mjeri je zamijenio višeslojne peći koje su se ranije koristile.

Fluidizovani slojevi rade na temperaturama između 800 i 900 °C, pod atmosferskim pritiskom. Vrijeme zadržavanja čestica u reaktoru obično iznosi oko dvije sekunde, pri brzinama uzlaznog strujanja vazduha od 0,5 do 1 m/s [9].

Proces sagorijevanja kanalizacionog mulja prolazi kroz nekoliko ključnih faza koje omogućavaju efikasnu konverziju mulja u pepeo i energiju. Prva faza je dehidracija i isparavanje, gdje, pod uticajem visokih temperatura, voda iz mulja isparava, dok se isparljive organske komponente otpuštaju iz površinskog sloja mulja i prodiru ka unutrašnjosti čestica. Kako se temperature dalje povećavaju, te isparljive komponente prolaze kroz slojeve vrućeg koksnog ostatka, koji nastaje kao rezultat devolatilizacije, gdje dolazi do dodatne termičke razgradnje organskih materijala. U drugoj fazi, sagorijevanje isparljivih materijala, oslobođeni gasovi i isparljive supstance dolaze u kontakt sa kiseonikom u komori za spaljivanje, što izaziva njihovo sagorijevanje na površini sirovine. Ovo sagorijevanje rezultira značajnim porastom temperature, dovoljnim da rastopi pepeo koji se formira i stvori sloj rastopljenih kapljica na površini čestica mulja. Na kraju, u fazi aglomeracije pepela, sagorijevanje čvrstog ostatka, uzrokuje aglomeraciju ovih rastopljenih kapljica pepela u stabilnu, čvrstu masu, koja se na kraju izdvaja kao konačni produkt sagorijevanja, spreman za dalju obradu ili odlaganje [19].



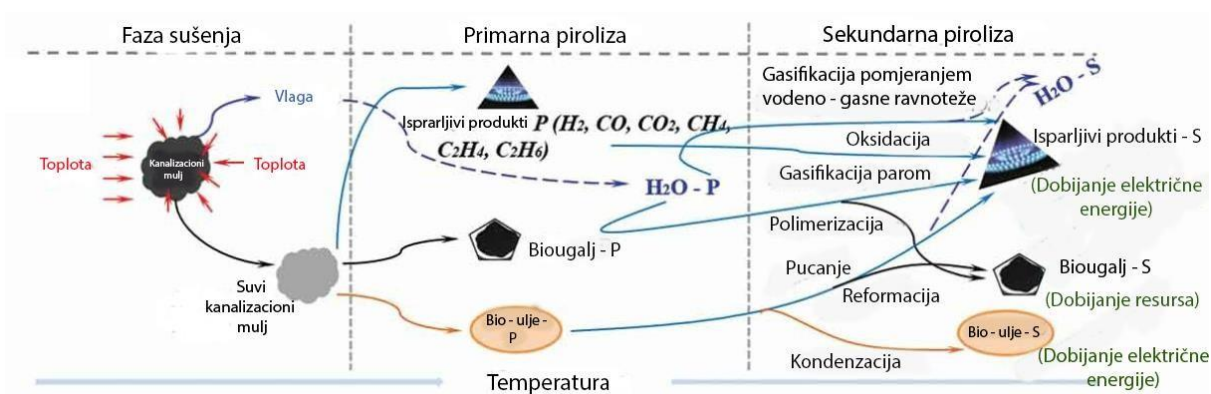
Slika 1.4. Proces sagorijevanja kanalizacionog mulja [11]

Slika 1.4. detaljno prikazuje faze procesa sagorijevanja kanalizacionog mulja. Proces sagorijevanja kanalizacionog mulja omogućava istovremeno dobijanje energije i materijala, što se može tvrditi na osnovu specifičnih reakcija koje se odvijaju tokom sagorijevanja. Tokom sagorijevanja, isparljivi materijali i ugalj oksidiraju u prisustvu kiseonika, stvarajući značajne količine toplote. Ova toplota se može prikupiti i koristiti za zagrijavanje vode u parnim kotlovima, čime se proizvodi para koja pokreće turbine za proizvodnju električne energije. Ovaj princip se koristi u postrojenjima za sagorijevanje otpada, gdje se energija iz otpada, uključujući kanalizacioni mulj, pretvara u toplotnu ili električnu energiju. Mogućnost dobijanja energije u ovoj fazi čini proces sagorijevanja održivim u smislu korišćenja energije koja bi inače bila izgubljena. Pepeo koji nastaje tokom sagorijevanja može biti vrijedan resurs u različitim industrijama, ukoliko nije, na bazi analize, kategorisan kao opasan otpad. Na primjer, pepeo može biti korišten u građevinskoj industriji za proizvodnju cementa ili drugih građevinskih materijala, zbog visokog sadržaja minerala i stabilnih hemijskih jedinjenja. Pored toga, pepeo može sadržavati korisne elemente, poput fosfora, koji se mogu izdvojiti i koristiti kao sastojci za đubriva. Na osnovu ovih primjena, pepeo se ne posmatra samo kao otpadni produkt, već kao sekundarni resurs koji doprinosi cirkularnoj ekonomiji. Ove tvrdnje su zasnovane na industrijskim praksama u kojima se otpad sagorijeva radi proizvodnje energije, a nusproizvodi, poput pepela, recikliraju za različite svrhe, čime se smanjuje ukupna količina otpada i doprinosi održivom upravljanju resursima.

1.3.2 Piroliza

Piroliza je termički proces razgradnje organskih materijala u kanalizacionom mulju pri visokim temperaturama u odsustvu kiseonika. Proces se odvija u nekoliko ključnih faza, koje su detaljno prikazane na slici 2.5. U prvoj fazi, toplota se prenosi na površinu čestica kanalizacionog mulja putem radijacije i/ili konvekcije, a zatim se postepeno prenosi u unutrašnjost čestica. Tokom ovog početnog zagrijavanja, temperatura lokalno raste, što prvo dovodi do isparavanja vlage iz mulja (faza sušenja), a zatim i do postepenog oslobađanja isparljivih materijala pirolize, poznatih kao primarni isparljivi produkti. Autori su se fokusirali na različite metode sušenja kanalizacionog mulja kako bi se smanjio sadržaj vode i olakšao daljnji tretman mulja. Pregledali su različite tehnologije sušenja, uključujući termičke i mehaničke procese, te njihove tehničke aspekte, s posebnim osvrtom na njihovu efikasnost i primjenljivost u kontekstu upravljanja muljem. Ovaj pregled naglašava važnost sušenja kao

ključnog koraka u procesu održivog upravljanja kanalizacionim muljem, s ciljem optimizacije daljeg tretmana i smanjenja ukupnih troškova [10]. Drugi autori su se bavili pirolizom kanalizacionog mulja, procesom termičke dekompozicije organske materije pri visokim temperaturama, radi proizvodnje bio-uglja i dobijanja električne energije. U radu su analizirani tehnički aspekti pirolize mulja, uključujući kontrolu procesa, optimizaciju prinosa bio-uglja i mogućnosti za energetske valorizaciju. Takođe, istražena je ekonomska održivost ove tehnologije, s naglaskom na potencijalne primjene bio-uglja u poljoprivredi i kao obnovljivog izvora električne energije, što bi moglo značajno doprinijeti održivom upravljanju otpadom [12].



Slika 1.5. Piroliza kanalizacionog mulja [20]

Primarni isparljivi produkti (označeni kao 'Isparljivi produkti-P' na slici 1.5) uglavnom nastaju termičkim prekidom hemijskih veza u organskim materijama prisutnim u mulju, kao što su proteini, ugljeni hidrati i lipidi [10]. Sastav ovih isparljivih produkata uključuje vodu (H_2O), ugljen-dioksid (CO_2), ugljen-monoksid (CO), vodonik (H_2), metan (CH_4), druge nekondenzibilne ugljovodonike i kondenzibilne organske spojeve, kao što je katran [13]. Preostale čvrste supstance bogate ugljenikom nakon primarne pirolize postaju biougalj (označen kao 'Biougalj-P' na slici 1.5), koji sadrži značajan dio mineralnih materijala izvorno prisutnih u mulju. Kondenzibilne isparljive vrste pri ambijentalnim uslovima poznate su kao 'Bio-ulje-P'. Kako se temperatura dalje povećava, neki od primarnih produkata pirolize mogu

učestvovati u različitim sekundarnim reakcijama, stvarajući sekundarne produkte ('S'), kao što su 'Isparljivi produkti-S'¹, 'Biougalj-S'² i 'Katran-S'³ [18].

Autori u svom radu ukazuju na važnost proizvodnje i primjene bio-uglja u tretmanu otpadnih voda, pružajući sveobuhvatan pregled procesa proizvodnje bio-uglja iz kanalizacionog mulja. Fokusiraju se na ekološke i ekonomske prednosti ovog pristupa, istražujući kako bio-ugalj može poboljšati efikasnost različitih metoda obrade otpadnih voda. Naglašavaju se potencijali bio-uglja u smanjenju zagađenja, poboljšanju kvaliteta vode i kao održivog rješenja u okviru cirkularne ekonomije [16].

Tokom pirolize može doći do kompleksnog niza hemijskih reakcija, kao što su pucanje (cracking), reformiranje, dehidracija, kondenzacija, polimerizacija, oksidacija i gasifikacija [18]. Razlika između primarne i sekundarne pirolize nije uvijek jasno definisana, jer se sekundarne reakcije isparljivih produkata mogu odvijati u porama čestica ili u gasnoj fazi. Stoga, primarne i sekundarne reakcije mogu se simultano odvijati u različitim djelovima čestica sirovine.

Biougalj nastao tokom primarne faze pirolize može da služi kao adsorbent i katalizator u sekundarnim reakcijama, pretvarajući organske pare u lake gasove i sekundarni biougalj. Takođe, u prisustvu vode (H₂O) i ugljen-dioksida (CO₂), biougalj se može gasifikovati kroz reakcije parne gasifikacije i Boudouard-ove reakcije. Ipak, brzine gasifikacije biouglja sa H₂O i CO₂ su obično značajno niže u poređenju sa brzinama primarne pirolize, pa je gasifikacija biouglja ograničena. S druge strane, sekundarna konverzija primarnih isparljivih produkata je

¹ Isparljivi produkti-S bi u ovom kontekstu označavao isparljive materije koje sadrže sumpor, jer je "S" hemijski simbol za sumpor. Ove isparljive sumporne materije mogu uključivati spojeve kao što su sumpor-dioksid (SO₂) ili vodonik-sulfid (H₂S), koji se oslobađaju tokom termičke obrade. Sumporne isparljive materije su važne jer mogu doprinijeti zagađenju zraka ako nisu pravilno kontrolisane i tretirane, te se u industriji obično koristi odgovarajuća tehnologija za smanjenje emisije sumpornih gasova.

² Biougalj-S odnosi se na ugljenikovu masu (char) koja sadrži sumpor (S), nakon termičke obrade ili sagorijevanja kanalizacionog mulja. Tokom procesa termičke dekompozicije, kao što je piroliza ili sagorijevanje, organska materija se razlaže, ostavljajući za sobom čvrsti ostatak bogat ugljenikom, poznat kao char. U ovom slučaju, "S" ukazuje na prisustvo sumpora u toj čvrstoj materiji. Ova ugljenikova masa sadrži i sumporne spojeve koji nisu isparili ili oksidovali tokom ranijih faza sagorijevanja ili pirolize. Prisustvo sumpora u char-u je značajno jer sumpor može uticati na svojstva krajnjeg proizvoda i može se dalje oksidovati tokom procesa sagorijevanja, što može proizvesti sumporne gasove, poput sumpor-dioksida (SO₂), koji je štetan ako se ne kontroliše pravilno.

³ Katran-S je tečni ili viskozni nusprodukt bogat sumpornim jedinjenjima koji nastaje tokom termičke obrade organskih materijala, poput kanalizacionog mulja. Ova sumporna jedinjenja mogu biti problematična jer prilikom sagorijevanja oslobađaju štetne emisije, poput sumpor-dioksida (SO₂), što zahtijeva dodatne mjere za smanjenje zagađenja i ekološki prihvatljiv tretman.

brz proces koji, u zavisnosti od operativnih uslova, ima veliki uticaj na konačni sastav i prinos isparljivih produkata. Ovi operativni uslovi mogu uključivati temperaturu, pritisak i prisustvo katalizatora, koji zajedno određuju efikasnost i ishod cjelokupnog procesa pirolize.

Naglašen je značajan potencijal održive proizvodnje električne energije putem pirolize kanalizacionog mulja, analizirajući tehničke aspekte ovog procesa, koji omogućava transformaciju mulja u bio-ugalj i druge energetske nosače. Pirolitički procesi, zbog svoje efikasnosti i mogućnosti smanjenja štetnih emisija, pružaju ekološki prihvatljivo rješenje za tretman mulja. Rad ocjenjuje ekološke implikacije ovih metoda, ističući njihov potencijal da doprinesu održivom upravljanju otpadom i proizvodnji obnovljive električne energije [6].

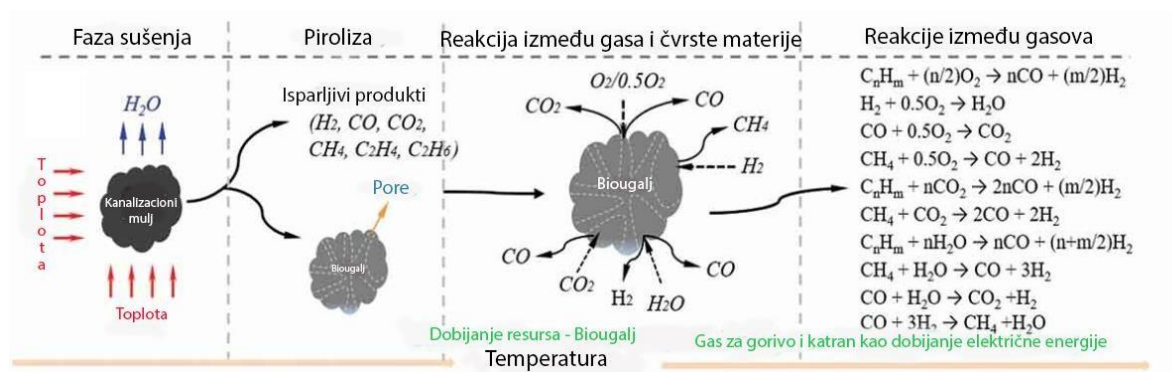
1.3.3 Gasifikacija

Gasifikacija kanalizacionog mulja (slika 1.6) je termički proces koji ima za cilj proizvodnju sintetičkog gasa (syngas), koji se može direktno koristiti za grijanje ili dalje prerađivati u hemikalije poput metanola, dimetil etra ili drugih jedinjenja putem FischerTropsch procesa. Ovaj proces se može smatrati proširenjem pirolize, gdje sirovina prolazi kroz nekoliko faza zagrijavanja, počevši od sušenja, preko pirolize, pa sve do gasno-čvrstih i gasnogasnih reakcija u prisustvu gasifikacionog agensa [17].

Prva faza gasifikacije je sušenje, koje se odvija na temperaturama između 70 i 200 °C. Tokom ove faze, vlaga iz kanalizacionog mulja se uklanja, a brzina sušenja zavisi od nekoliko faktora, uključujući površinu čestice, brzinu recirkulacije gasa, relativnu vlažnost sušnog gasa, difuzivnost vlage unutar čestice mulja i temperaturne razlike između čestice i toplih gasova [15]. Nakon sušenja, mulj ulazi u drugu fazu, poznatu kao piroliza, koja se odvija na temperaturama između 350 i 500 °C. U ovoj fazi dolazi do termičke razgradnje organskih materijala u mulju, pri čemu se oko 60–70% mase sirovine pretvara u kompleksnu tečnu frakciju, gasove i biougalj. Hemijski sastav mulja, brzina zagrijavanja, gasifikacioni agens i temperatura reaktora imaju značajan uticaj na raspodjelu produkata pirolize [12].

Treća faza gasifikacije uključuje reakcije između čvrste materije i gasa, koje konvertuju čvrsti ugljenik (biougalj) u gasove poput vodonika (H_2), ugljen-monoksida (CO), ugljendioksida (CO_2) i metana (CH_4). Ove reakcije su ključne za dalji proces gasifikacije, jer oksidacija ugljenika i parcijalna oksidacija oslobađaju značajnu količinu energije, koja se koristi za sušenje sirovine, pirolizu i druge endotermne reakcije. U ovoj fazi mogu se odvijati i reakcije hidrogenacije, koje dodatno doprinose energetskim potrebama gasifikatora [13].

U poslednjoj, četvrtoj fazi gasifikacije, odvijaju se reakcije između različitih gasovitih supstanci. Ove homogene gasno-gasne reakcije značajno utiču na konačni sastav gasovitih produkata. Na primjer, reakcije između vodonika i ugljen-dioksida ili metana doprinose stabilizaciji i modifikaciji sintetičkog gasa, povećavajući njegovu energetska vrijednost i pogodnost za dalju upotrebu ili preradu. Sve ove faze zajedno čine gasifikaciju efikasnim procesom koji omogućava maksimalno iskorišćavanje energije i resursa sadržanih u kanalizacionom mulju [14].



Slika 1.6. Gasifikacija kanalizacionog mulja [17]

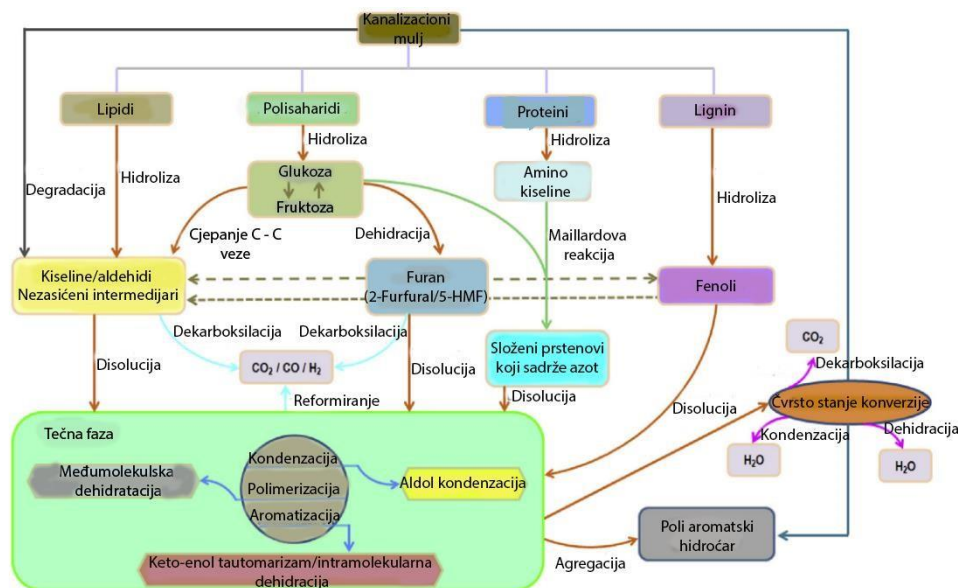
Gasifikacija kanalizacionog mulja proučena je koristeći različite tehnologije, uključujući upotrebu različitih gasifikacionih agenasa (vazduh, para, kiseonik ili njihove mješavine) i katalizatora za poboljšanje kvaliteta i količine proizvedenog gasa. Kombinovanjem mulja sa biomasom niskog sadržaja vlage, poput piljevine bora, smanjuje se sadržaj vlage, dok se proizvodnja sintez-gasa sa višim sadržajem vodonika (H_2) poboljšava zbog prisutnosti samogenerisane pare koja podstiče vodeno-gasne reakcije. Korišćenje katalizatora kao što su olivin i kalcijum-oksidi (CaO) pokazalo je značajno smanjenje sadržaja katrana, amonijaka (NH_3), i vodonik-sulfida (H_2S) u proizvedenom gasu, čime se smanjuje potreba za složenim i skupim sistemima za prečišćavanje gasa. Aktivni ugalj, zbog svoje visoke površinske oblasti i poroznosti, efikasno uklanja nečistoće, uključujući katranske molekule, NH_3 i H_2S , kada se postavi nakon gasifikatora.

Analizirani procesi pirolize i gasifikacije kanalizacionog mulja predstavljaju napredne termičke tehnologije koje omogućavaju efikasno dobijanje toplotne i električne energije i smanjenje zapremine otpada. Piroliza se odvija pri visokim temperaturama u odsustvu kiseonika, proizvodeći tečni i čvrsti ostatak, dok gasifikacija pretvara mulj u gas bogat ugljenikom putem kontrolisane oksidacije. Autori detaljno istražuju tehničke karakteristike

ovih procesa, kao što su optimalni temperaturni režimi, konverzija energije i prinosi produkata, istovremeno analizirajući ekonomske aspekte, uključujući kapitalne troškove, operativne izazove i potencijalne prihode od generisane električne energije. Njihova studija naglašava održivost ovih tehnologija u kontekstu smanjenja ekološkog uticaja i povećanja energetske efikasnosti u tretmanu kanalizacionog mulja, kao i mogućnost integracije ovih procesa u postojeće sisteme upravljanja otpadom. Kroz ovu analizu, autori ističu važnost kontinuiranog istraživanja i optimizacije procesa kako bi se osigurala njihova komercijalna primjenljivost i ekološka održivost u budućnosti [9].

1.3.4 Hidrotermalna karbonizacija

Hidrotermalna karbonizacija (HTC) kanalizacionog mulja je savremeni termički proces koji omogućava pretvaranje organske materije prisutne u mulju u čvrsti ugljenični proizvod poznat kao hidrokarbonat. Ovaj proces se odvija pri povišenoj temperaturi, obično između 180 i 250 °C, i pod visokim pritiskom u prisustvu vode. HTC se obavlja u zatvorenim reaktorima, gdje mulj prolazi kroz niz hemijskih reakcija u vodenom medijumu, što omogućava transformaciju mulja bogatog vlagom u energetski gust i stabilniji proizvod.



Slika 1.7. Pojednostavljeni postupak hidrotermalne karbonizacije kanalizacionog mulja [18].

Slika 1.7 prikazuje hemijske procese koji se dešavaju tokom hidrotermalne karbonizacije (HTC) kanalizacionog mulja. Lipidi se razgrađuju putem hidrolize, formirajući kiseline i aldehide koji prelaze u tečnu fazu [10]. Polisaharidi se hidrolizuju u glukozu i

fruktozu, koji dalje dehidracijom formiraju furane i druge produkte, dok se dio ovih molekula rastvara i prelazi u gasovite produkte [12]. Proteini se razlažu u aminokiseline koje prolaze kroz Maillardovu reakciju, stvarajući azotna jedinjenja koja se rastvaraju ili prelaze u čvrstu fazu [15]. Lignin se hidrolizuje u fenole, koji dalje dekarboksiluju i rastvaraju se [18]. U tečnoj fazi dolazi do intermolekularne dehidracije, kondenzacije i polimerizacije, što vodi do formiranja stabilnih ugljeničnih struktura [18]. Konačno, čvrsti hidrokarbonat nastaje kroz kondenzaciju i dehidrataciju poliaromatskih struktura [19].

Jedan od glavnih ciljeva HTC-a je poboljšanje dehidratacije mulja, čime se smanjuju troškovi transporta i omogućava jednostavnija dalja obrada proizvoda, kao što su spaljivanje ili upotreba u poljoprivredi. Tokom ovog procesa, složeni biopolimeri poput proteina, polisaharida i lipida razgrađuju se u manje molekule, koje zatim prolaze kroz reakcije dehidratacije, dekarboksilacije i polimerizacije. Ove reakcije rezultiraju formiranjem stabilnih ugljeničnih struktura unutar hidrokarbonata [19].

Ključni parametri HTC procesa uključuju temperaturu, vrijeme zadržavanja, sadržaj vlage, brzinu zagrijavanja i prisutnost katalizatora. Temperatura direktno utiče na brzinu hemijskih reakcija i svojstva konačnog proizvoda. Više temperature pospješuju razgradnju biopolimera i formiranje hidrokarbonata s većim sadržajem ugljenika, ali istovremeno mogu smanjiti prinos čvrstog proizvoda zbog prelaska većeg dijela materijala u tečnu ili gasovitu fazu [21].

Vrijeme zadržavanja predstavlja trajanje tokom kojeg mulj ostaje podvrgnut visokoj temperaturi u reaktoru. Produženje vremena zadržavanja omogućava potpuniju karbonizaciju, što rezultira proizvodom HTC sa boljim gorivnim karakteristikama, ali takođe može dovesti do smanjenja ukupnog prinosa čvrstog proizvoda. Optimalno vrijeme zadržavanja je balans između željene konverzije i minimalizacije gubitaka materijala [12].

Sadržaj vlage u mulju takođe igra ključnu ulogu (sadržaj vlage obično se kreće između 75% i 99%), jer voda prisutna u mulju omogućava efikasniji prenos toplote i služi kao reaktivni medijum za hidrotermalne reakcije. Smanjenje sadržaja vlage povećava prinos proizvoda HTC, dok veći sadržaj vlage olakšava solubilizaciju i naknadnu polimerizaciju razgradnih produkata, ali smanjuje energetske gustinu konačnog proizvoda [9].

Brzina zagrijavanja utiče na formiranje međuprodukata i distribuciju konačnih produkata. Sporo zagrijavanje omogućava temeljitiju razgradnju biomolekula i rezultira proizvodom HTC s većom energetske gustinom i nižim odnosom kiseonika i vodonika prema ugljeniku. Brže

zagrijavanje, s druge strane, može dovesti do većeg prinosa gasovitih produkata, čime se smanjuje količina čvrstog proizvoda HTC [8].

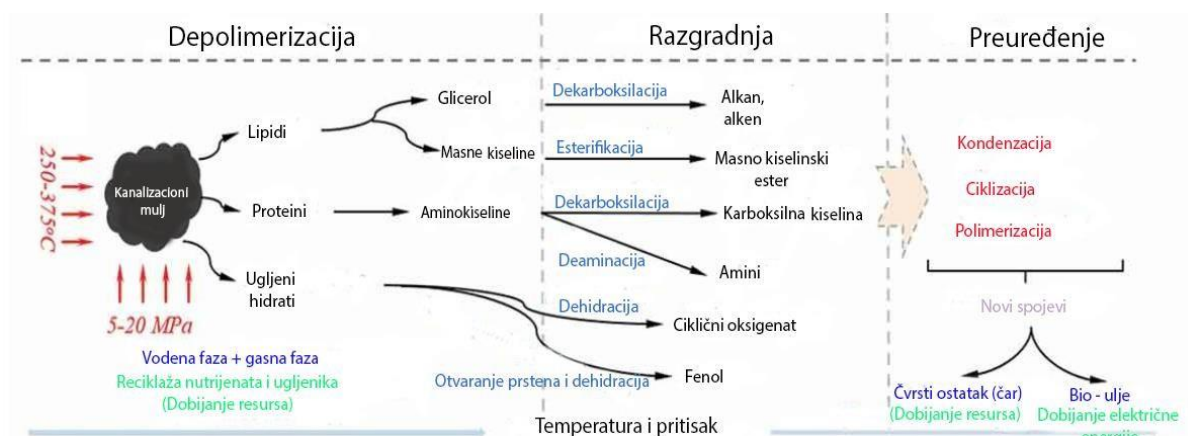
Prisutnost katalizatora, poput kiselina, baza ili metalnih soli, može značajno ubrzati reakcije tokom HTC procesa. Na primjer, dodatak organskih kiselina može ubrzati dehidrataciju i smanjiti potrebnu energiju za razgradnju biopolimera. Prisutnost teških metala u mulju može takođe imati katalitički efekat na formiranje proizvoda HTC i drugih nusproizvoda [7].

Proces hidrotermalne karbonizacije je egzoterman, što znači da se tokom procesa oslobađa energija koja se može koristiti za održavanje reakcije. Osim hidrokarbonata, proces može generisati i tečne i gasovite nusproizvode, kao što su organske kiseline i ugljen dioksid, koji se mogu dalje iskoristiti, na primjer, u proizvodnji biogasa ili kao dodatak za đubriva [6].

HTC predstavlja perspektivnu tehnologiju za održivo upravljanje kanalizacionim muljem, smanjujući potrebu za konvencionalnim metodama tretmana, poput odlaganja na deponijama ili spaljivanja, koje su energetske intenzivne i ekološki problematične. Na ovaj način, HTC ne samo da omogućava efikasnije upravljanje otpadom, već takođe doprinosi održivom razvoju i zaštiti životne sredine [5].

1.3.5 Hidrotermalna likvifikacija

Hidrotermalna likvifikacija (HTL) je termičko-hemijski proces koji se odvija u vodi ili drugom odgovarajućem rastvaraču na povišenim temperaturama (obično između 250 i 375°C) i visokim pritiscima (5-20 MPa). Tokom ovog procesa, koji je dat na slici 1.8, organska sirovina se razgrađuje na četiri glavna produkta: bio-ulje, koje je ciljni produkt, vodenu fazu, gas i čvrsti ostatak. Ovaj proces se sve više istražuje zbog svoje sposobnosti da efikasno konvertuje kanalizacioni mulj u vrijedne resurse, pri čemu bio ulje predstavlja ključni proizvod sa velikim potencijalom za dalju preradu u gorivo [15]. Istraživan je napredak u primjeni hidrotermalne likvifikacije (HTL) kanalizacionog mulja za proizvodnju bio-ulja, tehnike koja se bazira na korišćenju visokih temperatura i pritiska za razgradnju organske materije u mulju. HTL se posebno ističe kao efikasna metoda koja može pretvoriti mulj u vrijedne bioenergetske proizvode, istovremeno smanjujući ekološki uticaj tretmana otpada. Takođe, analiziraju se izazovi u optimizaciji procesa, kao i potencijalne primjene proizvedenog bio-ulja u industriji obnovljivih izvora električne energije [9].



Slika 1.8. Pojednostavljeni postupak hidrotermalne likvifikacije kanalizacionog mulja [15]

Osnovi hidrotermalne likvifikacije kanalizacionog mulja mogu se opisati kroz tri glavna koraka. Prvi korak uključuje depolimerizaciju različitih biomolekula, kao što su lipidi, proteini i ugljeni hidrati, u monomerne ili oligomerne jedinice. Ovaj proces se odvija pod uticajem povišene temperature i pritiska, što omogućava rastvaranje makromolekula u vodi ili organskom rastvaraču putem hidrolitičkih ili solvolitičkih reakcija [11]. U drugom koraku dolazi do razgradnje monomera ili oligomera putem cijepanja, dehidracije, dekarboksilacije i deaminacije, što dovodi do formiranja fragmenata malih molekula koji su nestabilni i reaktivni [18]. Treći korak procesa uključuje preuređenje ovih lakih fragmenata kroz reakcije kondenzacije, ciklizacije i polimerizacije, pri čemu nastaju nova jedinjenja, uključujući bioulje, vodenu fazu i čvrsti ostatak. Kondenzacija i dehidracija smanjuju sadržaj kiseonika u bioulju, povećavajući njegovu stabilnost i energetska gustinu, što je ključno za njegovu dalju primjenu kao goriva [14]. Ukoliko je u procesu dostupna stabilizujuća supstanca poput vodonika, slobodni radikali koji nastaju tokom reakcija će biti neutralisani, što rezultira stabilnim bio-uljem sa nižim molekularnim masama [15]. Ovaj proces se smatra obećavajućom tehnologijom za prerađivanje kanalizacionog mulja zbog svoje efikasnosti u pretvaranju otpada u korisne resurse, pri čemu bio-ulje predstavlja glavnu komponentu sa visokim potencijalom za energetska upotrebu. Upravo zbog ovih prednosti, hidrotermalna likvifikacija je predmet intenzivnih istraživanja u kontekstu održivog upravljanja otpadom i proizvodnje obnovljivih izvora električne energije [16].

2. EKOLOŠKI I REGULATORNI ASPEKTI

Iako mulj sadrži korisne organske materije i hranljive sastojke, njegova neadekvatna obrada može dovesti do ozbiljnih ekoloških problema, uključujući zagađenje vode, tla i atmosfere. U ovom poglavlju naglašava se potreba za pažljivim upravljanjem kako bi se minimizirali rizici povezani sa prisustvom teških metala, toksičnih materija i patogena, čime bi se osigurala održivost životne sredine i zaštita javnog zdravlja.

2.1.Smanjenje emisija i ekološki uticaji

2.1.1. Komparacija biohemijske konverzije sa tradicionalnim metoda obrade kanalizacionog mulja

a) Emisija GHG

Biohemijske metode pokazuju značajnu prednost u energetskej efikasnosti u odnosu na tradicionalne metode poput odlaganja na deponijama. Aerobna digestija, na primjer, troši između 1,5 i 2,5 kWh električne energije po kilogramu suve materije, ali istovremeno smanjuje emisije CO₂ ekvivalenata do 30% u poređenju sa deponijama, koje emituju oko 0,9-1,2 kg CO₂ ekvivalenata po kilogramu suve materije [11]. Anaerobna digestija omogućava proizvodnju do 25 m³ metana po toni suve materije, što je ekvivalentno 150-200 kWh električne energije, što može pokriti energetske potrebe procesa i proizvesti višak električne energije [10]. Nasuprot tome, deponije ne proizvode korisnu energiju, a čak i uz sisteme za prikupljanje metana, energetska efikasnost je niska, a većina energije se gubi [15]. Biohemijske metode značajno smanjuju emisije GHG u poređenju sa deponijama. Tokom aerobne digestije, emisije CO₂ se kreću između 0,6-0,7 kg CO₂ ekvivalenata po kilogramu suve materije, dok deponije emituju između 0,9 i 1,2 kg CO₂ ekvivalenata [4]. Emisije metana (CH₄), koje su ključne za globalno zagrijavanje zbog njihovog potencijala zagrijavanja koji je 28 do 36 puta veći od CO₂, smanjene su za više od 90% u aerobnim i anaerobnim procesima u poređenju sa deponijama, gdje emisije metana mogu dostići do 1,5 kg CO₂ ekvivalenata po kilogramu suve materije [7]. U anaerobnoj digestiji, metan se može efikasno koristiti kao biogas, smanjujući emisije CH₄ na ispod 0,2 kg CO₂ ekvivalenata po kilogramu suve materije [15].

b) Prisustvo teških metala

Kada je u pitanju upravljanje teškim metalima i mikrozagađivačima, biohemijske metode imaju prednost. Tokom aerobne digestije, koncentracija teških metala, kao što su kadmijum (Cd), olovo (Pb), živa (Hg), hrom (Cr), i nikal (Ni) povećava se u preostalom

stabilizovanom mulju zbog smanjenja zapremine organske materije, ali ostaju kontrolisani u digestatu, smanjujući rizik od njihove mobilizacije [3]. Nasuprot tome, na deponijama teški metali mogu migrirati u podzemne vode, pri čemu se godišnji gubici metala procjenjuju na 0,11% ukupne mase, zavisno od uslova kiselosti [1]. Mikrozagađivači, poput farmaceutskih preparata i pesticida, takođe se mogu djelimično razgraditi tokom aerobne i anaerobne digestije, ali ostaju u digestatu, što zahtijeva pažljivo upravljanje kako bi se minimizirali ekološki rizici [2].

c) Ekološki uticaj

Biohemijske metode, posebno anaerobna digestija, imaju niži ekološki uticaj u poređenju sa deponijama. Anaerobna digestija omogućava kontrolisano oslobađanje GHG i proizvodnju korisnog biogasa, što smanjuje ukupni ekološki uticaj procesa [6]. Nasuprot tome, deponije imaju veći negativni ekološki uticaj zbog nekontrolisanih emisija metana i dugoročnog rizika od kontaminacije tla i podzemnih voda teškim metalima i mikrozagađivačima. Fermentacija i digestija omogućavaju reciklažu nusproizvoda, kao što su digestat i biogas, što dalje smanjuje potrebu za sintetičkim đubrivima i doprinosi očuvanju životne sredine [16].

Ove činjenice pokazuju da biohemijska konverzija ne samo da poboljšava energetske efikasnost već i smanjuje ekološki uticaj u poređenju sa tradicionalnim metodama odlaganja kanizacionog mulja na deponijama. Biohemijska konverzija stoga predstavlja održiviju i ekološki prihvatljiviju opciju za tretman kanizacionog mulja.

2.1.2. Komparacija termohemijskih i tradicionalnih metoda obrade kanizacionog mulja

a) Emisija GHG

Termohemijske metode za dobijanje električne energije iz kanizacionog mulja predstavljaju održivu alternativu tradicionalnim metodama odlaganja, kao što su deponije. Ove metode ne samo da omogućavaju efikasno iskorišćavanje energije iz otpada, već značajno doprinose smanjenju emisija gasova sa efektom staklene bašte (GHG), uključujući CO₂, CH₄ i NO_x. Kvantitativne analize ovih procesa pokazuju jasnu prednost u smanjenju ukupnih emisija u poređenju sa deponijama [14].

Tokom termohemijskih procesa, emisije CO₂ nastaju pri temperaturama od 510 do 540°C, dok procenat suve materije (DM) u mulju dostiže 60%. Gasoviti CO₂ predstavlja oko 10-15% ukupnih proizvoda ovih procesa [12]. U poređenju sa deponijama, koje mogu

emitovati do 2 kg CO₂ po kilogramu DM mulja zbog anaerobne razgradnje, termohemijske metode mogu smanjiti emisije CO₂ za 20-30% po toni obrađenog mulja. Ova redukcija je rezultat kontrolisanih uslova u reaktoru koji omogućavaju efikasnije iskorišćavanje ugljenika iz mulja [19].

Prema istraživanju, piroliza generiše ukupno 696,7 kg CO₂ ekvivalenta po toni osušenog mulja. Ove emisije uglavnom dolaze iz sušenja mulja, koje doprinosi sa 597,5 kg CO₂ ekvivalenta. Sama operacija pirolize dodaje još 96,9 kg CO₂ ekvivalenta, dok transport biochar-a doprinosi sa 1,3 kg CO₂ ekvivalenta. Međutim, kada se u obzir uzmu emisije koje se izbjegavaju zahvaljujući zamjenama prirodnog gasa, sirove nafte i vještačkih đubriva kroz proizvode dobijene pirolizom, ukupne izbjegnute emisije dostižu 1.766,6 kg CO₂ ekvivalenta po toni osušenog mulja. Ovo rezultira neto negativnim bilansom emisija od -1.070,9 kg CO₂ ekvivalenta po toni, što znači da se ovim procesom izbjegava više emisija nego što se proizvodi [17].

Za poređenje, tradicionalne metode poput stabilizacije krečom i primjene u poljoprivredi generišu 833,3 kg CO₂ ekvivalenta po toni, kompostiranje i primjena u poljoprivredi 756,3 kg CO₂ ekvivalenta, dok spaljivanje sa kućnim otpadom generiše čak 2805,3 kg CO₂ ekvivalenta po toni osušenog mulja. Ove metode imaju pozitivne bilanse emisija, što znači da doprinose povećanju GHG-a u atmosferi, za razliku od pirolize koja ima negativan bilans, čineći je najodrživijom opcijom za upravljanje kanalizacionim muljem i smanjenje emisija GHG-a.

Emisije metana (CH₄), koje su značajan problem kod deponija, gdje mogu doseći do 0,25 kg CH₄ po kilogramu DM, znatno su smanjene u termohemijskim procesima. Gasifikacija, naročito u prisustvu CO₂, smanjuje emisije CH₄ na ispod 0,05 kg CH₄ po kilogramu DM [18]. Ovo smanjenje je rezultat suve reformacije metana (reakcija CH₄ sa CO₂), koja smanjuje količinu metana za čak 80% u poređenju sa deponijama, čime se značajno doprinosi smanjenju globalnog zagrijavanja [18].

Emisije NO_x, koje su takođe štetne po životnu sredinu, znatno su niže u termohemijskim procesima zbog nižih radnih temperatura, koje se kreću između 300 i 650°C. U ovim uslovima, proizvodnja azotnih oksida je svedena na minimum, sa emisijama od oko 0,01 kg NO_x/kg DM mulja. Za poređenje, konvencionalno sagorijevanje i deponije mogu proizvesti do 0,05 kg NO_x/kg DM, što znači da termohemijske metode smanjuju ove emisije za 50-80% [19].

b) Prisustvo teških metala

Piroliza kanalizacionog mulja je ekološki povoljnija u poređenju s tradicionalnim metodama odlaganja, kao što su deponije. Tokom pirolize, teški metali poput kadmijuma (2-6 mg/kg suve materije), olova (50-120 mg/kg), žive (0,2-1 mg/kg), hroma (100-200 mg/kg) i nikla (30-70 mg/kg) ostaju koncentrisani u bio-uglju, čime se smanjuje rizik od ispiranja u podzemne vode. Tradicionalne metode omogućavaju organskoj materiji razgradnju, ali ne eliminišu teške metale, što vodi ka njihovom nakupljanju u tlu i vodi, stvarajući veći ekološki rizik [16].

Gasifikacija kanalizacionog mulja ima potencijal da smanji štetne emisije u poređenju s tradicionalnim metodama odlaganja, kao što su deponije. Tokom gasifikacije, teški metali ostaju koncentrisani u pepelu, dok zagađivači kao što su NH_3 i HCN mogu biti smanjeni upotrebom katalizatora i filtera. Gasifikacija kanalizacionog mulja u poređenju sa tradicionalnim odlaganjem na deponiji ima nekoliko ključnih prednosti. Prema podacima, gasifikacija mulja rezultira gasnim prinosom od 1,12 m^3/kg suve materije, uz niži sadržaj katrana (5,28%) i niže emisije H_2S (12,66 g/kg). U poređenju s muljem, pirolizni ugalj daje viši prinos gasa (1,23 m^3/kg), niži sadržaj katrana (2,94%) i još niže emisije H_2S (3,54 g/kg). S druge strane, deponije omogućavaju razgradnju organske materije, što dovodi do visokih emisija GHG, kao što su metan i CO_2 , te povećanog rizika od zagađenja podzemnih voda. Gasifikacija, međutim, omogućava bolju kontrolu nad emisijama i smanjenje štetnih uticaja na životnu sredinu, ali zahtijeva sofisticiraniju tehnologiju za obradu zagađivača. Ko-gasifikacija kanalizacionog mulja s ugljem i biomasom, poput drvenih peleta ili otpada iz šumarstva, poboljšava kvalitet proizvoda i smanjuje emisiju zagađivača. Efikasnost hladnog gasa (CGE) za ko-gasifikaciju sa drvenim peletima iznosi 59,3%, a sa papirnim muljem 61,6%, što je više u poređenju sa samim kanalizacionim muljem (55,12%). Prinos suvog gasa je viši kod kogasifikacije sa ugljem (2,5–2,7 Nm^3/kg). Proces smanjuje emisije CO_2 i H_2S , ali zahtijeva pažljivo upravljanje zbog sadržaja sumpora i azota u mulju [21].

Nakon sagorijevanja kanalizacionog mulja, teški metali ostaju koncentrisani u pepelu. U donjem pepelu koncentracije kadmijuma iznose 1,3 mg/kg, olova 78 mg/kg, žive manje od 0,1 mg/kg, nikla 466,8 mg/kg, dok su cinka 4249,8 mg/kg. U letećem pepelu ove vrijednosti su znatno veće, sa kadmijumom na 47,9 mg/kg, olovom na 111,2 mg/kg, živom na 0,16 mg/kg, niklom na 766,8 mg/kg i cinkom na 9124,5 mg/kg, što predstavlja potencijalni rizik za okolinu. Sagorijevanje kanalizacionog mulja na niskim temperaturama pokazalo se kao efikasan način da se teški metali, kao što su kadmijum (Cd), hrom (Cr), bakar (Cu), olovo (Pb) i cink (Zn),

transformišu u stabilne oblike, čime se značajno smanjuje njihovo ispiranje. Na primjer, ispiranje hroma smanjeno je za 97,56%, a bakra za 98,52%. Kod konvencionalnog odlaganja mulja na deponiju, teški metali ostaju u mulju, ali postoji veći rizik od njihovog ispiranja u podzemne vode tokom vremena, što može izazvati dugoročno zagađenje okoline.

Sagorijevanje, iako koncentrira metale, smanjuje rizik od ispiranja i potencijalnog zagađenja [14].

c) Energetska efikasnost

Kako je već ranije navedeno, postoje različite tehnologije gasifikacije kanalizacionog mulja, koristeći različite gasifikacione agense (vazduh, paru, kiseonik) i katalizatore, što implicira da se analizira njihova energetska efikasnost. Na primjer, updraft fiksni reaktori s vazduhom ili kiseonikom kao agensima daju višu toplotnu vrijednost (HHV) između 12,2 i 14 MJ/Nm³, što ukazuje na njihovu efikasnost u proizvodnji toplotne energije [17]. Ovi podaci sugerišu da izbor gasifikacionog agensa i katalizatora ima ključnu ulogu u optimizaciji energetske efikasnosti i kvaliteta proizvedenog gasa. Na osnovu ovih rezultata, tehnologije koje koriste kiseonik i odgovarajući katalizatori pokazale su se kao najefikasnije za poboljšanje prinosa električne energije i kvaliteta sintetičkog gasa, što je od ključnog značaja za optimizaciju procesa i smanjenje ekološkog uticaja. Kada uporedimo gasifikaciju kanalizacionog mulja sa tradicionalnim odlaganjem mulja na deponijama, jasno je da gasifikacija nudi značajne prednosti u smislu energetske efikasnosti i smanjenja ekološkog uticaja. Gasifikacija omogućava proizvodnju sintetičkog gasa s visokom toplotnom vrijednošću, koja može doseći do 14 MJ/Nm³ u optimalnim uslovima [15], dok deponije generišu metan, gas sa efektom staklene bašte sa znatno većim potencijalom zagrijavanja od ugljen-dioksida [18].

Energetska efikasnost pirolize kanalizacionog mulja značajno zavisi od temperature, vrste reaktora i upotrebe katalizatora. Povećanjem temperature dolazi do povećanja proizvodnje gasa, što je rezultat sekundarnih reakcija koje postaju aktivne iznad 550 °C [19]. Pored toga, pri višim temperaturama dolazi do smanjenja prinosa bio-ulja i povećanja prinosa gasa, dok prisustvo katalizatora poput CaO i Fe₂O₃ poboljšava kvalitet proizvoda, povećanjem energetske vrijednosti bio-ulja i smanjenjem sadržaja azotnih jedinjenja [18]. Ova optimizacija ključna je za postizanje bolje energetske efikasnosti procesa pirolize. Na nižim temperaturama (300 °C), fiksni reaktor proizvodi više biouglja i manje gasa, dok se povećanjem temperature na 600 °C smanjuje prinos bio-ulja i biouglja, a povećava prinos gasa. Cjevasti reaktori na

višim temperaturama daju bolje rezultate u proizvodnji gasa [13], dok upotreba katalizatora poput Fe_2O_3 može značajno poboljšati kvalitet bio-ulja [14]. Ovi podaci omogućavaju optimizaciju procesa pirolize za efikasniju proizvodnju željenih proizvoda. Piroliza kanalizacionog mulja nudi nekoliko prednosti u poređenju s tradicionalnim metodama obrade, kao što su deponovanje ili spaljivanje. Tradicionalne metode često zahtijevaju visoku potrošnju električne energije i izazivaju emisije štetnih gasova, dok piroliza omogućava pretvaranje mulja u vrijedne proizvode kao što su bio-ulje i gas. Energetska efikasnost pirolize može biti značajno veća, posebno kada se koriste katalizatori i optimizovane temperature, čime se poboljšava kvalitet goriva i smanjuju emisije štetnih supstanci. U poređenju sa spaljivanjem, piroliza nudi veću fleksibilnost u upravljanju nusproduktima, kao i niže troškove u dugoročnom održavanju i smanjenju otpada.

2.1.3. Komparacija hidrotermalnih postupaka i tradicionalnih metoda obrade kanalizacionog mulja

Hidrotermalna karbonizacija (HTC) kanalizacionog mulja predstavlja napredan termički proces koji značajno smanjuje emisije u poređenju s tradicionalnim metodama tretmana, kao što su deponije. Dok emisije metana u deponijama dostižu između 0,3 i 0,5 $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg}$ suve materije mulja, HTC gotovo eliminiše metan, smanjujući ukupne emisije CO_2 na raspon od 0,2 do 0,4 $\text{kg CO}_2/\text{kg}$ suve materije [12]. Energetski sadržaj hidrokarbonata, čvrstog produkta HTC-a, iznosi između 20 i 25 MJ/kg , što ga čini uporedivim sa lignitom, dok sam proces troši između 1,5 i 3 MJ/kg suve materije [14]. Pored smanjenja GHG, HTC proces generiše teške metale u čvrstom produktu, gdje koncentracija kadmijuma može dostići 3-5 mg/kg suve materije, što može zahtijevati dodatni tretman prije daljeg korišćenja hidrokarbonata [9].

Takođe, tečna frakcija procesa može sadržavati mikrozagađivače, uključujući farmaceutske spojeve, sa koncentracijom u rasponu od 0,1 do 1 mg/l , zavisno od sastava ulaznog mulja [11]. Ovi podaci ukazuju na potrebu za pažljivim upravljanjem nusproizvodima kako bi se osigurala održivost HTC tehnologije. HTC proces, pored toga što smanjuje ekološki uticaj, nudi poboljšanu energetska efikasnost u poređenju s konvencionalnim metodama. Dok tradicionalni tretmani zahtijevaju značajne energetske resurse i mogu biti ekološki problematični, HTC omogućava transformaciju kanalizacionog mulja u energetski bogat proizvod, smanjujući emisije i omogućavajući efikasnije upravljanje otpadom [14]. Ovaj proces, uz pravilno upravljanje nusproizvodima, predstavlja perspektivnu tehnologiju za održivo tretiranje kanalizacionog mulja [13].

Ovi podaci jasno ukazuju na to da hidrotermalne metode ne samo da su energetske efikasne, već i značajno smanjuju emisije gasova sa efektom staklene bašte, čineći ih održivom i ekološki prihvatljivom alternativom tradicionalnim metodama upravljanja kanalizacionim muljem. Ove metode omogućavaju reciklažu otpada i smanjenje uticaja na životnu sredinu, što ih čini ključnim za održivi razvoj i borbu protiv klimatskih promjena [15].

2.2.Regulatorni zahtjevi

2.2.1. Međunarodni zakoni i regulative

Na nivou Evropske unije, tokom proteklih godina, doneseni su brojni propisi i strategije koji usmjeravaju razvoj ka održivom društvu i ekonomiji koja je resursno efikasna i konkurentna. Ekonomsko-investicioni plan za Zapadni Balkan iz 2020. godine prepoznaje ovaj region kao ključni geostrateški prioritet za EU, teži ekonomskom oporavku i približavanju jedinstvenom tržištu EU, uz naglasak na zelenu i digitalnu tranziciju.

Novi Akcioni plan EU za cirkularnu ekonomiju, usvojen takođe 2020. godine, ima za cilj ubrzanje transformacije evropske ekonomije prema modelu cirkularne ekonomije. Ovaj plan uključuje i novu Uredbu 2020/741 o minimalnim uslovima za ponovno korišćenje vode u poljoprivredi, koja je stupila na snagu 2023. godine i očekuje se da će podstaći ponovnu upotrebu vode u EU.

S tim u vezi, EU Strategija za zaštitu biodiverziteta do 2030. godine postavlja ambiciozne ciljeve za očuvanje zdravih i otpornijih ekosistema, uz poseban naglasak na organsku poljoprivredu. Strategija „Od njive do trpeze” zalaže se za smanjenje ekološkog uticaja sistema ishrane, smanjenje upotrebe pesticida i antimikrobnih sredstava, te povećanje udjela organske poljoprivrede.

Akcioni plan EU „Ka nultom zagađenju vazduha, vode i zemljišta” ima za cilj smanjenje zagađenja do 2050. godine na nivoe koji nisu štetni po zdravlje ljudi i ekosistema. Ovaj plan podrazumijeva poboljšanje kvaliteta zemljišta smanjenjem upotrebe hemijskih pesticida i povećanjem reciklaže.

U pravnom okviru, Direktiva 86/278/EES o zaštiti životne sredine reguliše upotrebu kanalizacionog mulja u poljoprivredi, propisujući maksimalne dozvoljene koncentracije teških metala u zemljištu i zabranjujući upotrebu netretiranog mulja. Direktiva 91/271/EEC o prečišćavanju komunalnih otpadnih voda uspostavlja mjere za prikupljanje, tretman i ponovno korišćenje otpadnih voda i mulja, a Direktiva 2010/75/EU o industrijskim emisijama postavlja standarde za emisije u vazduh i vodu iz industrijskih postrojenja, uključujući spaljivanje mulja.

Pored toga, Direktiva 99/31/EC o deponijama, izmijenjena Direktivom EU 2018/850, teži smanjenju odlaganja biorazgradivog otpada na deponijama, dok Okvirna Direktiva 2008/98/ES o otpadu postavlja osnovne pojmove i pravni okvir za tretman otpada unutar EU. Konačno, Direktiva 2008/105/EC uspostavlja standarde kvaliteta životne sredine, a Direktiva 2007/2/EC o infrastrukturi prostornih informacija i Direktiva 2003/4/EC o pristupu informacijama obavezuju države članice na transparentnost i dostupnost informacija javnosti.

WHO standardi koji se odnose na korišćenje kanalizacionog mulja sadržani su u opsežnim smjernicama koje se bave sigurnom upotrebom otpadnih voda, izmeta i sive vode u poljoprivredi i akvakulturi. Glavni cilj ovih smjernica je zaštita i unapređenje javnog zdravlja kroz kontrolu i smanjenje rizika povezanih s upotrebom kanalizacionog mulja, dok se istovremeno maksimiziraju ekološke i ekonomske koristi. Smjernice prepoznaju da pravilno upravljanje kanalizacionim muljem može značajno doprinijeti očuvanju životne sredine i povećanju produktivnosti u poljoprivredi, ali ističu potrebu za adekvatnim tretmanom kako bi se eliminisali ili minimizirali zdravstveni rizici. Ove smjernice takođe naglašavaju važnost uspostavljanja čvrstog političkog i institucionalnog okvira koji bi omogućio efikasnu primjenu standarda i regulativa na nacionalnom nivou, uzimajući u obzir specifične potrebe i kapacitete svake zemlje.

Ovaj okvir politika i propisa postavlja ključne smjernice za održivo upravljanje resursima, posebno u kontekstu upravljanja otpadnim vodama i muljem, te podstiče inovativne i ekološki odgovorne prakse u poljoprivredi i industriji.

2.2.2. Nacionalni propisi

Glavni cilj tretmana komunalnih i industrijskih otpadnih voda jeste očuvanje javnog zdravlja i unapređenje kvaliteta životne sredine. Kanalizacioni mulj, koji se javlja kao krajnji nusproizvod ovog procesa, proizvodi se iz različitih izvora u zavisnosti od specifičnosti tehnologije prečišćavanja. Iako se smatra neopasnim otpadom prema evropskim propisima, pravilno upravljanje ovim muljem je ključno za zaštitu životne sredine i zdravlja ljudi. U Crnoj Gori, postoje postrojenja za prečišćavanje u nekoliko opština, dok je zakonska regulativa pokrivena različitim zakonima, uključujući Zakon o upravljanju komunalnim otpadnim vodama, Zakon o vodama i Zakon o upravljanju otpadom. Lokalna samouprava, prema Zakonu o lokalnoj samoupravi, odgovorna je za upravljanje i održavanje komunalnih objekata, uključujući postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda. Ova regulativa obuhvata različite aspekte upravljanja kanalizacionim muljem, uključujući biološku, hemijsku ili termičku

obradu, kao i skladištenje u cilju smanjenja potencijala za fermentaciju i rizika po zdravlje. Zakon o upravljanju otpadom dodatno definiše kanalizacioni mulj kao otpad koji nastaje tokom tretmana otpadnih voda, čije pravilno zbrinjavanje osigurava bezbjednost životne sredine i javnog zdravlja. Ova kombinacija zakona i regulativa pruža okvir za sigurno i efikasno upravljanje kanalizacionim muljem u Crnoj Gori [21].

Prema Državnom planu upravljanja otpadom, efikasno upravljanje muljem koji nastaje tokom prečišćavanja otpadnih voda je ključno za održivo funkcionisanje sistema za prečišćavanje. U zavisnosti od specifičnih uslova kao što su količina mulja, klimatski uslovi, i sezonske varijacije, predviđene su različite strategije za tretman mulja u Crnoj Gori. Obradeni kanalizacioni mulj može se koristiti u različite svrhe, uključujući poljoprivredu, rekultivaciju zemljišta, pošumljavanje, prekrivanje deponija i za energetske potrebe spaljivanjem. Međutim, resorno Ministarstvo ne dozvoljava korišćenje obrađenog mulja u poljoprivredi, iako evropska Direktiva 86/278 EEC to predviđa. Nadalje, uspostava informacionog sistema i jedinstvene baze podataka o upravljanju otpadom, predviđena zaključkom Vlade iz 2020. godine, do sada nije implementirana od strane resornog organa (Ministarstvo turizma, 2024).

2.2.3. Analiza zahtjeva i standarda

Pravilnik o bližim uslovima koje treba da ispunjava komunalni kanalizacioni mulj u Crnoj Gori definiše stroge standarde za njegovu obradu i upotrebu, kako bi se osiguralo očuvanje zdravlja ljudi i zaštita životne sredine. Prema Pravilniku, mulj mora biti fizički, hemijski, biološki ili termički tretiran kako bi se smanjila njegova fermentabilnost i uklonili potencijalni rizici. Takođe, mulj mora biti skladišten najmanje šest mjeseci prije nego što se koristi. Postoje strogi uslovi za analizu mulja i zemljišta, pri čemu se mulj analizira najmanje jednom u šest mjeseci, a zemljište jednom godišnje. Analize uključuju procenat suve materije, organski ugljenik, pH vrijednost, sadržaj azota i fosfora, te koncentracije teških metala [21]. Pravilnik propisuje maksimalne dozvoljene koncentracije teških metala u mulju i zemljištu, osiguravajući da mulj koji se koristi u poljoprivredi ne prelazi ove granice. Na primjer, za zemljište sa pH vrijednošću iznad 7, maksimalni dozvoljeni sadržaj cinka je 200 mg/kg, dok se za mulj kvaliteta A, B ili C dozvoljeni sadržaj cinka kreće od 600 do 2500 mg/kg. Upotreba obrađenog mulja u poljoprivredi nije dozvoljena. Takođe, mulj mora biti bez patogenih organizama i organskih zagađivača poput policikličnih aromatičnih ugljovodonika (PAH) i polihlornih bifenila (PCB).

Pravilnik takođe reguliše upotrebu mulja na zelenim površinama i parkovima, kao i za rekultivaciju zemljišta na deponijama, jalovištima i rudarskim područjima. U ovim slučajevima, mulj mora zadovoljiti specifične uslove kvaliteta, zavisno od namjene. Na primjer, mulj koji se koristi za rekultivaciju mora ispunjavati standarde kvaliteta C, dok se za zelene površine zahtijeva najmanje kvalitet B. Procenat suve materije u mulju takođe igra ključnu ulogu; mulj mora imati minimalni procenat suve materije od 25%, dok za poljoprivrednu upotrebu ovaj procenat mora biti najmanje 50%.

Konačno, Pravilnik detaljno opisuje procedure uzorkovanja i analitičke metode koje se koriste za ispitivanje mulja i zemljišta. Uzorkovanje mora biti reprezentativno i uključuje uzimanje uzoraka sa dubine do 25 cm. Analize teških metala se vrše pomoću atomske apsorpcione spektrometrije, dok se sadržaj polihlorovodoničnih bifenila određuje gasnom hromatografijom. Ove procedure osiguravaju da su rezultati analiza tačni i pouzdani, što je ključno za bezbjednu primjenu komunalnog kanalizacionog mulja u skladu sa zakonskim propisima.

2.2.4. Presjek stanja upravljanja kanalizacionim muljem u Crnoj Gori

U Crnoj Gori su operativna postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda u nekoliko gradova, uključujući Podgoricu, Budvu, Herceg Novi, Mojkovac, Tivat, Kotor, Nikšić, Pljevlja, i Berane, kao i manja postrojenja u Virpazaru, Rijeci Crnojevića, Luštici, Jazu i Šavniku. U skorije vrijeme izgrađeni su i biljni uređaji za prečišćavanje u Andrijevici i Petnjici. Kanalizacioni mulj se uglavnom skladišti unutar ovih postrojenja ili izvozi. Procijenjena količina mulja u 2030. godini iznosiće oko 18.770 tona godišnje, dok je u 2020. godini proizvedeno ukupno 9.225 tona mulja. Povećanje broja funkcionalnih postrojenja rezultiralo je i povećanjem količine mulja [20].

Postrojenje za prečišćavanje otpadnih voda u Beranama funkcioniše već tri godine, ali je imalo brojne tehničke probleme zbog nedovršenih poslova od strane izvođača. Ovi problemi su spriječili proizvodnju aktivnog mulja, koji je krajnji proizvod procesa prečišćavanja. U julu 2023. godine, proces prečišćavanja je konačno zaokružen, ali preduzeće još uvijek ne može da precizno odredi količinu proizvedenog mulja. Mulj se trenutno skladišti u SBR bazenima i prolazi kroz proces zgušnjavanja i dehidracije za dalje odlaganje.

Na postrojenju za preradu komunalne otpadne vode u Budvi, proces prečišćavanja se obavlja koristeći aktivni mulj, pri čemu višak mulja mora biti uklonjen kako bi se održala optimalna funkcionalnost sistema. Taj višak mulja prolazi kroz postupak kondicioniranja, koristeći rastvor željezo (III) hlorida i krečno mlijeko, prije nego što se obezbedi na filter

presama, dostižući suvoću od oko 30%. Ovakav mulj se deponuje na sanitarnu deponiju “Livade” u Podgorici. Međutim, preduzeće smatra da ovo rješenje nije trajno, te traži bolje metode za smanjenje i dalju obradu mulja kako bi se osiguralo ekološki i ekonomski održivo rješenje. Zbog toga se ističe potreba za podrškom lokalnih i državnih organa u pronalaženju dugoročnih rješenja.

Postrojenje za prečišćavanje otpadnih voda u Podgorici je u funkciji od 1978. godine i koristi konvencionalnu tehnologiju baziranu na aktivnom mulju, sa kapacitetom od 17.000 m³/dan za hidrauličko opterećenje i 55.000 ekvivalentnih stanovnika za organsko opterećenje. Zbog nedovoljnih kapaciteta, dio otpadnih voda prolazi samo preliminarni tretman prije ispuštanja u rijeku Moraču. Obrada mulja se obavlja zgušnjavanjem na trakastom ugušćivaču i dehidratacijom na centrifugama, a finalni produkt, dehidrirani mulj, interno se zbrinjava na lokaciji postrojenja. Planirano je da buduće količine mulja budu spaljivane u novom postrojenju na istoj lokaciji, koje će moći da prihvati i mulj iz okolnih opština.

Na postrojenju za prečišćavanje otpadnih voda u Herceg Novom, linija za tretman otpadnih voda je u fazi probnog rada, dok postrojenje za tretman mulja još nije završeno.

Proizvedeni mulj se trenutno skladišti u jednom od SBR tankova. U Pljevljima linije za tretman mulja i gasa još nisu aktivirane, a mulj se skladišti u SBR bazenima bez predviđenog rješenja za dalje postupanje. Generalno, kanalizacioni mulj se skladišti unutar postrojenja, bez definisanih planova za njegov tretman na nivou države ili lokalnih samouprava.

Crna Gora planira upravljanje kanalizacionim muljem s ciljem minimalizacije odlaganja na deponijama, sa maksimalno 5% mase suve materije do 2035. godine. Predviđa se izgradnja mreže postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda do 2030. godine i usvajanje tehnoloških rješenja za obradu mulja, poput kompostiranja, anaerobne digestije, ili korišćenja mulja kao goriva. Odlaganje mulja na deponijama je poslednja opcija, pod uslovom da mulj ispunjava higijenske standarde i sadrži manje od 40% vlage. Takođe, planira se procjena mogućnosti izgradnje nacionalnog ili regionalnih postrojenja za spaljivanje mulja.

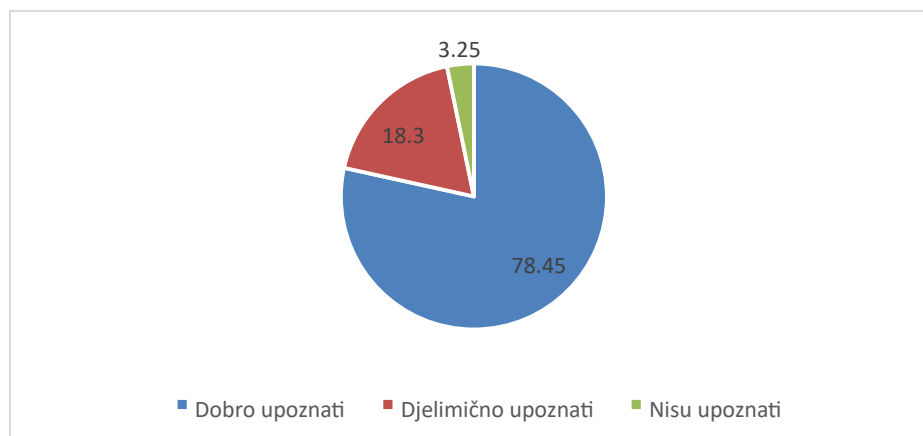
Mjera za završetak mreže postrojenja za tretman otpadnih voda uključuje niz koraka koji su ključni za adekvatno upravljanje kanalizacionim muljem. Prvi korak je uspostavljanje organizacione strukture za sakupljanje mulja, zatim izrada studija i određivanje konačnih lokacija postrojenja. Potrebno je osigurati finansiranje izgradnje tih postrojenja i primijeniti odgovarajuće tehnologije za obradu mulja, kao što su anaerobna ili aerobna prerada, te kompostiranje. Takođe, energija iz mulja može se koristiti kao gorivo, a razmatra se i izgradnja

nacionalnog ili regionalnih postrojenja za spaljivanje. Na kraju, predviđa se smanjenje krajnje količine mulja kroz usvajanje novih tehnologija poput termičke hidrolize i bioremedijacije.

2.2.4.1. Rezultati ankete

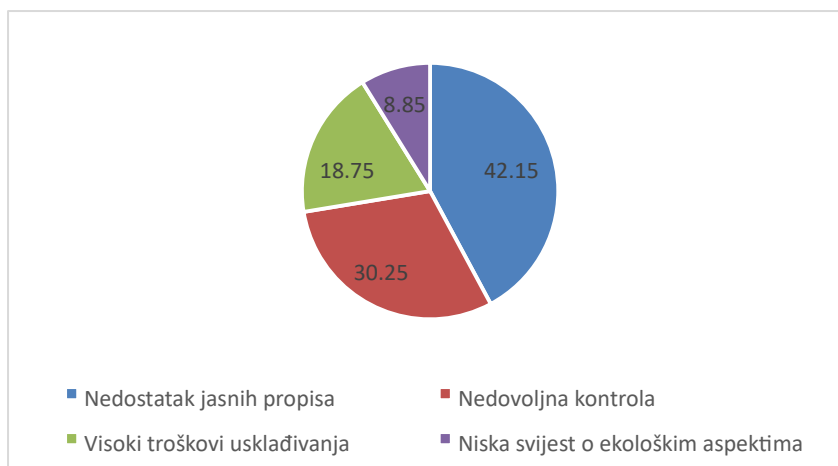
Istraživanje o efikasnoj upotrebi kanalizacionog mulja u Crnoj Gori sprovedeno je putem online ankete u periodu od jula do avgusta 2024. godine, koristeći Facebook za distribuciju. Uzorak od 300 ispitanika, odabranih nasumično, činio je reprezentativnu grupu građana zainteresovanih za teme održivog razvoja i upravljanja otpadom. Cilj istraživanja bio je prikupljanje podataka o stavovima prema upotrebi kanalizacionog mulja za energetske svrhe i identifikacija regulatornih izazova. Anketa je obuhvatila kombinaciju Likertove skale i opcionalnih odgovora.

Rezultati ankete pokazuju visok nivo svijesti o regulatornim propisima (slika 3.1.), sa 78,45% ispitanika koji su dobro upoznati sa njima. Ovo ukazuje na solidnu osnovu za implementaciju naprednih tehnologija, jer su ključni akteri svjesni postojećih pravnih okvira. Međutim, 3,25% ispitanika nije upoznato sa propisima, što ukazuje na potrebu za dodatnom edukacijom i informisanjem kako bi se osigurao potpuni uspjeh inicijativa.



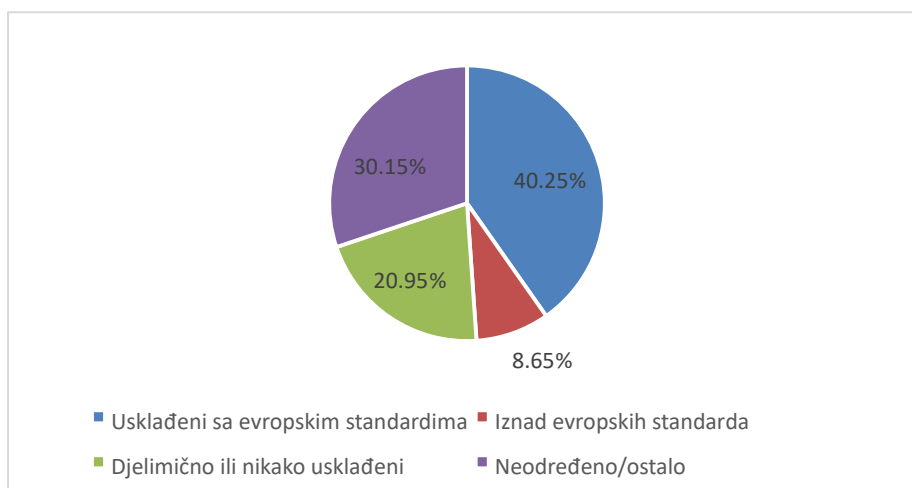
Slika 3.1. Grafički prikaz nivoa svijesti o regulatornim propisima

Prema slici 3.2 nedostatak jasnih propisa i nedovoljna kontrola prepoznati su kao najveći izazovi (42,15% i 30,25%). Ovo sugerise potrebu za boljim definisanjem zakonskih okvira i jačanjem nadzornih mehanizama. Problemi kao što su visoki troškovi usklađivanja i niska svijest o ekološkim aspektima takođe treba adresirati kako bi se osigurala održivost.



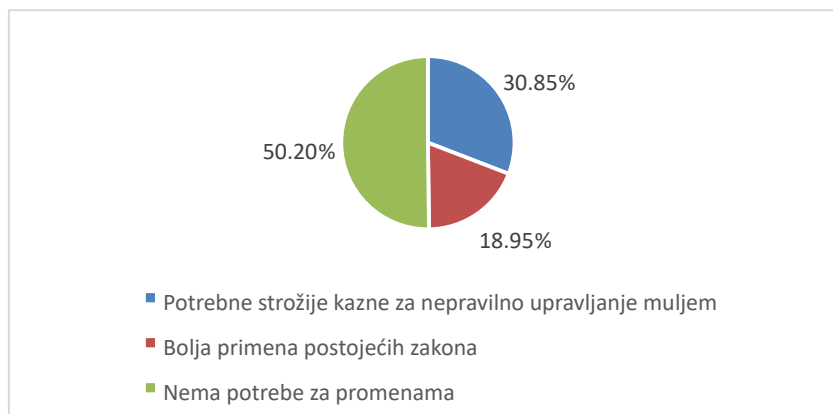
Slika 3.2. Prikaz najvećih izazova u upravljanju muljem

Većina ispitanika smatra da su propisi uglavnom usklađeni sa evropskim standardima (40,25%), dok je 8,65% mišljenja da su čak iznad tih standarda (slika 3.3.). Ovo ukazuje na pozitivan trend u harmonizaciji lokalnih i evropskih propisa, što može olakšati implementaciju održivih praksi. Ipak, postoji prostor za poboljšanje, s obzirom da 20,95% ispitanika smatra da su propisi samo djelimično ili nikako usklađeni.



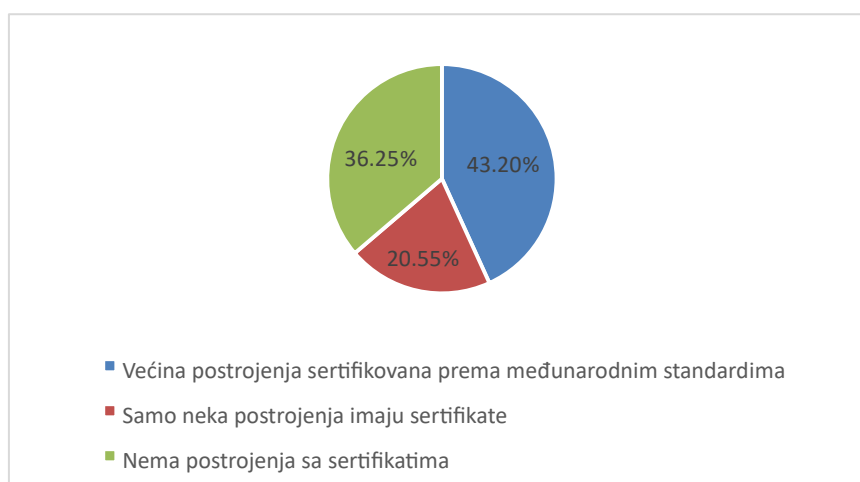
Slika 3.3. Usklađenost propisa sa evropskim standardima

Rezultati pokazuju da značajan broj ispitanika (30,85%) smatra da su potrebne strožije kazne za nepravilno upravljanje muljem, dok 18,95% vjeruje da bi bolja primjena postojećih zakona bila dovoljna. Ovo ukazuje na potrebu za preispitivanjem i eventualnim pooštavanjem sankcija kako bi se osiguralo pravilno upravljanje kanalizacionim muljem i smanjenje ekoloških rizika.



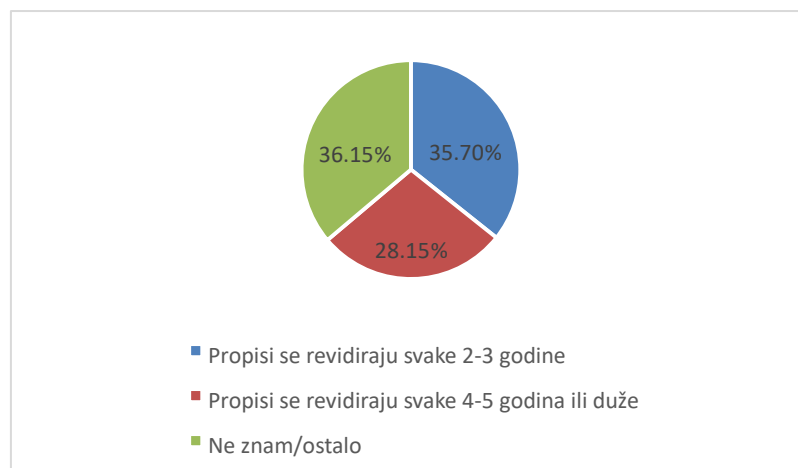
Slika 3.4. Kazne za nepravilno upravljanje muljem

Većina ispitanika (43,20%) navodi da su većina postrojenja u njihovoj opštini sertifikovana prema međunarodnim standardima. Ovaj podatak ukazuje na visoki nivo kvaliteta tretmana mulja, što je pozitivno za održivost. Međutim, činjenica da 20,55% ispitanika tvrdi da samo neka postrojenja imaju sertifikate pokazuje potrebu za daljim unaprjeđenjem i širenjem sertifikacionih procesa.



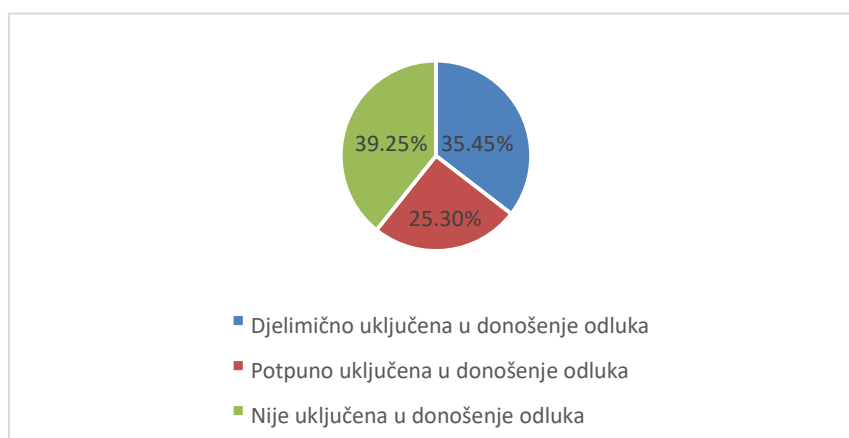
Slika 3.5. Sertifikacija postrojenja za preradu kanalizacionog mulja

Oko 35,70% ispitanika navodi da se propisi revidiraju svake 2-3 godine, što ukazuje na relativno redovan proces ažuriranja. Međutim, činjenica da 28,15% ispitanika smatra da se propisi revidiraju na svakih 4-5 godina ili duže ukazuje na potencijalnu potrebu za češćim revizijama kako bi se osiguralo da propisi prate tehnološke i ekološke promjene.



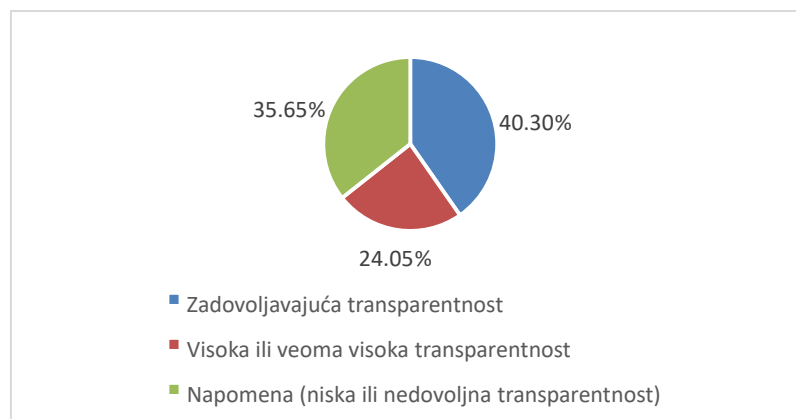
Slika 3.6. Revidiranje propisa o obradi kanalizacionog mulja

Rezultati pokazuju da je lokalna zajednica djelimično uključena u donošenje odluka (35,45%), što ukazuje na potencijal za poboljšanje transparentnosti i angažovanja zajednice. Veći stepen uključivanja mogao bi povećati prihvatanje novih tehnologija i osigurati bolju implementaciju održivih praksi.



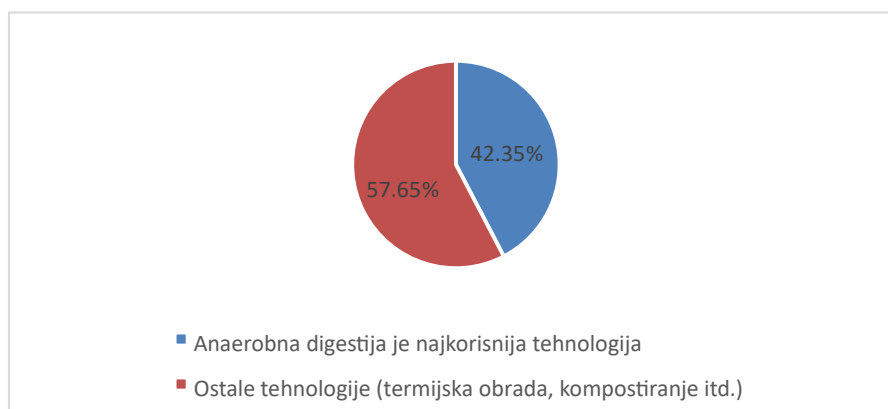
Slika 3.7. Uključenost zajednice u donošenje odluka

Rezultati pokazuju da 40,30% ispitanika smatra da je transparentnost informacija zadovoljavajuća, dok samo 24,05% smatra da je visoka ili veoma visoka. Ovo ukazuje na potrebu za poboljšanjem dostupnosti informacija i povećanjem transparentnosti kako bi se postigla veća podrška javnosti za održive prakse u upravljanju muljem.



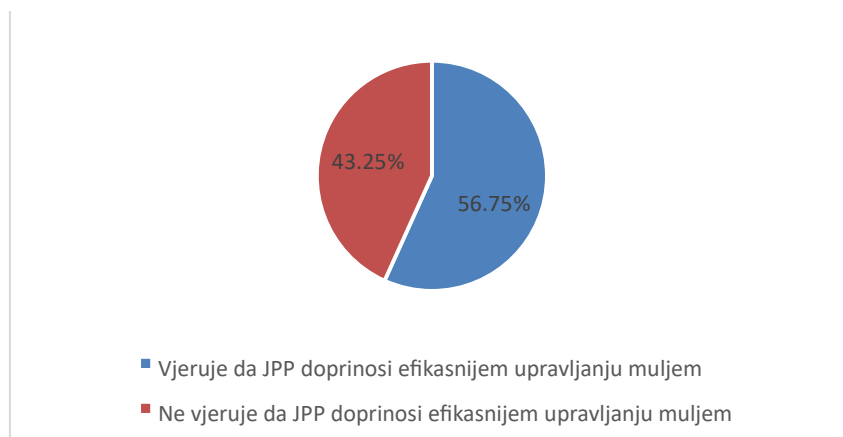
Slika 3.8. Transparentnost informacija o upravljanju kanalizacionim mulje

Anaerobna digestija je prepoznata kao najkorisnija tehnologija (42,35%), što podržava hipotezu da energetska upotreba mulja može značajno doprinijeti održivosti. Kombinovanje sa drugim tehnologijama poput termičke obrade i kompostiranja moglo bi dodatno povećati efikasnost i ekološke koristi.



Slika 3.9. Najkorisnije tehnologije u obradi kanalizacionog mulja

Većina ispitanika (56,75%) vjeruje da javno-privatna partnerstva mogu značajno doprineti efikasnijem upravljanju muljem, što sugerise da bi ovakav model saradnje mogao biti ključan za uspjeh održivih praksi. Uključivanje privatnog sektora moglo bi donijeti potrebna sredstva i stručnost za unaprjeđenje tretmana i energetske upotrebe mulja.



Slika 3.10. Uticaj javno-privatnog partnerstva (JPP) na efikasnije upravljanje muljem

Ovi rezultati ukazuju na generalno pozitivan stav prema integraciji naprednih tehnologija u postojeće sisteme, uz naglasak na potrebu za poboljšanjem regulatornih okvira i većim angažmanom zajednice i privatnog sektora kako bi se osigurala održivost i smanjenje negativnog ekološkog uticaja.

2.2.5. Rezultati intervjua

Inženjer za zaštitu životne sredine je istakao da su trenutne prakse u upravljanju kanalizacionim muljem u Crnoj Gori još uvijek u ranoj fazi razvoja, te da postoji potreba za značajnim unapređenjem, posebno u pogledu pretvaranja mulja u električnu energiju. Smatrao je da bi upotreba kanalizacionog mulja u energetske svrhe mogla značajno smanjiti negativan ekološki uticaj, smanjujući količinu otpada i obezbjeđujući održiv izvor električne energije. Međutim, ukazao je na prepreke kao što su nedostatak infrastrukture i nedovoljno razvijena regulativa. Ipak, vidio je potencijal u javno-privatnim partnerstvima za rješavanje ovih izazova. Takođe je naglasio potrebu za povećanjem svijesti lokalne zajednice o potencijalu mulja kao izvora električne energije, te je sugerisao da su potrebne regulatorne izmjene kako bi se olakšala implementacija ovih tehnologija, uz dodatno istraživanje ekonomskih i ekoloških koristi.

Inženjer energetike je istakao značaj obnovljivih izvora električne energije i poboljšanje efikasnosti energetske sistema kao ključnih faktora za održivi razvoj. Naglasio je da je pretvaranje kanalizacionog mulja u električnu energiju bio značajan korak ka smanjenju

zavisnosti od fosilnih goriva i smanjenju emisije štetnih gasova. Posebno je istakao da bi integracija ovih tehnologija unaprijedila energetske miks, poboljšala ukupnu energetske efikasnost i istovremeno riješila problem otpada, što je smatrao ključnim za dugoročnu održivost i ekološku odgovornost.

Predstavnik lokalne samouprave je istakao da je saradnja između lokalne zajednice i privatnog sektora ključna za uspješno upravljanje kanalizacionim muljem u energetske svrhe. Naglasio je da lokalne vlasti prepoznaju važnost ovakvih inicijativa, ali su suočene s izazovima kao što su ograničeni budžeti i nedovoljna tehnička opremljenost. Takođe, istakao je potrebu za većim angažmanom lokalne zajednice i poboljšanjem infrastrukture kako bi se osigurao održivi razvoj i efikasno korišćenje mulja za proizvodnju električne energije.

Pravnik koji radi na propisima u oblasti životne sredine i energetike naglasio je važnost usklađivanja pravnog okvira s novim tehnologijama koje omogućavaju korišćenje kanalizacionog mulja za proizvodnju električne energije. Istakao je da trenutna regulativa nije dovoljno razvijena da bi podržala ovakve inicijative, što predstavlja značajnu prepreku. Međutim, pravnik je vjerovao da se kroz ažuriranje postojećih zakona i uvođenje novih propisa može omogućiti efikasnije upravljanje muljem, što bi značajno doprinijelo održivosti i smanjenju ekološkog uticaja. Takođe, ukazao je na potrebu za većim angažmanom svih relevantnih aktera kako bi se ostvarila pravna i regulatorna podrška za ove projekte.

Predstavnik nevladine organizacije koja se bavi održivim razvojem i zaštitom životne sredine istakao je značaj korišćenja kanalizacionog mulja u energetske svrhe kao ključnog koraka ka postizanju održivosti. On je naglasio da ovakvi projekti mogu značajno smanjiti ekološki uticaj i promovisati cirkularnu ekonomiju, ali je ukazao na potrebu za boljim informisanjem i edukacijom javnosti o prednostima ovakvih rešenja. Takođe, predstavnik NVO je apelovao na jaču saradnju između civilnog sektora, države i privatnog sektora kako bi se prevazišli izazovi poput nedostatka regulative i infrastrukture.

2.2.6. Uskladenost sa ciljevima održivog razvoja (SDG)

Implementacija tehnologija za upravljanje kanalizacionim muljem direktno doprinosi postizanju ciljeva održivog razvoja u nekoliko ključnih oblasti. Prvo, tretman mulja smanjuje zagađenje voda, čime se poboljšavaju čisti vodni resursi i sanitarni uslovi. Nadalje, proizvodnja toplotne i električne energije iz mulja, preko proizvodnje biogasa, doprinosi stvaranju čiste električne energije, smanjujući oslanjanje na fosilna goriva. Konačno, smanjenje emisija tokom

procesa obrade mulja pomaže u ublažavanju klimatskih promjena i unapređenju kvaliteta životne sredine.

Kada se primjenjuju principi cirkularne ekonomije na upravljanje kanalizacionim muljem, ovaj materijal se tretira kao resurs, a ne kao otpad. Biološki materijali, poput kanalizacionog mulja, mogu se obraditi putem procesa kao što su anaerobna digestija i kompostiranje. Anaerobna digestija razlaže mulj u odsustvu kiseonika, proizvodeći biogas koji se koristi kao čista električna energija, dok kompostiranje pretvara mulj u hranljiv materijal za zemljište. Ove metode pomažu u postizanju ciljeva održivog razvoja, posebno u kontekstu čistih voda, sanitarnih uslova i smanjenja zagađenja.

Uklapanjem u globalne trendove, poput cirkularne ekonomije, navedene metode obrade mulja omogućavaju pretvaranje otpada u korisne resurse, kao što su biogas i kompost. Ovo smanjuje emisiju štetnih gasova, poboljšava kvalitet zemljišta i pomaže u ostvarivanju ciljeva Ujedinjenih nacija za održivi razvoj, posebno u oblastima čiste električne energije i zaštite životne sredine [14].

2.3. Održivo upravljanje otpadom

Literatura prepoznaje strategije koje imaju potencijal da smanje ekološki uticaj kanalizacionog mulja i poboljšaju efikasnost korišćenja resursa, čime direktno doprinose ciljevima održivog razvoja kao što su smanjenje zagađenja, poboljšanje upravljanja vodama, i povećanje proizvodnje obnovljive električne energije [15].

Mulj se može koristiti kao organsko đubrivo zbog visokog sadržaja hranljivih materija poput azota i fosfora. Međutim, prije primjene, mulj mora biti tretiran kako bi se uklonili patogeni i smanjio sadržaj zagađivača, poput teških metala i organskih kontaminanata. Ova strategija pomaže u poboljšanju kvaliteta zemljišta i smanjuje potrebu za sintetičkim đubrivima. Korišćenje mulja u poljoprivredi može značajno doprinijeti zatvaranju ciklusa hranljivih materija, ali je neophodno pažljivo upravljanje kako bi se izbjegli negativni efekti na zdravlje i okolinu. Spaljivanje mulja predstavlja jednu od strategija za smanjenje zapremine otpada i proizvodnju električne energije. Termička obrada pomaže u smanjenju količine mulja koji se odlaže na deponije, smanjuje rizik od zagađenja i omogućava obnovu energije iz otpada. Anaerobna digestija podrazumijeva razgradnju organskog materijala u mulju putem mikroorganizama u uslovima bez kiseonika, čime se proizvodi biogas bogat metanom. Biogas se može koristiti kao izvor obnovljive električne energije za proizvodnju električne energije ili toplote. Anaerobna digestija ne samo da smanjuje zapreminu mulja, već takođe proizvodi

stabilan ostatak koji se može koristiti u poljoprivredi ili bezbjedno odlagati. Ova strategija doprinosi smanjenju emisija gasova staklene bašte i povećava energetska efikasnost postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda. Kompostiranje je biološki proces kojim se kanalizacioni mulj, često u kombinaciji sa drugim organskim materijalima, razlaže pod aerobnim uslovima kako bi se proizveo stabilan i hranljiv proizvod sličan zemljištu, koji se može koristiti za poboljšanje strukture i plodnosti zemljišta. Ovaj proces uključuje kontrolisano miješanje, provjetravanje i održavanje odgovarajuće vlažnosti i temperature kako bi se osiguralo efikasno razlaganje organske materije. Kompostiranje doprinosi održivom upravljanju otpadom smanjujući potrebu za sintetičkim đubrivima i obogaćuje zemljište organskom materijom, istovremeno smanjujući volumen otpada koji se odlaže na deponije.

ANALIZA NAUČNIH STUDIJA I TEHNOLOŠKIH DOSTIGNUĆA

Ovo poglavlje fokusira se na pregled trenutnog stanja istraživanja i razvoja u oblasti biohemijskih i termohemijskih metoda za proizvodnju energije. Ovo poglavlje sadrži tri glavne sekcije: pregled relevantne literature, identifikaciju prepreka i izazova, i potencijalna unapređenja tehnologija.

Unapređenje tehnologije aerobne digestije ključan je korak ka povećanju njene efikasnosti, održivosti i ekonomske isplativosti. Iako se aerobna digestija suočava s brojnim izazovima, postoje različite strategije i tehnološka rješenja koja mogu pomoći u prevazilaženju ovih prepreka i poboljšanju cjelokupnog procesa.

Jedan od najvažnijih aspekata unapređenja aerobne digestije je optimizacija procesa provjetravanja. Energetska efikasnost može se značajno poboljšati primjenom naprednih sistema za kontrolu kiseonika, kao što su senzori za praćenje nivoa kiseonika u realnom vremenu i automatizovani sistemi za regulaciju aeratora [1]. Ovi sistemi omogućavaju preciznu kontrolu kiseonika, smanjujući potrošnju električne energije i istovremeno održavajući optimalne uslove za mikrobiološku aktivnost.

Autori ovog rada analizirali su održivost korišćenja kanalizacionog mulja kao resursa za dobijanje električne energije, pružajući sveobuhvatan pregled različitih tehnologija za energetska valorizaciju mulja. Fokus je stavljen na ekološke, ekonomske i socijalne aspekte ovih procesa, s ciljem identifikacije potencijalno održivih praksi u upravljanju otpadom. Rad naglašava značaj integracije ovih tehnologija u postojeće sisteme upravljanja otpadom kako bi se postigla maksimalna korist za zajednicu i okolinu [13].

Korišćenje varijabilnih frekventnih pogona (VFD) za aeratore može dodatno smanjiti potrošnju električne energije prilagođavanjem brzine aeracije u skladu s trenutnim potrebama sistema [2]. Uvođenje naprednih bioreaktora, kao što su membranski bioreaktori (MBR) ili sekvencijalni šaržni reaktori (SBR), može značajno povećati efikasnost aerobne digestije [3]. Ovi reaktori omogućavaju bolju kontrolu nad procesom, veću koncentraciju biomase i poboljšano uklanjanje zagađivača. Na primjer, membranski bioreaktori koriste membranske filtre za odvajanje mulja od pročišćene vode, što omogućava recirkulaciju aktivne biomase i povećava stabilnost procesa.

Energetska održivost aerobne digestije može se poboljšati integracijom s obnovljivim izvorima električne energije. Na primjer, korišćenje solarne energije za napajanje aeratora ili sistema za grijanje može smanjiti operativne troškove i emisije gasova s efektom staklene bašte

[4]. Pored toga, generisana toplota iz procesa može se koristiti za grijanje reaktora, što dodatno smanjuje potrebu za vanjskim energetskim izvorima.

Efikasno upravljanje toplotom unutar aerobnih digestora može se postići uvođenjem sistema za kontrolu temperature koji koriste tehnologije za odvođenje toplote ili njenu recirkulaciju u sistem [5]. Na ovaj način se održava optimalna temperatura za mikrobiološku aktivnost, smanjujući rizik od pregrijavanja i poboljšavajući ukupnu efikasnost procesa. Budući da aerobna digestija proizvodi značajne količine sekundarnog mulja,

unapređenje tehnologija za tretman i zbrinjavanje mulja je od ključne važnosti. Tehnike kao što su dehidracija, termička obrada ili kompostiranje mogu smanjiti zapreminu mulja i poboljšati njegove karakteristike za dalju upotrebu ili zbrinjavanje [6]. Integracija ovih tehnologija u proces može značajno smanjiti troškove zbrinjavanja i uticaj na životnu sredinu. Dodavanje specifičnih mikrobioloških kultura ili enzima može poboljšati efikasnost razgradnje organske materije u aerobnoj digestiji. Ovi dodaci mogu povećati brzinu biorazgradnje, smanjiti vrijeme zadržavanja i poboljšati stabilnost procesa, posebno u uslovima kada su osnovni mikrobiološki procesi inhibirani [7]. Primjena mikrobioloških dodataka posebno je korisna u tretmanu otpada sa složenim organskim sastavom.

Implementacija naprednih sistema za automatizaciju i digitalizaciju može unaprijediti nadzor i kontrolu aerobne digestije. Korišćenje senzora, kontrolnih sistema i softvera za upravljanje procesima omogućava preciznu kontrolu ključnih parametara, kao što su pH, temperatura i nivo kiseonika, što povećava efikasnost i pouzdanost procesa [8]. Digitalizacija takođe omogućava analizu podataka u realnom vremenu, što olakšava donošenje odluka i optimizaciju procesa.

Autori su istraživali napredak u proizvodnji biodizela iz industrijskog i komunalnog kanalizacionog mulja, analizirajući različite tehnike ekstrakcije ulja i njegovog pretvaranja u biodizel. Poseban fokus je stavljen na inovativne metode koje povećavaju efikasnost konverzije, smanjujući troškove i negativan uticaj na životnu sredinu. Ovaj pristup ima potencijal da značajno doprinese razvoju obnovljivih izvora električne energije, istovremeno rješavajući problem odlaganja mulja [1].

Pored tehnoloških unapređenja, važan aspekt je i unapređenje ekonomskih modela za aerobnu digestiju. Razvoj novih poslovnih modela koji uključuju prodaju nusproizvoda, kao što su kompost ili drugi materijali dobijeni iz sekundarnog mulja, može poboljšati ekonomsku održivost procesa [9]. Takođe, subvencije i podsticaji za korišćenje obnovljivih izvora električne energije i tehnologija za tretman otpada mogu igrati ključnu ulogu u širenju primjene aerobne digestije.

Kontrola i smanjenje emisije gasova poput CO₂ i amonijaka tokom aerobne digestije može se postići primjenom tehnologija za hvatanje i tretman gasova. Na primjer, biološki filteri i hemijski scrubberi mogu se koristiti za smanjenje emisija i kontrolu mirisa, čime se poboljšava uticaj postrojenja na životnu sredinu [10]. Primjena ovih tehnologija je ključna za usklađivanje sa sve strožijim ekološkim standardima i propisima.

Unapređenje tehnologije aerobne digestije takođe zahtijeva kontinuirano obrazovanje i obuku operatera i inženjera. Redovna obuka o novim tehnologijama, postupcima i najboljim praksama može značajno poboljšati performanse postrojenja i osigurati da se nove tehnologije pravilno implementiraju i koriste [11].

Kombinovanjem inovativnih tehnoloških rješenja, ekonomskih modela i edukacije osoblja, može se značajno poboljšati efikasnost i održivost aerobne digestije. Ovo neće samo smanjiti uticaj na životnu sredinu, već će i doprinijeti ekonomskom razvoju kroz efikasnije korišćenje resursa i podsticanje upotrebe obnovljivih izvora energije.

Unapređenje tehnologije anaerobne digestije (AD) i rješavanje izazova povezanih s njom zahtijeva primjenu različitih tehnoloških inovacija, optimizaciju procesa i razvoj novih pristupa koji mogu poboljšati efikasnost, stabilnost i održivost AD postrojenja. Jedan od najefikasnijih načina za unapređenje anaerobne digestije je primjena predtretmana sirovina kako bi se povećala njihova biorazgradivost. Tehnike predtretmana kao što su termička hidroliza, mehaničko usitnjavanje, ultrazvučni tretman, kao i hemijski tretman (dodavanje kiselina ili baza) mogu značajno povećati stopu razgradnje kompleksnih organskih molekula i time

povećati proizvodnju biogasa [11]. Primjena predtretmana posebno je korisna za sirovine sa visokim sadržajem lignina ili drugih teško razgradivih materijala.

Optimizacija ključnih parametara procesa, kao što su temperatura, pH, organsko opterećenje i vrijeme hidrauličkog zadržavanja, od suštinskog je značaja za povećanje efikasnosti anaerobne digestije. Na primjer, termofilna digestija, koja se odvija na višim temperaturama (55-60 °C), može povećati brzinu proizvodnje biogasa, ali zahtijeva dodatnu energiju za održavanje temperature [12]. Optimizacija ovih parametara može pomoći u postizanju boljih rezultata bez potrebe za značajnim kapitalnim ulaganjima. Pjenjenje i prekiiselost su uobičajeni problemi u AD postrojenjima, ali se mogu kontrolisati primjenom odgovarajućih tehnika i monitoringa. Uvođenje specijalizovanih senzora za praćenje pjenjenja, kao i dodavanje antifoam agenasa, može pomoći u smanjenju ovih problema [13]. Slično tome, kontrola pH vrijednosti kroz dodavanje alkalnih supstanci ili primjena buffer sistema može pomoći u prevenciji prekiiselosti, što omogućava stabilniji rad postrojenja [14].

Kodigestija, odnosno istovremena digestija različitih tipova organskog otpada, može poboljšati ukupnu efikasnost AD procesa. Kombinovanjem sirovina koje imaju komplementarne karakteristike, kao što su visoki C/N odnos i bogatstvo nutrijentima, može se postići bolja ravnoteža nutrijenata i veća proizvodnja biogasa [15]. Na primjer, kombinovanje stajnjaka sa otpadom iz prehrambene industrije može povećati biorazgradivost i stabilnost procesa. Dodavanje aditiva kao što su mikroelementi (npr. nikl, kobalt) ili biougalj može poboljšati mikrobiološku aktivnost u digestoru, smanjujući inhibiciju i povećavajući proizvodnju metana [16]. Biougalj, na primjer, može adsorbovati toksične spojeve i stabilizovati pH, čime se poboljšava efikasnost digestije.

Razvoj i primjena naprednih tehnologija reaktora, kao što su anaerobni filteri, fluidizovani slojevi i anaerobni sekvencijalni reaktori (ASBR), omogućavaju bolju kontrolu procesa i veću efikasnost konverzije organske materije u biogas [17]. Ovi reaktori su dizajnirani tako da optimizuju zadržavanje mikroorganizama unutar sistema, omogućavajući veće stope razgradnje i kraće vrijeme zadržavanja. Razvoj tehnologija za poboljšanje kvaliteta digestata, kao što su dehidracija, separacija čvrstih i tečnih frakcija, te daljnja obrada za proizvodnju komposta ili drugih proizvoda, može pomoći u smanjenju troškova zbrinjavanja i povećanju ekonomske isplativosti AD procesa [18]. Korišćenje digestata kao visokokvalitetnog đubriva može značajno smanjiti potrebu za sintetičkim đubrivima.

Za rješavanje ekonomskih izazova, potrebno je razviti poslovne modele koji maksimiziraju koristi od proizvodnje biogasa i digestata. To može uključivati prodaju biogasa kao goriva, korišćenje kombinovane proizvodnje toplote i električne energije (CHP), kao i prodaju digestata kao organskog đubriva [19]. Takođe, važno je osigurati pristup subvencijama i podsticajima koji podržavaju obnovljive izvore električne energije. Konačno, unapređenje AD tehnologije zahtijeva podršku politika koje promovišu održivo upravljanje otpadom i obnovljive izvore električne energije. Jasni i povoljni zakonski okviri, kao i podsticaji za ulaganja u AD postrojenja, ključni su za širenje primjene ove tehnologije [20]. Saradnja između vlada, industrije i istraživačkih institucija može ubrzati usvajanje naprednih AD tehnologija. Unapređenje procesa fermentacije kanalizacionog mulja ključno je za povećanje efikasnosti, smanjenje troškova i smanjenje negativnog uticaja na životnu sredinu. Različite tehnologije i pristupi mogu se primijeniti kako bi se poboljšali rezultati fermentacije i omogućila šira primjena ove tehnologije u tretmanu otpadnih voda. Kontinuirano praćenje i kontrola ključnih parametara kao što su pH, temperatura i nivo kiseonika su ključni za optimizaciju fermentacije. Primjena automatizovanih sistema za nadzor i kontrolu može pomoći u održavanju stabilnih uslova unutar reaktora, čime se povećava efikasnost procesa i smanjuje rizik od inhibicije mikrobiološke aktivnosti [5]. Napredni senzori i softver za upravljanje procesom omogućavaju preciznu kontrolu ovih parametara, čime se smanjuju varijacije u kvalitetu i kvantitetu biogasa.

Kodigestija, odnosno simultana fermentacija kanalizacionog mulja s drugim vrstama organskog otpada, kao što su biootpad iz domaćinstava ili poljoprivredni ostaci, može značajno povećati proizvodnju biogasa [6]. Ovaj pristup omogućava bolje balansiranje nutrijenata u reaktoru, smanjujući potrebu za dodatnim hranljivim materijama i poboljšavajući stabilnost procesa. Kodigestija takođe omogućava efikasnije korišćenje postojeće infrastrukture, smanjujući ukupne troškove. Dodavanje specifičnih mikroorganizama ili enzima može poboljšati brzinu i efikasnost fermentacije. Ovi mikrobiološki dodaci mogu pomoći u razgradnji teško razgradivih komponenti mulja, čime se povećava proizvodnja biogasa i smanjuje količina preostalog mulja [7]. Takođe, primjena probiotičkih kultura može smanjiti rizik od inhibicije i poboljšati otpornost mikrobiološke zajednice na promjene u sastavu mulja. Predtretman kanalizacionog mulja može značajno poboljšati efikasnost fermentacije. Tehnike kao što su termička hidroliza, ultrazvučni tretman ili hemijski tretman (dodavanje kiselina ili baza) mogu povećati biorazgradivost mulja i ubrzati proces fermentacije [8].

Predtretman omogućava bolju dostupnost organske materije mikroorganizmima, što rezultira većom proizvodnjom biogasa i smanjenjem količine preostalog mulja. Unapređenje energetske efikasnosti može se postići integracijom sistema za obnovljive izvore električne energije, kao što su solarni paneli za napajanje sistema za provjetravanje ili grijanje reaktora. Takođe, primjena sistema za rekuperaciju toplote može smanjiti potrebe za vanjskim izvorima električne energije, čime se smanjuju operativni troškovi [9]. Korišćenje otpadne toplote generisane tokom fermentacije za zagrijavanje drugih dijelova postrojenja dodatno povećava ukupnu efikasnost sistema.

Uvođenje naprednih reaktora, kao što su membranski bioreaktori (MBR) ili anaerobni sekvencijalni šaržni reaktori (ASBR), može značajno povećati efikasnost fermentacije [10]. Ovi reaktori omogućavaju bolje zadržavanje mikroorganizama u sistemu, što dovodi do veće brzine razgradnje organske materije i povećane proizvodnje biogasa. Takođe, membranski bioreaktori omogućavaju visoku koncentraciju biomase i efikasno odvajanje mulja od pročišćene vode.

Pjenjenje i inhibicija su česti problemi u fermentaciji, ali se mogu kontrolisati primjenom odgovarajućih tehnika. Dodavanje antifoam agenasa i poboljšanje sistema za uklanjanje pjene mogu smanjiti operativne probleme povezane s pjenjenjem [11]. Takođe, optimizacija uslova fermentacije, kao što su organsko opterećenje i pH, može pomoći u smanjenju rizika od inhibicije mikrobiološke aktivnosti.

Unapređenje tehnologija za tretman i zbrinjavanje preostalog mulja ključno je za smanjenje troškova i ekološkog uticaja fermentacije. Tehnike kao što su dehidracija, termička obrada ili kompostiranje mogu smanjiti zapreminu mulja i poboljšati njegove karakteristike za dalju upotrebu ili konačno zbrinjavanje [12]. Efikasno zbrinjavanje mulja može značajno smanjiti operativne troškove i povećati ekološku održivost procesa.

Digitalizacija i automatizacija procesa fermentacije omogućavaju preciznu kontrolu i optimizaciju operacija. Korišćenje naprednih softverskih alata za praćenje i analizu podataka u realnom vremenu omogućava brzo prilagođavanje uslova fermentacije, čime se povećava efikasnost i smanjuje rizik od grešaka [13]. Automatizovani sistemi takođe smanjuju potrebu za ljudskim intervencijama, čime se poboljšava pouzdanost i dosljednost procesa. Unapređenje fermentacije takođe zavisi od kontinuiranog obrazovanja i obuke osoblja. Redovni treninzi o novim tehnologijama, najboljim praksama i sigurnosnim procedurama mogu poboljšati operativnu efikasnost i osigurati da se nove tehnologije pravilno implementiraju i koriste [14].

Edukacija igra ključnu ulogu u osiguravanju da osoblje može efikasno upravljati složenim procesima fermentacije. Ova unapređenja mogu značajno poboljšati efikasnost fermentacije kanalizacionog mulja, smanjujući troškove, povećavajući proizvodnju električne energije i smanjujući negativan uticaj na životnu sredinu. Kontinuirani razvoj i implementacija ovih tehnologija ključni su za postizanje održivosti i šire primjene fermentacije u tretmanu otpadnih voda. Tehnologija fermentacije predstavlja ključnu komponentu u tretmanu otpadnih voda i proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora. Iako je fermentacija dobro istražena i primijenjena u industrijskim procesima, postoje brojne mogućnosti za unapređenje ove tehnologije kako bi se povećala njena efikasnost, održivost i ekonomska isplativost. Jedan od načina za poboljšanje fermentacije je selekcija i optimizacija mikroorganizama koji se koriste u procesu. Razvijanjem specifičnih mikrobioloških kultura koje su otpornije na varijabilne uslove u reaktoru, kao što su promjene pH, temperatura i prisustvo zagađivača, može se značajno povećati efikasnost fermentacije. Pored toga, upotreba genetski modificiranih mikroorganizama sa poboljšanim sposobnostima razgradnje kompleksnih supstrata mogla bi dodatno unaprijediti proizvodnju biogasa ili drugih korisnih proizvoda [1]. Tehnološki napredak u dizajnu reaktora može igrati ključnu ulogu u povećanju efikasnosti fermentacije. Razvoj reaktora sa boljom kontrolom temperature, miješanja i zadržavanja vremena može pomoći u održavanju optimalnih uslova za mikrobiološku aktivnost. Takođe, integracija senzorskih sistema za praćenje ključnih parametara kao što su pH, temperatura i koncentracija plinova može omogućiti precizniju kontrolu procesa i bržu reakciju na eventualne poremećaje u radu [2]. Predtretman supstrata prije fermentacije može značajno uticati na ukupnu efikasnost procesa. Uvođenjem novih metoda kao što su termička hidroliza, mehanička dezintegracija ili upotreba hemijskih dodataka, moguće je povećati biorazgradivost supstrata, što dovodi do većeg prinosa biogasa i skraćivanja vremena fermentacije. Ove metode mogu biti posebno korisne u tretmanu kompleksnih otpada kao što su kanalizacioni mulj ili organski industrijski otpad [3].

Povećanje energetske efikasnosti fermentacijskog procesa predstavlja ključni korak ka održivosti. Ovo se može postići smanjenjem energetske potrebe za grijanje i miješanje, kao i poboljšanjem toplinske integracije unutar postrojenja. Dodatno, integracija fermentacijskog procesa sa drugim tehnologijama, kao što su anaerobna digestija ili kogeneracija, može omogućiti efikasnije korištenje električne energije i resursa, što doprinosi cjelokupnoj ekonomskoj održivosti postrojenja [4].

Unapređenje tehnologije fermentacije ne uključuje samo optimizaciju glavnog procesa, već i efikasno upravljanje nusproizvodima kao što su digestat ili emisije plinova. Razvoj tehnologija za prečišćavanje i ponovnu upotrebu digestata kao đubriva, kao i tehnologija za smanjenje emisija štetnih plinova, može dodatno unaprijediti ekološke i ekonomske aspekte fermentacijskih postrojenja [5]. Ove inovacije i unapređenja ukazuju na potencijal fermentacije kao tehnologije koja može igrati značajnu ulogu u održivom upravljanju otpadnim vodama i proizvodnji obnovljive električne energije. Dalji razvoj i primjena ovih tehnologija omogućit će efikasniju i ekološki prihvatljiviju obradu otpada, čime se doprinosi zaštiti životne sredine i smanjenju zavisnosti od fosilnih goriva [6].

Unapređenje tehnologije pirolize kanalizacijskog mulja (WAS) može se postići kroz nekoliko ključnih strategija. Prvo, optimizacija procesa, kao što su precizna kontrola temperature, vremena reakcije i brzine grijanja, može značajno poboljšati prinos bio-ulja i smanjiti toksičnost nusproizvoda. Uvođenje prethodnih i post-tretmanskih tehnika, poput torifikacije i katalitičke obrade pirolitičkih para, može dodatno povećati kvalitetu dobivenih proizvoda i smanjiti zagađenje okoliša. Poseban fokus treba staviti na upravljanje teškim metalima, pri čemu se mogu koristiti sorbenti ili prilagoditi uvjeti pirolize kako bi se imobilizirali teški metali u charu, čime bi se smanjili ekološki rizici povezani s njihovim ispuštanjem u 3. kanalizacionog mulja kako bi se postigla održiva energetska proizvodnja. Autori su istraživali proces termalne konverzije kanalizacionog mulja u superkritičnoj vodi, fokusirajući se na tehničke aspekte ovog inovativnog pristupa. Istraživanje obuhvata detaljnu analizu efikasnosti i ekoloških implikacija procesa, pružajući pregled različitih metoda superkritične konverzije. Superkritična voda, koja je na granici između tečnog i gasnog stanja, omogućava efikasnu razgradnju organske materije u mulju, potencijalno generišući obnovljivu energiju i minimizirajući štetne emisije, čime doprinosi održivom upravljanju otpadom [7]. U pogledu rafiniranja i upotrebe nusproizvoda, potrebno je poboljšati kvalitetu bio-nafte dobijene HTL procesom kroz razvoj metoda za pročišćavanje koje će osigurati da konačni proizvod zadovoljava standarde za komercijalna goriva, dok bi otpadne vode i gasovi mogli biti tretirani i ponovo iskorišćeni, čime bi se smanjio ekološki uticaj. Mukherjee i saradnici [17] ističu značaj pirolize kanalizacionog mulja kao održivog načina za proizvodnju električne energije, naglašavajući potrebu za daljim istraživanjima kako bi se optimizovali ovi procesi. Što se tiče ekonomije obima, skaliranje proizvodnje može smanjiti troškove po jedinici proizvoda, dok bi finansijski podsticaji mogli ubrzati razvoj i komercijalizaciju ovih tehnologija. Konačno,

interdisciplinarna istraživanja i pilot projekti na različitim lokacijama mogu pomoći u prikupljanju ključnih podataka o performansama tehnologija u realnim uslovima, čime bi se omogućilo dalje unapređenje i prilagođavanje specifičnim potrebama. Zhang i saradnici [18] ukazuju na važnost sinergijske regulacije sušenja kanalizacionog mulja i smanjenja GHG uz pomoć aditiva, što može poslužiti kao inspiracija za unapređenje postojećih tehnologija. Ove mjere, zajedno s kontinuiranim istraživanjem, mogle bi značajno unaprijediti tehnologije hidrotermalne karbonizacije i likvifikacije, čineći ih održivijima i ekonomski isplativijima, te omogućiti njihovu širu primjenu u upravljanju otpadom i proizvodnji obnovljivih izvora električne energije.

3. PREPORUKE ZA PRAKTIČNU PRIMJENU

U ovom poglavlju predstavljene su konkretne smjernice i strategije za implementaciju i unapređenje tehnologija konverzije biomase u energiju. Ovo poglavlje je ključno za premošćavanje jaza između teorijskih istraživanja i njihove praktične primjene, s ciljem da se obezbijedi uspješna i održiva primjena ovih tehnologija u stvarnim uslovima.

3.1.Smjernice za implementaciju

Upravljanje kanalizacionim muljem treba da se temelji na promociji korisne upotrebe mulja uz očuvanje ili poboljšanje kvaliteta životne sredine i zaštite zdravlja ljudi. Prvi korak u implementaciji ovih smjernica jeste razvijanje lokalnih politika koje omogućavaju reciklažu mulja u različitim sektorima, kao što su poljoprivreda i obnovljivi izvori električne energije. Stabilizacija mulja prije upotrebe je ključna, a najčešće se postiže anaerobnom digestijom, koja istovremeno omogućava proizvodnju metana kao važnog energetskeg resursa.

Nadalje, smjernice zahtijevaju uspostavljanje tehničkih standarda za kontrolu zagađivača, uz precizno definisane prakse upravljanja, monitoring, evidentiranje i izvještavanje. Ovo uključuje i procese kao što su kompostiranje, koje omogućavaju stabilizaciju mulja i njegovu sigurnu upotrebu u poljoprivredi i hortikulturi. Posebno je važno osigurati da ovi standardi budu dovoljno fleksibilni da se prilagode specifičnim lokalnim uslovima, ali i dovoljno strogi da spriječe moguće negativne ekološke i zdravstvene posljedice. Uspješna implementacija ovih smjernica zavisi od edukacije i informisanja svih relevantnih aktera, uključujući javnost, industrijske korisnike i lokalne vlasti. Održavanje radionica i javnih rasprava može pomoći u povećanju razumijevanja i prihvatanja korisne upotrebe mulja. Dodatno, kontinuirano praćenje i evaluacija ovih praksi su ključni za prilagođavanje smjernica prema potrebama i izazovima u praksi, što omogućava održavanje visokih standarda u upravljanju muljem.

Konačno, smjernice se moraju integrisati u širi okvir ekološke politike, uključujući propise o zaštiti vode, vazduha i zemljišta, kako bi se osigurao sveobuhvatan pristup u zaštiti životne sredine. Uspostavljanje transparentnih sistema izvještavanja i odgovornosti doprinosi povjerenju javnosti u ove procese, dok ekonomski podsticaji, poput subvencija ili poreznih olakšica, mogu dodatno motivisati lokalne zajednice i industrije da prihvate ove prakse. Na taj način, upravljanje kanalizacionim muljem postaje dio održivog razvoja, smanjujući ekološki uticaj i doprinoseći proizvodnji obnovljivih izvora električne energije.

3.2.Preporuke za dalji razvoj tehnologija

Dalji razvoj tehnologija za upravljanje kanalizacionim muljem trebao bi se fokusirati na inovativne metode koje unapređuju efikasnost pretvaranja mulja u korisne resurse, kao što su biogas, bio-ugalj i drugi obnovljivi izvori električne energije. Preporučuje se intenzivno istraživanje i razvoj fotokatalitičkih procesa, koji koriste svjetlost za razgradnju organskih

zagađivača, što može značajno smanjiti ekološki uticaj ovih tehnologija. Takođe, napredak u tehnologijama anaerobne digestije i termičke obrade, kao što su piroliza i gasifikacija, omogućio bi veću energetska valorizaciju mulja.

Na osnovu dostupnih podataka i analiza, preporučuje se dalje razvijanje i integrisanje različitih tehnologija u cilju ekonomski održivog upravljanja kanalizacionim muljem. Organsko recikliranje kroz kompostiranje i upotrebu mulja u poljoprivredi može značajno smanjiti troškove i omogućiti stvaranje tržišno vrijednih proizvoda. Termička valorizacija putem pirolize i gasifikacije otvara mogućnosti za generisanje prihoda kroz prodaju električne energije, dok ko-spaljivanje u cementarama nudi alternativu fosilnim gorivima, smanjujući ekološki uticaj. Energetska postrojenja koja koriste mulj za proizvodnju električne i toplotne energije pružaju dugoročne finansijske koristi, a višefazna obrada i stabilizacija omogućavaju fleksibilnost i prilagodljivost tržišnim uslovima, osiguravajući ekonomski održiv razvoj sektora. Kombinacijom ovih strategija postiže se maksimalno iskorišćavanje resursa, smanjenje ekološkog uticaja, i stvaranje ekonomske koristi.

Poseban akcenat treba staviti na integraciju ovih tehnologija u postojeće sisteme upravljanja otpadom kako bi se obezbijedila njihova primjenljivost u širokom spektru lokalnih uslova. To uključuje i razvoj ekonomičnijih i ekološki prihvatljivijih metoda stabilizacije mulja, koje omogućavaju njegovu sigurnu upotrebu u poljoprivredi i drugim sektorima. Uvođenje novih tehnologija mora biti praćeno kontinuiranim monitoringom i evaluacijom kako bi se osigurala njihova dugoročna održivost i usklađenost sa ekološkim standardima.

Dodatno, istraživanje u oblasti recikliranja nutrijenata iz mulja, kao i smanjenje toksičnih zagađivača kroz napredne metode tretmana, trebalo bi da postane prioritet. Razvoj novih katalizatora i optimizacija postojećih procesa može dodatno povećati efikasnost i smanjiti troškove. Uspostavljanje snažne saradnje između akademske zajednice, industrije i državnih institucija ključno je za uspješan razvoj i implementaciju ovih tehnologija.

Konačno, ekonomski podsticaji, kao i regulatorni okvir koji podržava inovacije u ovoj oblasti, mogu dodatno motivisati lokalne vlasti i privatni sektor da investiraju u nove tehnologije. Edukacija i podizanje svijesti među građanima o prednostima ovih tehnologija doprinosi većem prihvatanju i podršci za održive prakse upravljanja otpadom, čime se osigurava dugoročni uspjeh ovih inicijativa.

3.3.Strategije za ekonomsku održivost

Strategije za ekonomsku održivost u upravljanju kanalizacionim muljem mogu uključivati nekoliko pristupa. Integrirani pristup upravljanju resursima podrazumijeva usmjerenost na cirkularnu ekonomiju, gdje se kanalizacioni mulj tretira kao vrijedan resurs, a ne kao otpad.

Umjesto tradicionalnog odlaganja, ovaj pristup promovira reciklažu i obnovu hranljivih materija, omogućavajući njihovu ponovnu upotrebu u poljoprivredi ili kao gorivo. Optimizacija procesa obrade mulja, kao što su kompostiranje i anaerobna digestija, ključna je za maksimizaciju izlaza korisnih materijala, čime se doprinosi očuvanju prirodnih resursa i smanjenju potreba za novim sirovinama. Tehnološke inovacije igraju centralnu ulogu u ekonomskoj održivosti upravljanja kanalizacionim muljem. Implementacija naprednih tehnologija, poput anaerobne digestije, pirolize i gasifikacije, omogućava efikasno pretvaranje mulja u biogas, biougalj i obnovljive izvore električne energije. Ove tehnologije ne samo da smanjuju zavisnost od fosilnih goriva, već i doprinose smanjenju emisije GHG. Razvoj i primjena ovih tehnologija omogućavaju kreiranje novih proizvoda i električne energije, što dodatno podržava održivost sektora. Podrška za tržišne inicijative uključuje promociju proizvoda dobijenih iz kanalizacionog mulja, poput komposta i biogasa, kao i razvoj tržišta za ove proizvode. Ovo zahtijeva regulativne okvire koji omogućavaju lakši pristup tržištima i podstiču inovacije. Pružanje podrške lokalnim zajednicama i industriji za implementaciju ovih tehnologija može povećati potražnju za održivim proizvodima, čime se podstiče ekonomski rast i razvoj sektora upravljanja otpadom, dok se istovremeno smanjuje ekološki uticaj.

Ekološka održivost je ključna komponenta strategija za upravljanje kanalizacionim muljem. Primjena metoda koje minimiziraju negativan uticaj na životnu sredinu, kao što su smanjenje emisija, zaštita tla i voda, i održivo korišćenje prirodnih resursa, postaje prioritet. Tehnologije obrade mulja moraju biti ekološki prihvatljive, a njihova implementacija treba da bude usklađena s principima zaštite životne sredine kako bi se osiguralo dugoročno očuvanje ekosistema. Finansijska održivost se postiže kroz implementaciju ekonomskih modela koji omogućavaju samoodrživost postrojenja za tretman kanalizacionog mulja. To uključuje stvaranje prihoda od prodaje proizvoda nastalih obradom mulja, kao što su kompost i biogas, kao i smanjenje troškova odlaganja otpada. Razvijanje održivih poslovnih modela i osiguranje ekonomične obrade i korišćenja mulja ključni su za dugoročnu finansijsku održivost i uspjeh sektora upravljanja kanalizacionim muljem.

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu svega navedenog može se zaključiti sledeće:

1. Potvrđen je značajan potencijal kanalizacionog mulja kao resursa za proizvodnju električne energije, što doprinosi održivom razvoju i smanjenju ekološkog uticaja. Analizirane tehnologije, uključujući anaerobnu digestiju, termičku obradu, pirolizu, i gasifikaciju, pokazale su se kao efikasni načini za konverziju mulja u energiju. Tehnološki napredak i primjena ovih metoda mogu transformisati upravljanje otpadom, prelazeći iz pristupa deponovanja ka valorizaciji resursa. Pored energetske dobiti, ove tehnologije smanjuju emisije GHG i pružaju ekološki prihvatljivija rešenja za tretman mulja.
2. Rezultati ankete o efikasnoj upotrebi kanalizacionog mulja u Crnoj Gori ukazuju na visok nivo svijesti građana o regulatornim propisima i potrebama za unapređenjem u oblasti upravljanja otpadom, s posebnim naglaskom na održivu energetske upotrebu mulja. Ispitanici prepoznaju izazove poput nedostatka jasnih zakonskih okvira i kontrole, kao i potrebu za strogijim sankcijama za nepravilno upravljanje. Uz veću harmonizaciju lokalnih propisa s evropskim standardima i potencijal za veću uključenost lokalne zajednice u donošene odluke, postoji značajna prilika za unapređenje prakse kroz javno-privatna partnerstva. Ovi nalazi naglašavaju važnost nastavka edukacije i informisanja građana, kao i daljih investicija u tehnologije i sisteme koji podržavaju održivost i smanjenje ekološkog uticaja, čime se stvaraju temelji za efikasniji i održiviji pristup upravljanju kanalizacionim muljem.
3. Rezultati intervjuja jasno ukazuju na potrebu za značajnim unapređenjima u upravljanju kanalizacionim muljem u Crnoj Gori, s posebnim fokusom na mogućnost njegove upotrebe u energetske svrhe. Svi ispitanici, od inženjera za zaštitu životne sredine do predstavnika nevladinog sektora, saglasni su da je pretvaranje mulja u električnu energiju ne samo održiv pristup smanjenju otpada, već i prilika za unapređenje energetske efikasnosti i smanjenje zavisnosti od fosilnih goriva. Međutim, prepreke poput nedostatka infrastrukture, nedovoljno razvijene regulative i ograničenih budžeta predstavljaju izazov koji zahtijeva veću saradnju između lokalne zajednice, privatnog sektora i državnih institucija.

4. Preporučuju se dalja istraživanja u pravcu optimizacije ovih tehnologija i integracije različitih pristupa kako bi se maksimalizovala energetska efikasnost i ekonomska održivost. Poseban fokus treba staviti na prilagođavanje ovih rešenja specifičnim uslovima u Crnoj Gori, uz istovremenu promociju održivih praksi kroz odgovarajuće regulatorne okvire i ekonomske podsticaje. Ovaj rad naglašava potrebu za sistemskim pristupom u kojem će se kanalizacioni mulj prepoznati kao vredan resurs, čime se doprinosi ciljevima održivog razvoja i smanjenju negativnog uticaja na životnu sredinu.
5. Na osnovu rezultata teorijskih istraživanja, može se zaključiti da je osnovna hipoteza ovog rada potvrđena. Efikasna upotreba kanalizacionog mulja u proizvodnji električne energije zaista može značajno doprinijeti održivosti i smanjenju negativnog ekološkog uticaja. Istraživanje je pokazalo da kanalizacioni mulj ima značajan potencijal kao resurs za proizvodnju električne energije, čime se smanjuje potreba za fosilnim gorivima i emisija stakleničkih gasova. Osim toga, istraživačko pitanje o tehničkoj izvodljivosti i ekološkim aspektima ovog procesa je detaljno obrađeno, potvrđujući da je ovaj pristup održiv i ekonomski opravdan. Time se dokazuje da kanalizacioni mulj, koji je često smatran otpadom, može biti prepoznat kao vrijedan resurs u okviru održivog razvoja.
6. Buduća istraživanja u korišćenju kanalizacionog mulja za energetiku mogla bi se fokusirati na nekoliko ključnih pravaca radi prevazilaženja trenutnih ograničenja i unaprijeđenja razumijevanja ove teme. Jedan od pravaca je detaljnija analiza ekonomskih aspekata, uključujući troškove implementacije tehnoloških pristupa i ekonomske koristi. Takođe, istraživanja bi trebala obuhvatiti finansijsku održivost različitih tehnologija korišćenja mulja u energetici. Drugi pravac može biti usmjeren na tehnološka unapređenja i inovacije radi povećanja efikasnosti procesa i smanjenja negativnih uticaja na okolinu. Takođe, istraživanja bi trebala izučiti nove metode praćenja i kontrole procesa korišćenja mulja u energetici. Treći pravac uključuje identifikaciju ekoloških koristi na lokalnom i globalnom nivou, uključujući uticaj na javno zdravlje i smanjenje emisija gasova sa efektom staklene bašte. Moguća ograničenja istraživanja uključuju teorijske i metodološke izazove poput nedostatka podataka, složenost analize faktora koji utiču na proces korišćenja kanalizacionog

mulja, ograničenja u tehničkim kapacitetima i nemogućnost potpunog sagledavanja svih socio-ekonomskih i ekoloških efekata.

LITERATURA

1. Álvarez-Gallego, C. J., López-González, L. M., & Sales, F. G. (2020). Recent advances and future perspectives in the use of photocatalysis for the valorization of sewage sludge. *Journal of Environmental Management*, 255, p. 109900.
2. Chang, S., Zhao, J., Wang, H., Huang, G., & Xue, Y. (2017). Review of sewage sludge pyrolysis and gasification for energy recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, pp. 450-459.
3. Dai, X., Chen, Y., Shen, J., Wei, X., & Chen, Z. (2021). Sewage sludge pyrolysis for biochar production and energy recovery: A review. *Journal of Cleaner Production*, 294, p. 126331.
4. Dahiya, S., Sarkar, O., Swamy, Y. V., Bansal, R., & Gupta, R. (2019). Microbial fuel cell: A bio-electrochemical system for bioenergy production. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 32, pp. 209-232.
5. Feng, L., Li, Y., Hu, Z., Xie, Y., & Zhang, H. (2018). Biochar production and applications in wastewater treatment: A critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 48(15), pp. 1589-1617.
6. Ganiyu, S. O., Mamun, A. A., Baharudin, N. S., Nizam, M. Z. M., & Adeleke, M. A. (2018). Sustainability perspective of using sewage sludge as bioresource for energy recovery: A review. *Journal of Cleaner Production*, 181, pp. 238-252.
7. Ganiyu, S. O.,a & Oni, A. O. (2019). Biohydrogen production from organic wastes: Current perspectives and advancements. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, pp. 50-68.
8. Hussain, A., Ibrahim, M. H., Abdul-Wahab, S. A., & Hameed, B. H. (2016). Recent advances in production of biodiesel from industrial and municipal sewage sludge: A review. *Bioresource Technology*, 201, pp. 50-58.
9. Li, M., Lu, X., Zhang, Y., & Deng, S. (2019). Sewage sludge drying technologies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, pp. 178-191.

10. Li, X., Wang, L., Gao, W., Yuan, Z., & Yuan, Y. (2020). Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, p. 110315.
11. Li, Y., Wang, H., Sun, Y., & Zhang, Z. (2019). Recent progress in resource recovery from sewage sludge by advanced thermal processes. *Waste Management*, 90, pp. 62-77.
12. Li, Y., & Yu, Y. (2020). Recent advances in hydrothermal liquefaction of sewage sludge for bio-oil production: A review. *Bioresource Technology*, 311, p. 123532.
13. López, G., Artetxe, M., Amutio, M., & Bilbao, J. (2019). Thermochemical conversion of sewage sludge to energy carriers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, pp. 41-54.
14. Lu, X., & Zhang, Y. (2019). Thermal conversion of sewage sludge to energy in supercritical water: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, pp. 135-146.
15. Mukherjee, S., Dash, R. R., & Kisku, G. C. (2020). Sustainable energy production through sewage sludge pyrolysis: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 33, p. 101053.
16. Zhang, Z., Jin, B., Zhang, Y., Huang, Z., Li, C., Tan, M., Huang, J., Lei, T., Qi, Y., & Li, H. (2024). The synergistic regulation of sewage sludge biodrying and greenhouse gas reduction by additives. *Bioresource Technology*, 394, 130180. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130180>.
17. Wang X, Jiang C, Wang D, Fan L, Yang Y, Yang T, Peng J, Zhang X, Zhuang X. Harnessing the Potential of Sludge Fermentation Liquid to Induce Partial Nitrification. *Fermentation*. 2024; 10(6):289. <https://doi.org/10.3390/fermentation10060289>
18. Ministarstvo turizma. (2024). Državni plan upravljanja otpadom za period 2024.-2028..
19. Vesković, Z. (2023). PROBLEMATIKA UPRAVLJANJA KANALIZACIONIM MULJEM U CRNOJ GORI: Tematska analiza.
20. Pravilnik o bližim uslovima koje treba da ispunjava komunalni kanalizacioni mulj, količine, obim, učestalost i metode analize komunalnog kanalizacionog mulja za dozvoljene namjene i uslovima koje treba da ispunjava zemljište planirano za njegovu primjenu. ("Sl. list Crne Gore", br. 89/09 od 31.12.2009).

21. Government of Montenegro. (2022, March 31). Nacionalna strategija održivog razvoja do 2030. godine. <https://www.gov.me/clanak/nacionalna-strategija-odrzivog-razvojado-2030-godine>
22. United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>

