



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Jadran Grančić

**PRIMJENA POSTUPKA TERMALNE
HIDROLIZE ZA OBRADU MULJA NA
UPOV-ima**

ZAVRŠNI ISPIT

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Jadran Grančić

**PRIMJENA POSTUPKA TERMALNE
HIDROLIZE ZA OBRADU MULJA NA
UPOV-ima**

ZAVRŠNI ISPIT

Mentor:

Izv.prof.dr.sc.Dražen Vouk

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Jadran Grančić

**THE APPLICATION OF THERMAL
HYDROLYSIS PROCESS FOR SLUDGE
TREATMENT AT WWTPs**

FINAL EXAM

Supervisor:

Assoc.prof.dr.sc. Dražen Vouk

Zagreb, 2024.



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA ZAVRŠNOG ISPITA

Student/ica :

(Ime i prezime)

(JMBAG)

zadovoljio/la je na pisanom dijelu završnog ispita pod naslovom:

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

(Naslov teme završnog ispita na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio završnog ispita izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio završnog ispita izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

Mentor:

Potpis mentora:

Komentor:



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio završnog ispita pod naslovom:

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

Potpis:



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA ZAVRŠNOG ISPITA

Ja :

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela završnog ispita i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela završnog ispita pod naslovom:

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom prijediplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio završnog ispita bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

Potpis:

Gavran

SAŽETAK

Termalna hidroliza (THP) je proces koji predstavlja međufazu u ciklusima dodatne obrade mulja na uređajima za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV-ima). Primjenjujući ovaj proces ostvarujemo ponajprije smanjenje ukupne količine mulja, dobijamo mulj kvalitetnijih karakteristika za daljnje korištenje te povećanje proizvodnje bioplina. Ovaj rad razrađuje funkcioniranje THP postrojenja, kao i različite tehnološke procese vezane za njegovu primjenu (THP ispred anaerobne digestije-prednost kod UPOV-a na kojima se planira povećanje kapaciteta linije mulja, THP nakon anaerobne digestije-prednost kod UPOV-a na kojima se ne planira povećanje kapaciteta linije mulja, THP samo za biološki mulj). Također u radu su istaknute prednosti i nedostaci različitih tehnoloških procesa uz primjenu THP-a te je na primjeru UPOV-a Karlovac izrađena bilanca mase i energije za jedan tehnološki proces s primjenom THP-a.

Ključne riječi: Termalna hidroliza (THP), energija, uređaj za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV), mulj, tehnološki procesi, anaerobna digestija, bilanca mase i energije

SUMMARY

Thermal hydrolysis (THP) is a process that serves as an intermediate phase in the cycles of additional sludge treatment at wastewater treatment plants (WWTPs). By applying this process, we primarily reduce total amount of sludge used while gaining an increase in biogas production. On top of that, resulting sludge possesses better characteristics for further use. This paper elaborates on the operation of THP plants, as well as various technological processes related to its application (THP before anaerobic digestion - an advantage for WWTPs planning to increase sludge line capacity, THP after anaerobic digestion - an advantage for WWTPs not planning to increase sludge line capacity, i.e. THPs only for biological sludge). The paper also highlights the advantages and disadvantages of different technological processes involving THP including a mass and energy balance for one technological process with THP application at a specific WWTP in Karlovac.

Key words: Thermal hydrolysis (THP), energy, wastewater treatment plants (WWTPs), sludge, technological processes, anaerobic digestion, mass and energy balance

SADRŽAJ

SAŽETAK	iv
SUMMARY	v
SADRŽAJ	vi
UVOD	1
1.OSNOVNA LINIJA NASTAJANJA MULJA	3
1.1 Nastanak mulja	3
2.PROCES TERMALNE HIDROLIZE (THP PROCES)	5
2.1. Potreba za THP procesom	5
2.2 Anaerobna digestija	8
2.2.1 THP proces ispred anaerobne digestije	10
2.2.2 THP proces nakon anaerobne digestije	12
2.3 THP proces samo za biološki mulj	13
3.BILANCA MASE I ENERGIJE	15
3.1 Metodologija izračuna bilance mase i energije na liniji mulja bez THP postrojenja	15
3.2 Metodologija izračuna bilance mase i energije na liniji mulja sa THP postrojenjem	22
3.3 Usporedba proračuna bilance mase i energije	26
ZAKLJUČAK	29
POPIS LITERATURE	30
POPIS SLIKA	31
POPIS TABLICA I GRAFIKONA	32

UVOD

Voda je jedan od preduvjeta života što je kao takva neophodna za čovjeka tijekom cijelog njegovog života. Čovjek sve svoje potrebe u odnosu na vodu rješava sa svojim ponašanjem prema prirodi gdje se ta voda nalazi. S obzirom na ponašanje i odnos prema vodi i vodnim strukturama u posljednjim vremenima zbog prevelikog porasta broja stanovništva, industrijalizacije, razvoja društva dolazi do povećanja onečišćavanja i zagađivanja voda. Samim time nastaje potreba za pročišćavanjem otpadnih voda, što rezultira smanjenjem organske tvari u okolišu. Vodu koju podvrgnemo procesima pročišćavanja možemo kasnije otpustiti u prirodu, ali ju također možemo iskoristiti u različitim područjima ljudskih djelatnosti i potreba. Pročišćavanje vršimo na uređajima za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV-i). Ovi uređaji se prilagođavaju različitim vrstama otpadnih voda (industrijske vode, komunalne vode...).

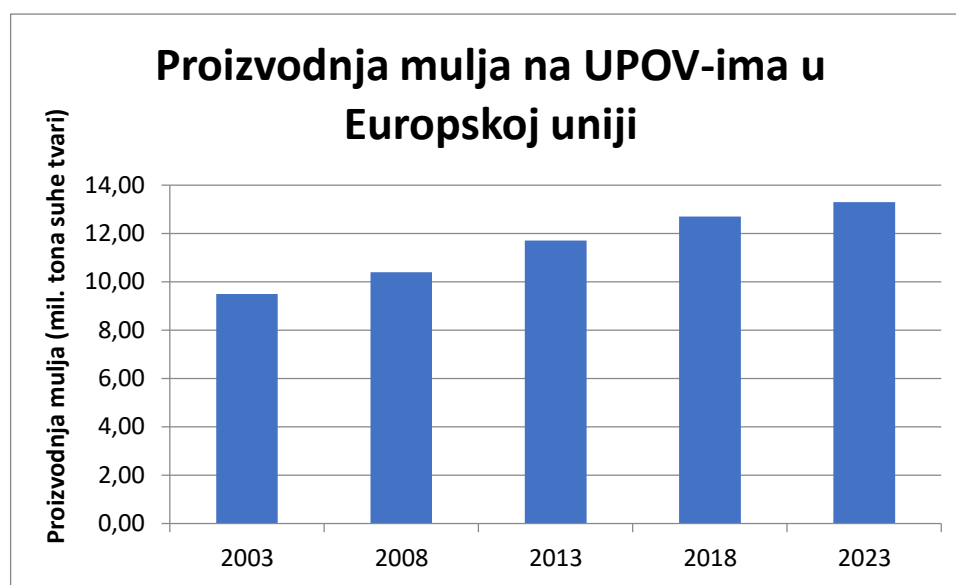
voda (industrijske vode, komunalne vode...).



Slika 1: Primjer UPOV-a

Proces pročišćavanja uključuje mehaničke, biološke i kemijske metode kako bi se uklonile krute tvari, organski materijal, patogeni mikroorganizmi, kao i specifični kemijski zagađivači. Jedan od važnih nusproizvoda tijekom pročišćavanja otpadnih voda je otpadni mulj, koji se stvara nakon pročišćavanja

otpadnih voda. Otpadni mulj je gusti materijal koji sadrži koncentrirane čvrste tvari uklonjene tijekom procesa pročišćavanja. Sastav mulja zavisi o vrsti otpadne vode i procesima koji su primijenjeni, te može sadržavati organske tvari, teške metale, mikroorganizme, hranjive tvari (kao što su fosfor i dušik), kao i potencijalno opasne kemijske spojeve.



Grafikon 1. Proizvodnja mulja na UPOV-ima u Europskoj uniji

Prije konačnog odlaganja ili uporabe, sirovi mulj mora proći obradu. Vrsta obrade ovisi o načinu njegovog daljnjeg iskorištavanja. Mulj iz otpadnih voda nije bezvrijedan, jer sadrži približno 70% organskih tvari koje imaju energijski potencijal i mogu se iskoristiti. Mulj, kao takvu materiju možemo podvrgnuti različitim procesima pročišćavanja. Jedno od rješenja je podvrgavanje procesu termalne hidrolize (THP). Taj postupak je prvi put postavljen krajem devedesetih godina prošlog stoljeća u Hamaru (Norveška). Dosadašnja praksa ukazuje nam na isplativost primjene THP procesa na UPOV-ima većeg kapaciteta (većim od 150.000 ES) [1], konkretno u hrvatskoj gradovi Zagreb, Split, Rijeka i Osijek. U nastavku ćemo obraditi funkcioniranje THP postrojenja te osnovnim načinima njihove primjene - ispred anaerobnih digestora i nakon anaerobnih digestora.

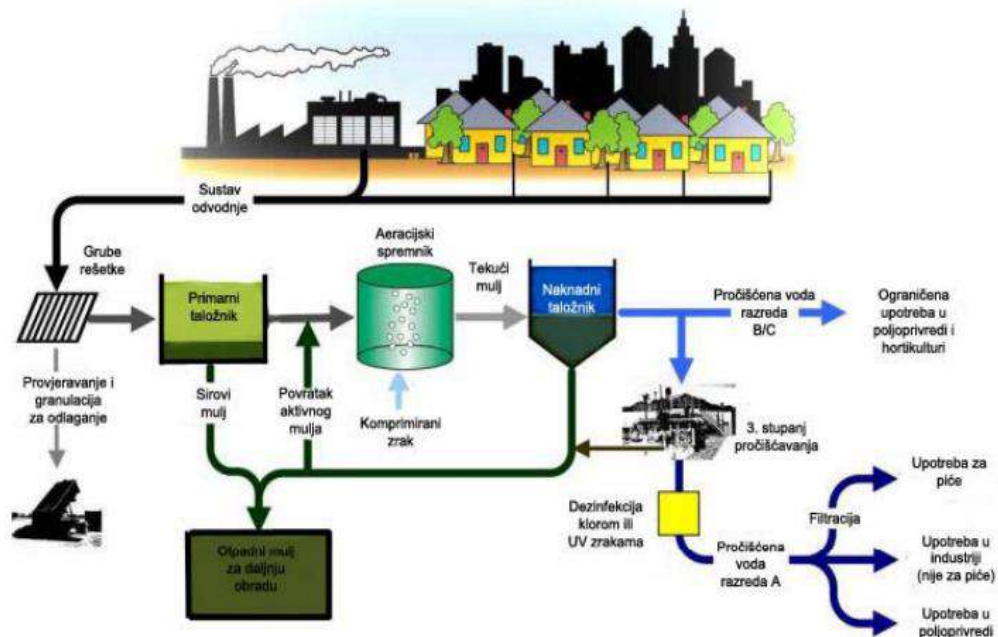
1. OSNOVNA LINIJA NASTAJANJA MULJA

1.1 Nastanak mulja

Tretiranje mulja, kao nusproizvoda u procesu pročišćavanja otpadnih voda, predstavlja značajan izazov za postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV). Nastanak velikih količina mulja zahtijeva pažljivo upravljanje kako bi se spriječili problemi poput neugodnih mirisa, zagađenja okoliša i visokih troškova odlaganja. Procesi za obradu mulja počinju već u mehaničkom predtretmanu i nastavljaju se kroz različite faze, a u nastavku su nabrojane faze kako se problem mulja može riješiti i poboljšati:

- **Mehanički predtretman**
U ovoj fazi, grube i fine rešetke te pjeskolovi i mastolovi uklanjaju krupne čestice, pijesak, ulja i masti. Primarni mulj koji se stvara u ovoj fazi sadrži suspendirane krute tvari koje su odvojene taloženjem u primarnom taložniku.
- **Primarni taložnik (prva faza pročišćavanja)**
Primarni mulj nastaje u ovoj fazi taloženjem suspendiranih tvari. On je bogat organskim materijalom, ali sadrži visok udio vode, što ga čini zahtjevnim za daljnju obradu.
- **Biološki reaktor (druga faza pročišćavanja)**
U ovoj fazi, otopljena organska tvar uklanja se u biološkom reaktoru s pomoću mikroorganizama. Povratni aktivni mulj iz naknadnog taložnika se vraća u reaktor, gdje se miješa sa sirovom otpadnom vodom. Sekundarni ili biološki mulj nastaje kao nusproizvod biološkog pročišćavanja.
- **Naknadni taložnik**
U ovoj fazi odvaja se sekundarni (biološki) mulj, koji je bogat mikroorganizmima koji su sudjelovali u razgradnji otopljene organske tvari. Također se odvaja višak aktivnog mulja, koji se ne vraća u biološki reaktor.

- Stabilizacija mulja
Stabilizacija je ključna za sprječavanje neugodnih mirisa, oksidacije organske tvari i mogućeg truljenja mulja (dolazi do povećane koncentracije amonijaka). Takav mulj je potrebno stabilizirati aerobnom ili anaerobnom digestijom.



Slika 2. Sustav pročišćavanja otpadnih voda i proces nastajanja mulja

Obrada mulja izdvojenog na uređajima za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) ima za cilj smanjenje volumena u svim fazama kako bi se smanjili troškovi njegove daljnje obrade, transporta i konačnog zbrinjavanja. Također, nadziranje razgradnje otpadnih tvari ključno je kako bi se spriječili negativni učinci na okoliš i ljudsko zdravlje. Zbog toga se proces termalne hidrolize (THP) pokazao kao učinkovita opcija za prethodnu ili naknadnu obradu mulja u kombinaciji s anaerobnom digestijom. THP se može integrirati u novo projektirana, ali i u postojeća postrojenja za obradu otpadnih voda (UPOV), čime se smanjuje količina otpada i poboljšava učinkovitost obrade mulja.

2. PROCES TERMALNE HIDROLIZE (THP PROCES)

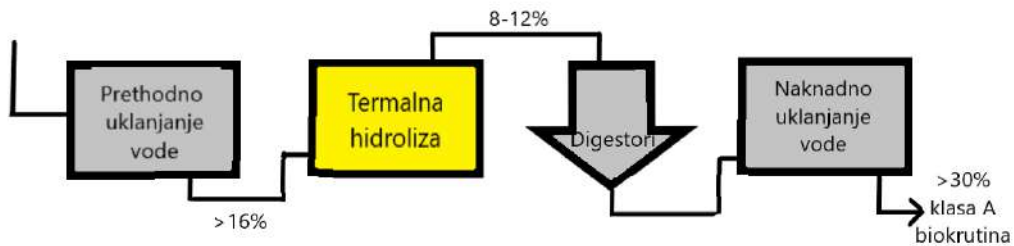
2.1. Potreba za THP procesom

U proteklim desetljećima, količina mulja koji se stvara kao nusproizvod od uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) raste zbog povećane urbanizacije i strožih propisa o zbrinjavanju otpadnih voda. Mulj dobiven pročišćavanjem možemo tretirati na različite načine. Svaki način tretiranja ima svoje prednosti i mane. U većini europskih ali i svjetskih zemalja još uvijek se mulj tretira na način da se odlaže na poljoprivredna površine te svojim energetske svojstvima obogaćuje tlo i plodnu površinu. Zemlje Zapadne Europe tretiraju mulj termalnim načinom obrade. Iako je termalna hidroliza izuzetno učinkovita te spada u napredne postupke stabilizacije mulja, njena primjena još uvijek nije široko rasprostranjena zbog visokih troškova opreme i energije potrebnih za ovaj proces. Ipak, sve više se koristi u zemljama poput Nizozemske, Švicarske, Belgije, Njemačke i Austrije, gdje su prepoznate prednosti ove tehnologije i uspješno su je implementirali.

Tablica 1: Vodeće države s pripadajućim THP postrojenjima

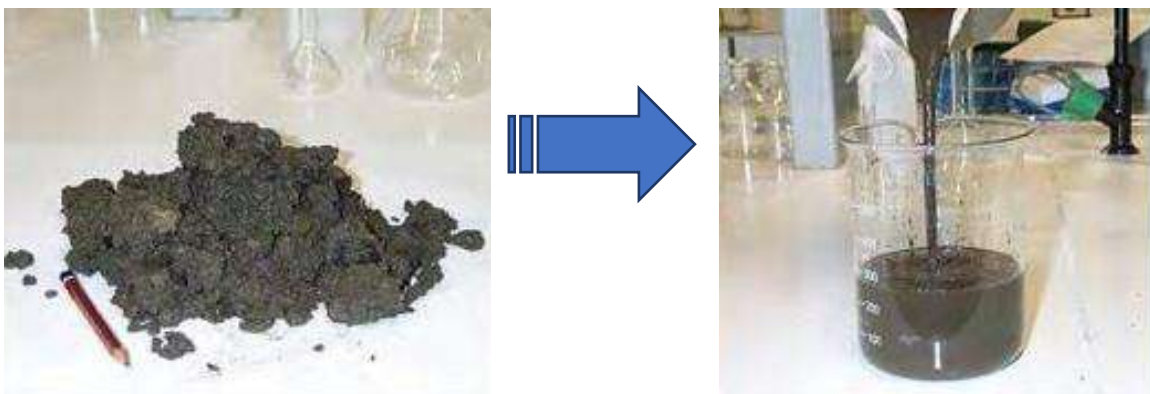
Država	Najpoznatije THP postrojenje
Ujedinjeno Kraljevstvo (UK)	Aberdeen THP Plant, Škotska
Norveška	HIAS Wastewater Treatment Plant (Cambi)
Njemačka	Berlin-Ruhleben THP Plant
Francuska	Achères Wastewater Treatment Plant (Exelys)
Sjedinjene Američke Države (SAD)	Blue Plains Advanced WWTP, Washington D.C.
Švicarska	Werdhölzli WWTP, Zürich
Nizozemska	Amsterdam West WWTP

THP je dvostupanjski postupak u kojem se mulj prvo zagrijava (150-165 °C) pod visokim tlakom (6-7 bar) iza čega slijedi brza dekompresija. Ovim kombiniranim postupkom mulj postaje sterilan i više biorazgradiv. To znači da će se u postupku anaerobne digestije (koji slijedi nakon THP-a) ukloniti veći dio organske tvari i postići veći energetska učinak kroz povećanu proizvodnju bioplina. Pritom se ostvaruju i značajne uštede u volumenu anaerobnih digestora, s obzirom da u digestore nakon THP-a ulazi mulj s 2-3 puta većom koncentracijom mulja (8-12 % suhe tvari (ST)). Vrijeme zadržavanja mulja je maksimalno 15 dana dok je u konvencionalnim digestorima oko 20 dana[1].



Slika 3. Proces termalne hidrolize

THP proces obrade mulja poboljšava učinkovitost dehidracije, omogućujući postizanje minimalnog udjela suhe tvari od 30-32 % nakon dehidracije. Kada se THP primjenjuje nakon anaerobnih digestora, minimalni udio suhe tvari nakon dehidracije povećava se na 40%ST[2].



Slika 4. Izgled mulja prije THP procesa i nakon THP procesa

Prednosti THP procesa se na temelju dosadašnjih iskustava u radu na brojnim UPOV-ima diljem Svijeta izražavaju u sljedećem [3]:

- smanjenje proizvodnje mulja (suhe tvari u mulju) na kraju obrade za 20-30 %
- smanjenje količine mokrog mulja za 40-50 % (u ukupnoj težini)
- povećanje proizvodnje bioplina i energije za 20-50 %
- sterilizacija mulja (dobivanje mulja bez patogenih mikroorganizama)
- dobivanje mulja sa smanjenim intenzitetom neugodnih mirisa

Pri THP procesu drastično se mijenjaju reološke karakteristike mulja [4]. Mogućnost opterećenja anaerobnih digestora s većim koncentracijama mulja (2-3puta) uz smanjenje vremena zadržavanja mulja u digestorima, omogućuje značajno smanjenje volumena digestora (i do 65 % manji volumen u odnosu na konvencionalno rješenje bez THP-a), čime se postiže značajno smanjenje investicijskih troškova. THP proces razara staničnu strukturu mulja te mulj u naknadnom procesu anaerobne digestije postaje više razgradiv, što rezultira povećanom proizvodnjom bioplina i smanjenjem ukupne mase suhe tvari, odnosno smanjenjem ukupne količine mulja [5].

Primjena THP procesa posebno su vidljiva u UPOV-ima s većim kapacitetom, odnosno onima koji imaju kapacitet veći od 150.000 ES (ekvivalent stanovnika). U Hrvatskoj bi, primjerice, UPOV-i u Zagrebu, Splitu, Rijeci i Osijeku mogli biti pogodni za primjenu THP procesa.

Značajno je napomenuti da primjena THP procesa nije ograničena činjenicom je li UPOV već izgrađen ili nije, odnosno THP proces se može primijeniti i na već izgrađenim UPOV-ima. Prema tome, THP proces se na liniji mulja može primijeniti na dva načina [1]:

- na glavnoj liniji ispred anaerobne digestije (prednost kod novo projektiranih uređaja ili postojećih uređaja kojima se želi povećati kapacitet linije obrade mulja),
- naknadno na liniji mulja iza anaerobne digestije, s povratnim tokom izdvojenog centrata (u postupku naknadne dehidracije) zagrijanog na višoj temperaturi (prednost

kod postojećih uređaja, u sklopu njihove nadogradnje i unaprjeđenja linije obrade mulja).

2.2 Anaerobna digestija

Anaerobna digestija (razgradnja), biokemijski je proces u kojem se složeni, biorazgradivi organski spojevi (mulj) razgrađuju putem mikrobioloških aktivnosti specifičnih bakterija i arheja, pri čemu se proces odvija u uvjetima bez prisutnosti kisika [6]. Ključni produkti ovog procesa su bioplin i digestat. U usporedbi s aerobnom razgradnjom, anaerobni procesi proizvode manje toplinske energije, budući da se veći dio kemijskog energetskog potencijala mulja tijekom biokemijskih reakcija pretvara u bioplin. Bioplin je zapaljivi plin koji se sastoji pretežno od metana (CH_4) i ugljikovog dioksida (CO_2), uz male količine sumporovodika (H_2S) i amonijaka (NH_3). Također u jako malim količinama sadrži i plinove poput vodika (H_2), dušika (N_2), ugljikova monoksida (CO), zasićenih ili halogeneriranih ugljikovodika te kisika (O_2).



Slika 5. Spremnici za skladištenje bioplina

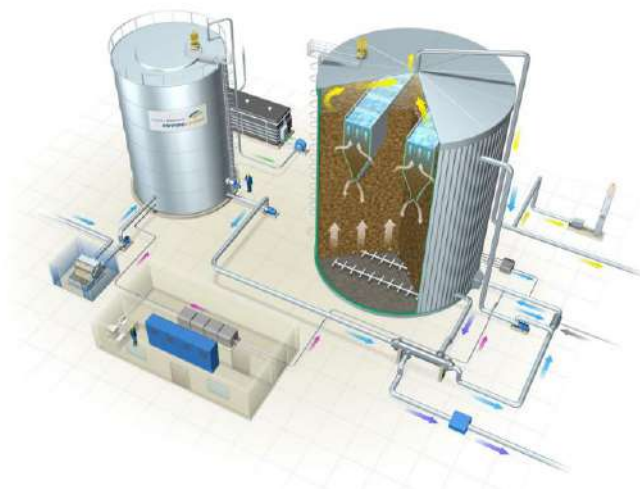
Digestat je nusproizvod anaerobne razgradnje, bogat makro i mikronutrijentima. Iako sadrži obilje hranjivih tvari, njegova primjena može biti ograničena zbog prisutnosti većih količina teških metala, ovisno o supstratima korištenim u procesu. To često dovodi do povećanih troškova povezanih s njegovim zbrinjavanjem.



Slika 6. Digestat kao nusproizvod anaerobne razgradnje
Proces proizvodnje bioplina putem anaerobne razgradnje temelji se na nizu međusobno povezanih biokemijskih reakcija[7].

Te se reakcije mogu svrstati u četiri glavne faze:

- hidroliza,
- acidogeneza,
- acetogeneza,
- metanogeneza.



Slika 7. Proces anaerobne digestije za proizvodnju bioplina

U prvoj fazi anaerobne digestije, hidrolizi, dolazi do depolimerizacije složenih biorazgradivih organskih tvari, pri čemu su ključni biopolimeri ugljikohidrati, proteini i lipidi. Tijekom ovog procesa, hidrolitičke bakterije razgrađuju biopolimere na jednostavnije, uglavnom topljive spojeve poput monomera i oligomera. Najvažnije grupe organskih molekula koje pritom nastaju uključuju šećere, aminokiseline i masne kiseline[8].

Acidogeneza je drugi stupanj anaerobne digestije u kojoj se proizvodi hidrolize, pod utjecajem acidogenih bakterija, pretvaraju u molekule koje sudjeluju u metanogenezi. Ovaj stupanj često se naziva fermentacija, iako se taj pojam općenito koristi za sve biološke procese koji se odvijaju u odsutnosti kisika. Tijekom acidogeneze, jednostavni šećeri, aminokiseline i dugolančane masne kiseline nastale tijekom hidrolize djelomično se razgrađuju u octenu kiselinu, ugljikov dioksid i vodik.

Dio produkata acidogeneze, poput hlapljivih masnih kiselina s duljim ugljikovim lancima (obično više od dva atoma ugljika) i alkohola s više od jednog atoma ugljika, ne može biti direktno razgrađen u metan od strane metanogenih arheja. Zbog toga se ti produkti oksidiraju u octenu kiselinu i vodik tijekom procesa poznatog kao acetogeneza. U ovom procesu se vodik koji nastaje djelovanjem acidogenih bakterija pretvara u metan.

Octena kiselina, vodik i ugljikov dioksid ključni su supstrati za proizvodnju metana i ugljikovog dioksida u procesu metanogeneze, koji se odvija pod utjecajem metanogenih arheja. Oko 70 % metana obično nastaje razgradnjom octene kiseline, dok preostalih 30 % potječe iz biosinteze metana iz vodika i ugljikovog dioksida.

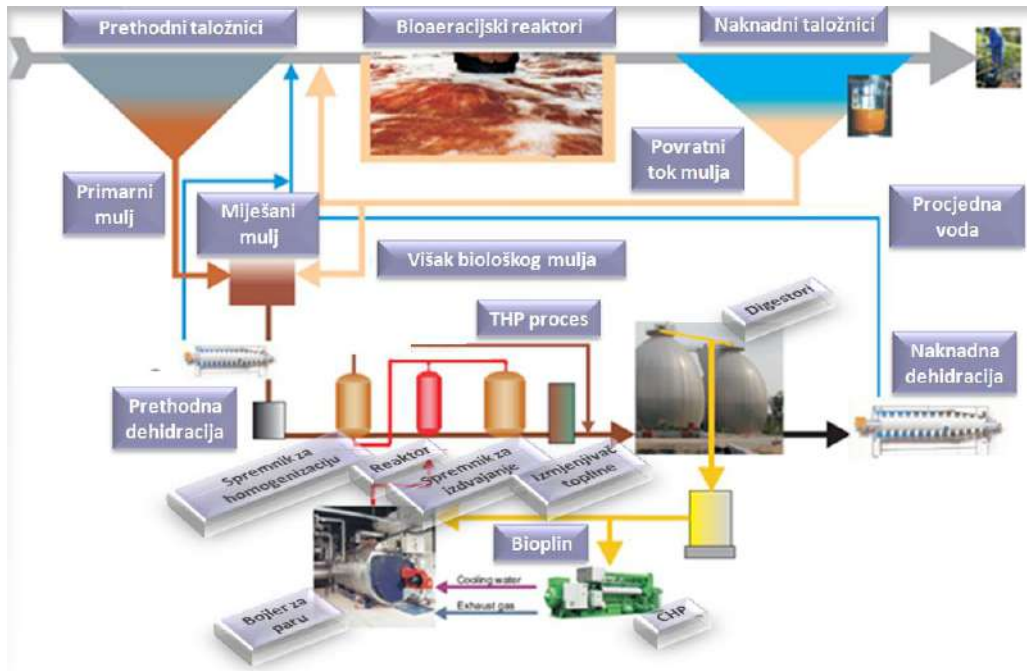
2.2.1 THP proces ispred anaerobne digestije

U THP procesu ispred anaerobne digestije može obraditi "nerazvodnjeni" mulj s višom koncentracijom suhe tvari od 8-12 %ST, za razliku od konvencionalnog postupka obrade mulja (bez THP-a), gdje koncentracija mulja koji ulazi u anaerobne digestore iznosi 4-6 %ST.[1]

U proces THP-a ispred anaerobne digestije ulazi mulj koji je u prethodnim fazama dehidriran na volumen suhe tvari oko 16-18%ST. Homogenizacija mulja uz dodatak pare je prva faza procesa. U spremniku za homogenizaciju mulj se predzagrijavanjem pretvara u kašu. Nakon pretvorbe mulja u kašu, mulj se transportira u reaktore za termalnu hidrolizu. Navedeni reaktori rade na diskontinuiranom odnosno šaržnom principu. U reaktoru prethodno zgusnuti mulj se dodaje periodično, dozira se. Slijedi direktno injektiranje pare na temperature 150-165 °C i pritisak tlaka s 5-6 bara. U ovakvim uvjetima tretiranja organska tvar postupkom hidrolize prelazi u otopljene spojeve, koji su lako razgradivi. Mulj se zadržava u reaktoru u periodu 30-40 minuta, te nakon dolazi do nagle dekompresije. S pomoću pare nastale u reaktoru mulj se tlači u spremnike za izdvajanje. Zbog naglog pada tlaka nastaje "plinska eksplozija" kojom se dezintegriraju vlakna i stanice u mulju. Para koja se stvorila u trenutku eksplozije, preusmjerava se u spremnike za homogenizaciju. U spremnicima za homogenizaciju ona predgrijava mulj, te smanjuje potrebu za uvođenjem dodatne pare.

THP procesom nastaje mulj koji je sterilna tekućina. Takav mulj ima znatno bolje karakteristike za procese koji slijede (anaerobna digestija i naknadna dehidracija mulja). Cijeli ovaj proces se odvija neprekinuto, zbog podjednakog djelovanja spremnika za izdvajanje i spremnika za homogenizaciju.

Nakon procesa termalne hidrolize, dolazi do hlađenja mulja pomoću izmjenjivača topline te se mulj dodatno razrjeđuje neposredno prije samog tretiranja procesom anaerobne digestije. Razrjeđuje se na oko 8-12 %ST, najčešće 10-12 %ST. Parametar koji ograničava razrjeđivanje je koncentracija amonijaka koja se očekuje u procesu anaerobne digestije. Naime, razvijaju se druge vrste bakterija na koje povećane koncentracije amonijaka ne djeluju inhibirajuće.[1]



Slika 8. Tehnološka shema linije vode i linije mulja s THP procesom ispred anaerobne digestije

2.2.2 THP proces nakon anaerobne digestije

Mulj iz postojećih anaerobnih digestora se mehanički dehidrira, što je moguće izvesti na postojećim uređajima za dehidraciju, kao što su centrifuge ili trakaste filter prese, nakon čega se usmjerava u THP proces. THP procesna jedinica sadrži iste komponente kao u slučaju primjene THP-a prije anaerobne digestije - spremnik za homogenizaciju, reaktor i spremnik za izdvajanje - s identičnim slijedom procesa. Mulj koji izlazi iz THP-a postaje higijenizirana tekućina s poboljšanim svojstvima za daljnju dehidraciju. Vreli centrat, bogat lako razgradivim organskim tvarima, vraća se iz uređaja za naknadnu dehidraciju (centrifuga) i traka za hlađenje nazad u anaerobne digestore.[1] Ovaj povratni tok doprinosi:

- zagrijavanju sadržaja digestora,
- poboljšava razgradnju organske tvari,
- povećava proizvodnju bioplina,
- smanjuje masu suhe tvari u mulju.

Dehidrirani mulj u oba slučaja primjene THP-a, bilo ispred ili iza anaerobne digestije, je higijeniziran (bez patogenih

mikroorganizama), što omogućuje učinkovitije i ekonomski isplativije zbrinjavanje.



Slika 9. Tehnološka shema linije vode i linije mulja s THP procesom iza anaerobne digestije

2.3 THP proces samo za biološki mulj

U THP procesu samo za biološki mulj linija mulja ostaje ista, to jest THP se može primjenjivati ispred i nakon anaerobne digestije. Dimenzioniranje THP postrojenja samo za biološki mulj provodi se tako da se u proračunu mulj dimenzionira na manju količinu mulja nego kod primarnog mulja. Primjenom ovog načina izgradnje postrojenja imamo osjetnije financijske uštede.

Nakon prolaska biološkog mulja kroz proces termalne hidrolize miješa se s primarnim muljem s prethodnih taložnika te zajedno ulaze u proces anaerobne digestije. Projektiranje i izvođenje THP-a samo za biološki mulj ima svoju najveću primjenu na već postojećim uređajima za pročišćavanje otpadnih voda. Naime, ulaskom samo biološkog mulja u THP proces smanjujemo volumen postrojenja. Biološki mulj je teže razgradiv u odnosu na primarni mulj, te ga je potrebno podvrgnuti procesu termalne hidrolize u svrhu razbijanja složenih molekularnih struktura u mulju. Nakon prolaska mulja kroz THP proces biološki mulj je

puno više razgradiv. Povećanjem razgradivosti mulja u procesu anaerobne digestije dolazimo do povećanja proizvodnje bioplina, a samim time i povećanje toplinske i električne energije koju koristimo za rad uređaja. S druge strane, masa suhe tvari zbog dodatne razgradnje organske tvari u mulju se smanjuje te dolazimo do smanjenja ukupne količine mulja.

Prednosti THP procesa samo za biološki mulj:

- Poboljšana razgradnja organske tvari
- Higijenizacija mulja
- Poboljšana dehidracija
- Smanjenje volumena mulja
- Veća učinkovitost anaerobne digestije

Kod izgradnje novih uređaja, prednosti uređaja samo za biološki mulj ne dolaze do izražaja. Izgradnja THP-a isključivo za biološki mulj u novim postrojenjima često nije isplativa zbog visokih kapitalnih i operativnih troškova, manjeg volumena mulja i učinkovitosti.

3. BILANCA MASE I ENERGIJE

U ovom poglavlju promatramo uređaj za pročišćavanje voda koji se nalazi u Karlovcu. UPOV Karlovac trenutno funkcionira bez THP postrojenja, no u nastavku je matematički obrazloženo trenutno postrojenje te postrojenje nakon eventualne ugradnje THP postrojenja. Uređaj je dimenzioniran na 98.500 ES (ekvivalent stanovnika). Na UPOV-u trenutno imamo instalirana 2 anaerobna digestora ukupnog kapaciteta 2285 m³. U prvom dijelu (točka 4.1) definirana je metodologija matematičkih izračuna bilance mase i energije na cjelovitoj liniji mulja koja uključuje zgušnjavanje, stabilizaciju i dehidraciju mulja bez uvedenog procesa THP-a. U drugom dijelu (točka 4.2) izrađen je isti proračun, ali uz primjenu THP procesa.

3.1 Metodologija izračuna bilance mase i energije na liniji mulja bez THP postrojenja

- Primarni taložnik

Parametri za primarni taložnik:

Učinkovitost uklanjanja suspendiranih tvari (TSS):
 $U\check{C}TSS,1.ST = 50\%$, što znači da primarni taložnik uklanja polovicu ukupnih suspendiranih tvari iz otpadnih voda.

Učinkovitost uklanjanja biokemijske potrošnje kisika (BPK₅):
 $U\check{C}TBPK5,1.ST = 25\%$, što znači da taložnik uklanja 25% tvari koje doprinose BPK₅.

Masa mulja na prethodnom taložniku (M_{asMPT}):

$$M_{asMPT} = ES * 0,07 * (1 - U\check{C}TSS,1.ST/100)$$

Omjer organske tvari i ukupne suspendirane tvari ($M_{asVSS_{PT}} / M_{asTSS_{PT}}$) predstavlja postotak organske komponente u mulju.

Masa organske suhe tvari u suspendiranoj tvari može se izračunati pomoću izraza:

$$M_{asVSS_{TS}} = M_{asMPT} * M_{asVSS_{PT}} / M_{asTSS_{PT}}$$

Specifična gustoća mulja u primarnom taložniku: ($g_{spec,PT} = 1,02$)

Koncentracija suhe tvari u mulju: ($K_{M_{PT}}=2,5\%ST(25kgST/m^3)$)

Na kraju, volumen mulja koji se proizvodi u primarnom taložniku može se izračunati pomoću sljedeće formule:

$$K_{O_1}M_{PT} = M_{as}M_{PT} / g * K_{M_{PT}} * 10$$

Izračunati volumen mulja u primarnom taložniku iznosi **135 m³/d** (kubičnih metara dnevno).

Postupak proračuna:

$$U\check{C}_{TSS,1.ST}=50\% ; U\check{C}_{TBPK5,1.ST} =25\%$$

$$M_{as}M_{PT} = ES * 0,07 * (1 - U\check{C}_{TSS,1.ST}/100) = 3448 \text{ kgST/d}$$

$$M_{as}VSS_{PT} / M_{as}TSS_{PT} = 0,613$$

$$M_{as}VSS_{TS} = M_{as}M_{PT} * M_{as}VSS_{PT}/M_{as}TSS_{PT} = 2113 \text{ kgST/d}$$

$$g_{spec,PT}=1,02$$

$$K_{M_{PT}}=2,5\%ST(25kgST/m^3)$$

$$K_{O_1}M_{PT} = M_{as}M_{PT} / g * K_{M_{PT}} * 10 = 135 \text{ m}^3/\text{d}$$

- BIOLOŠKI MULJ

Parametri za biološki mulj:

Specifična proizvodnja mulja, označena kao PM_{spec} , izražava se kao količina proizvedene suhe tvari (ST) po jedinici uklonjenog BPK_5 (biokemijska potrošnja kisika tijekom 5 dana). Ovdje je definirana kao: $PM_{spec} = 0,8 \text{ kgST/kgBPK}_5$

Mjerodavna dnevna biokemijska potrošnja kisika ($MD_{BPK5,mjer}$): iznosi 4433 kgBPK_5/d .

Masa mulja u nitrifikacijskom taložniku:

$$M_{as}M_{NT} = PM_{spec} * MD_{BPK5,mjer}$$

Omjer organske tvari i ukupnih suspendiranih tvari: $M_{as}VSS_{NT} / M_{as}TSS_{NT} = 0,651$.

Masa organske suhe tvari u biološkom mulju:

$$M_{as}VSS_{NT} = M_{as}M_{NT} * M_{as}VSS_{NT} / M_{as}TSS_{NT}$$

Specifična gustoća mulja ($g_{spec,NT} = 1,005$)

Koncentracija suhe tvari u mulju: ($K_{M_{NT}}=2,5\%ST(25kgST/m^3)$)

Volumen biološkog mulja:

$$K_{ol}M_{NT} = M_{as}M_{NT} / g * KM_{NT} * 10$$

Izračunati volumen biološkog mulja iznosi 480 m³/d (kubičnih metara dnevno).

Postupak proračuna:

$$PM_{spec} = 0,8 \text{ kgST/kgBPK}_5$$

$$MD_{BPK5, mjer} = 4433 \text{ kgBPK}_5/d$$

$$M_{as}M_{NT} = PM_{spec} * MD_{BPK5, mjer} = 3546 \text{ kgST/d}$$

$$M_{as}VSS_{NT} / M_{as}TSS_{NT} = 0,651 \text{ (varira od } 0,6-0,7)$$

$$M_{as}VSS_{NT} = M_{as}M_{NT} * M_{as}VSS_{NT} / M_{as}TSS_{NT} = 2308 \text{ kgST/d}$$

$$g_{spec, NT} = 1,005$$

$$KM_{NT} = 2,5 \% \text{ ST (25 kgST/m}^3)$$

$$K_{ol}M_{NT} = M_{as}M_{NT} / g * KM_{NT} * 10 = 480 \text{ m}^3/d$$

- ZGUŠNJAVANJE MULJA

Parametri zgušnjavanja mulja:

Koncentracija suhe tvari nakon zgušnjavanja: $KM_{zgus} = 6 \% \text{ST}$

Specifična gustoća mulja nakon zgušnjavanja ostaje približno ista kao i prije zgušnjavanja : $g_{spec, zgus, PT} = g_{spec, zgus, NT} = 1,02$

Količina zgušnjenog mulja iz primarnog taložnika može se izračunati s pomoću sljedeće formule:

$$K_{ol}M_{zgus, PT} = M_{as}M_{PT} / g_{spec, zgus, PT} * KM_{zgus} * 10$$

Također i za naknadni taložnik:

$$K_{ol}M_{zgus, NT} = M_{as}M_{NT} / g_{spec, zgus, NT} * KM_{zgus} * 10$$

Stoga, količinu ukupnog zgušnjenog mulja dobijemo zbrojem količina zgušnjenog mulja iz prethodnog i naknadnog taložnika:

$$K_{ol}M_{zgus, uk} = K_{ol}M_{zgus, PT} + K_{ol}M_{zgus, NT}$$

Ukupna masa suhe tvari i organske tvari u zgušnjenom mulju dobiva se zbrajanjem mase mulja odnosno organske mase mulja iz primarnog i naknadnog taložnika:

$$M_{as}M_{zgus, uk} = M_{as}M_{PT} + M_{as}M_{NT}$$

$$M_{as}VSS_{zgus, uk} = M_{as}VSS_{PT} + M_{as}VSS_{NT}$$

Postupak proračuna:

$$KM_{zgus} = 6 \%ST$$

$$g_{spec, zgus, PT} = g_{spec, zgus, NT} = 1,02$$

$$K_{ol}M_{zgus, PT} = M_{as}M_{PT} / g_{spec, zgus, PT} * KM_{zgus} * 10 = 56 \text{ m}^3/d$$

$$K_{ol}M_{zgus, NT} = M_{as}M_{NT} / g_{spec, zgus, NT} * KM_{zgus} * 10 = 58 \text{ m}^3/d$$

$$K_{ol}M_{zgus, uk} = K_{ol}M_{zgus, PT} + K_{ol}M_{zgus, NT} = 56+58 = 114 \text{ m}^3/d$$

$$M_{as}M_{zgus, uk} = M_{as}M_{PT} + M_{as}M_{NT} = 7007 \text{ kgST/d}$$

$$M_{as}VSS_{zgus, uk} = M_{as}VSS_{PT} + M_{as}VSS_{NT} = 4422 \text{ kgST/d}$$

- STABILIZACIJA (ANAEROBNA DIGESTIJA)

Parametri za anaerobnu digestiju:

Volumen anaerobnog digestora V_{AD} ovisi o količini zgušnjene mulja $K_{ol}M_{zgus, uk} = 114 \text{ m}^3$ koji se unosi u digestor i o vremenu zadržavanja $t_{AD} = 20$ dana.

Temperatura anaerobne digestije iznosi: $T_{AN} = 38 \text{ }^\circ\text{C}$

Brzina hidrolize definira se kao brzina kojom se organske tvari razgrađuju tijekom anaerobne digestije:

$$KH = 0,045 * 1,075^{(T_{AN} - 10)}$$

Koeficijent razgradnje definira se kao omjer razgrađene organske tvari tijekom anaerobne digestije:

$$KR = KH * t_{AD} / (1 + KH * t_{AD})$$

Omjer razgradnje VSS-a iz primarnog i naknadnog taložnika:

$$VSS_{R, PT} = 70\% ; VSS_{R, NT} = 45\%$$

Masa hlapljivih suspendiranih tvari koje su razgrađene u anaerobnoj digestiji izračunava se kao zbroj razgradnje VSS-a iz primarnog i nakonadnog taložnika:

$$M_{as}VSS_{R, AN} = (M_{as}VSS_{PT} * VSS_{R, PT} * KR) / 100 + (M_{as}VSS_{NT} * VSS_{R, NT} * KR) / 100$$

Relativna razgradnja VSS-a izražava se kao postotak ukupnih VSS-a koji su razgrađeni tijekom anaerobne digestije:

$$VSS_{AN, REL} = M_{as}VSS_{R, AN} * 100 / (M_{as}VSS_{PT} + M_{as}VSS_{NT})$$

Masa stabiliziranog mulja nakon anaerobne digestije:

$$M_{as}M_{AD} = M_{as}M_{zgus, uk} - M_{as}VSS_{R, AN}$$

Količina stabiliziranog mulja $K_{O1}M_{ad}$ nakon anaerobne digestije ostaje ista kao i ulazna količina zgušnjelog mulja, odnosno $114 \text{ m}^3/\text{d}$.

Koncentracija suhe tvari u stabiliziranom mulju:

$$KM_{AD} = M_{as}M_{AD} / (K_{O1}M_{ad} * g_{spec,AD})$$

Masa preostalih hlapljivih suspendiranih tvari:

$$M_{as}VSS_{R,AD} = M_{as}VSS_{zgus,uk} - M_{as}VSS_R$$

Relativni udio preostalih VSS-a:

$$M_{as}VSS_{AD,REL} = M_{asAD} / M_{as}M_{AD} * 100$$

Postupak proračuna:

$$V_{AD} = K_{O1}M_{zgus,uk} * t_{AD} = 2285 \text{ m}^3 ; t_{AD} = 20 \text{ dana} ; T_{AN} = 38 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$KH = 0,045 * 1,075^{(T_{AN} - 10)} = 0,315 \text{ 1/d}$$

$$KR = KH * t_{AD} / (1 + KH * t_{AD}) = 0,863$$

$$VSS_{R,PT} = 70 ; VSS_{R,NT} = 45\%$$

$$M_{as}VSS_{R,AN} = (M_{as}VSS_{PT} * VSS_{R,PT} * KR) / 100 +$$

$$(M_{as}VSS_{NT} * VSS_{R,NT} * KR) / 100 = 2173 \text{ kgST/d}$$

$$VSS_{AN,REL} = M_{as}VSS_{R,AN} * 100 / (M_{as}VSS_{PT} + M_{as}VSS_{NT}) = 49,15\%$$

$$M_{as}M_{AD} = M_{as}M_{zgus,uk} - M_{as}VSS_{R,AN} = 4834 \text{ kgST/d}$$

$$K_{O1}M_{ad} = K_{O1}M_{zgus,uk} = 114 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$g_{spec,AD} = 1,02$$

$$KM_{AD} = M_{as}M_{AD} / (K_{O1}M_{ad} * g_{spec,AD}) = 41,47 \text{ kgST/m}^3 (4,15 \%ST)$$

$$M_{as}VSS_{R,AD} = M_{as}VSS_{zgus,uk} - M_{as}VSS_R = 2248 \text{ kgST/d}$$

$$M_{as}VSS_{AD,REL} = M_{asAD} / M_{as}M_{AD} * 100 = 46,51 \%$$

Anaerobna digestija učinkovito smanjuje količinu hlapljivih suspendiranih tvari (VSS), smanjujući organske komponente mulja i proizvođači stabilizirani mulj s nižim udjelom organske tvari. Na konkretnom primjeru, na UPOV-u Karlovac, anaerobnom digestijom razgrađeno je 49,15% VSS-a, a stabilizirani mulj ima koncentraciju suhe tvari od 4,15%.

- DEHIDRACIJA MULJA

Parametri dehidracije:

Koncentracija suhe tvari nakon dehidracije: $KM_{deh} = 25 \%ST$

Masa dehidriranog mulja računa se na osnovi mase stabiliziranog mulja ($M_{as}M_{AD}$) i dodatnih 1% koji se dodaju zbog procesa kondicioniranja mulja, što može uključivati dodavanje polimera ili drugih sredstava za bolju efikasnost dehidracije.

$$M_{as}M_{deh} = M_{as}M_{AD} + 0,01 * M_{as}M_{AD}$$

Godišnja masa dehidriranog mulja:

$$M_{as}M_{deh} = (M_{as}M_{deh} / (KM_{deh} * 0,01)) * 0,365$$

Specifična gustoća dehidriranog mulja: $g_{spec,deh} = 1,1$

Količina dehidriranog mulja:

$$K_{ol}M_{deh} = M_{as}M_{deh} / (g_{spec,deh} * KM_{deh} * 10)$$

Postupak proračuna:

$$KM_{deh} = 25 \%ST ; g_{spec,deh} = 1,1$$

$$M_{as}M_{deh} = M_{as}M_{AD} + 0,01 * M_{as}M_{AD} = 4882 \text{ kgST/d}$$

$$M_{as}M_{deh} = (M_{as}M_{deh} / (KM_{deh} * 0,01)) * 0,365 = 7128 \text{ t/godišnje}$$

$$K_{ol}M_{deh} = M_{as}M_{deh} / (g_{spec,deh} * KM_{deh} * 10) = 17,8 \text{ m}^3/\text{d}$$

Dehidracija stabiliziranog mulja značajno smanjuje volumen mulja, povećavajući koncentraciju suhe tvari na 25%. Nakon dehidracije, masa mulja iznosi 4882 kg/d, a godišnja proizvodnja dehidriranog mulja doseže 7128 tona godišnje. Količina dehidriranog mulja iznosi 17,8 m³/d, što je mnogo manji volumen u usporedbi s početnim stanjem mulja, čime se olakšava transport i odlaganje.

- PROIZVODNJA BIOPLINA

Parametri za proizvodnju bioplina:

Specifična proizvodnja bioplina odnosi se na količinu bioplina koji se generira po kilogramu hlapljivih suspendiranih tvari koje se razgrađuju u anaerobnoj digestiji:

$$BIOP_{spec,PT} = 0,86 \text{ Nm}^3/\text{kgVSS} ; BIOP_{spec,NT} = 0,66 \text{ Nm}^3/\text{kgVSS}$$

Ukupna proizvodnja bioplina izračunava se pomoću mase VSS-a iz primarnog i naknadnog taložnika, postotka razgradnje VSS-a u svakom taložniku, koeficijenta razgradnje, te specifične proizvodnje bioplina:

$$\text{BIOP} = (M_{\text{as}} \text{VSS}_{\text{PT}} * \text{VSS}_{\text{R,PT}} * K_{\text{R}} * \text{BIOP}_{\text{spec,PT}}) * 100 + \\ (M_{\text{as}} \text{VSS}_{\text{NT}} * \text{VSS}_{\text{R,NT}} * K_{\text{R}} * \text{BIOP}_{\text{spec,NT}}) * 100$$

Udio metana u bioplinu: $\text{CH}_{4,\text{BIOP}} = 0,67$

Količina proizvedenog metana: $K_{\text{olCH}_4,\text{BIOP}} = \text{BIOP} * \text{CH}_{4,\text{BIOP}}$

Specifična energetska vrijednost bioplina: $E_{\text{spec}} = 6,4 \text{ kWh/m}^3$

Ukupna dnevna proizvodnja energije: $E = \text{BIOP} * E_{\text{spec}} * 0,01$

Postupak proračuna:

$\text{BIOP}_{\text{spec,PT}} = 0,86 \text{ Nm}^3/\text{kgVSS}$; $\text{BIOP}_{\text{spec,NT}} = 0,66 \text{ Nm}^3/\text{kgVSS}$

$$\text{BIOP} = (M_{\text{as}} \text{VSS}_{\text{PT}} * \text{VSS}_{\text{R,PT}} * K_{\text{R}} * \text{BIOP}_{\text{spec,PT}}) * 100 + \\ (M_{\text{as}} \text{VSS}_{\text{NT}} * \text{VSS}_{\text{R,NT}} * K_{\text{R}} * \text{BIOP}_{\text{spec,NT}}) * 100 = 1690 \text{ Nm}^3/\text{d}$$

$\text{CH}_{4,\text{BIOP}} = 0,67$; $E_{\text{spec}} = 6,4 \text{ kWh/m}^3$

$K_{\text{olCH}_4,\text{BIOP}} = \text{BIOP} * \text{CH}_{4,\text{BIOP}} = 1124 \text{ Nm}^3/\text{d}$

$E = \text{BIOP} * E_{\text{spec}} * 0,01 = 10,8 \text{ MWh/d} = 3947 \text{ MWh/god}$

• ISKORISTIVOST U PROIZVODNJI ELEKTRIČNE ENERGIJE

Parametri za iskoristivost bioplina u proizvodnji energije:

Iskoristivost u proizvodnji električne energije odnosi se na omjer korisne električne energije koja se može dobiti iz ukupne energije sadržane u bioplinu: $E_{\text{el,isk}} = 0,4$

Efikasnost kogeneracije: $\text{BIOP}_{\text{kogen}} = 0,88$

Ukupna količina električne energije koja se može proizvesti iz bioplina računa se na temelju ukupne proizvodnje energije, iskoristivosti u proizvodnji električne energije, i efikasnosti kogeneracijskog sustava:

$$E_{\text{el}} = E * E_{\text{el,isk}} * \text{BIOP}_{\text{kogen}}$$

Snaga proizvodnje električne energije:

$$E_{\text{snaga}} = E_{\text{el}} / 8,76$$

Specifična cijena električne energije predstavlja cijenu po proizvedenom megavatsatu električne energije: $C_{\text{spec,el}} = 250 \text{ €/MWh}$

Godišnji prihod od prodaje proizvedene električne energije:

$$C_{\text{el}} = E_{\text{el}} * C_{\text{spec,el}}$$

Postupak proračuna:

$$E_{el,isk} = 0,4 ; BIOP_{kogen} = 0,88$$

$$E_{el} = E * E_{el,isk} * BIOP_{kogen} = 1389 \text{ MWh}_e/\text{godina}$$

$$E_{snaga} = E_{el} / 8,76 = 159 \text{ kW}$$

$$C_{spec,el} = 250 \text{ €/MWh}$$

$$C_{el} = E_{el} * C_{spec,el} = 347373 \text{ €/godina}$$

3.2 Metodologija izračuna bilance mase i energije na liniji mulja sa THP postrojenjem

U ovom dijelu analize svi ulazni parametri, kao i kapaciteti postrojenja, ostaju nepromijenjeni u odnosu na prethodni dio. Procesna linija zadržava iste ulazne parametre. Promjena se događa u fazi prethodne dehidracije, gdje dolazi do uvođenja THP procesa koji utječe na daljnju obradu mulja. Ovaj dio analize bit će matematički obrazložen i razrađen kroz izračune bilance mase i energije, s ciljem kvantificiranja učinaka THP procesa na ukupni proces. Također, imat ćemo uvid u razlike u količinama proizvedenog otpadnog mulja te količini dobivene energije, čime ćemo dodatno procijeniti ekonomske i energetske prednosti ove promjene.

Metodologija ovog procesa ostaje ista s matematičke strane, pri čemu će se analizirati ključni parametri, koji će zatim biti potkrijepljeni odgovarajućim jednadžbama kako bi se prikazali svi utjecaji THP-a na proces.

- PRETHODNA DEHIDRACIJA

Prije anaerobne digestije, mulj prolazi kroz dehidraciju. U prethodnoj fazi, dehidrirani mulj ima koncentraciju od 16,5% suhe tvari (ST), dok je specifična gustoća dehidriranog mulja 1,05. Masa mulja nakon zgušnjavanja iznosi 7007 kg ST/d, a količina hlapljivih suspendiranih tvari je 4422 kg ST/d . Ukupni volumen dehidriranog mulja u ovoj fazi iznosi: 40 m³/d .

Postupak proračuna:

$$KM_{\text{deh,preth}} = 16,5 \text{ \%ST}$$

$$g_{\text{spec,deh}} = 1,05$$

$$M_{\text{as}}M_{\text{deh,preth}} = M_{\text{as}}M_{\text{zgus,uk}} = 7007 \text{ kgST/d}$$

$$M_{\text{as}}VSS_{\text{preth}} = M_{\text{as}}VSS_{\text{zgus,uk}} = 4422 \text{ kgST/d}$$

$$K_{\text{ol}}M_{\text{deh,preth}} = M_{\text{as}}M_{\text{deh,preth}} / (g_{\text{spec,deh,preth}} * KM_{\text{deh,preth}} * 10) = 40 \text{ m}^3/\text{d}$$

- THP PROCES

U ovoj fazi, koncentracija suhe tvari je 11% ST, dok je specifična gustoća 1,05. Količina mulja nakon THP procesa iznosi 61 m³/d, a minimalni volumen anaerobnog digestora je 909 m³. Ovaj volumen mora biti dovoljno velik da zadrži mulj 15 dana (vrijeme zadržavanja). Međutim, stvarni volumen digestora je nešto veći, 1143 m³, što omogućuje mjerenu zadržanost od 18,8 dana.

Postupak proračuna:

$$KM_{\text{THP}} = 11 \text{ \%ST}$$

$$g_{\text{THP}} = 1,05$$

$$K_{\text{ol}}M_{\text{THP}} = M_{\text{as}}M_{\text{deh,THP}} / (g_{\text{spec,THP}} * KM_{\text{THP}} * 10) = 61 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$t_{\text{an,THP}} = 15 \text{ dana}$$

$$V_{\text{AN,THP,min}} = K_{\text{ol}}M_{\text{THP}} * t_{\text{an,THP}} = 909 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{AN,THP}} = 1143 \text{ m}^3$$

$$t_{\text{an,THP,mjer}} = V_{\text{AN,THP}} / K_{\text{ol}}M_{\text{THP}} = 18,8 \text{ dana}$$

- ANAEROBNA DIGESTIJA

U anaerobnom digestoru, proces se odvija pri temperaturi od 40°C. Koeficijent razgradnje hlapljivih suspendiranih tvari (VSS) za mulj iz primarnog taložnika je 80%, a za mulj iz naknadnog taložnika 64%. Ukupna razgradnja VSS-a izračunava se pomoću koeficijenta hidrolize $KH = 0,362 \text{ 1/d}$ i koeficijenta razgradnje $KR = 0,872$. Masa razgrađenih VSS-a u anaerobnoj digestiji iznosi 2763 kgST/d. Postotak razgradnje VSS-a u odnosu na ukupnu količinu VSS-a iznosi 62,15%. Preostala masa

mulja nakon anaerobne digestije je 4238 kg ST/d, a volumen mulja iz digestora iznosi 61 m³/d, uz specifičnu gustoću od 1,05.

Postupak proračuna:

$$T_{AN,THP} = 38 \text{ } ^\circ\text{C} ; VSS_{R,PT,THP} = 80\% ; VSS_{R,NT,THP} = 64\%$$

$$KH = 0,045 * 1,075^{(T_{AN} - 10)} = 0,362 \text{ l/d}$$

$$KR = KH * t_{AD} / (1 + KH * t_{AD}) = 0,872$$

$$M_{as}VSS_{R,AN,THP} = (M_{as}VSS_{PT} * VSS_{R,PT} * KR) / 100 + \\ (M_{as}VSS_{NT} * VSS_{R,NT} * KR) / 100 = 2763 \text{ kgST/d}$$

$$VSS_{AN,REL} = M_{as}VSS_{R,AN,THP} * 100 / (M_{as}VSS_{PT} + M_{as}VSS_{NT}) = 62,15\%$$

$$M_{as}M_{AD,THP} = M_{as}M_{zgus,uk} - M_{as}VSS_{R,AN,THP} = 4238 \text{ kgST/d}$$

$$K_{ol}M_{ad,THP} = K_{ol}M_{THP} = 61 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$g_{spec,AD,THP} = 1,05$$

$$KM_{AD,THP} = M_{as}M_{AD} / (K_{ol}M_{ad} * g_{spec,AD}) = 66,58 \text{ kgST/m}^3 \text{ (6,6 \%ST)}$$

$$M_{as}VSS_{R,AD,THP} = M_{as}VSS_{zgus,uk} - M_{as}VSS_{R} = 1658 \text{ kgST/d}$$

$$M_{as}VSS_{AD,REL,THP} = M_{as}M_{AD,THP} / M_{as}M_{AD,THP} * 100 = 39,13 \%$$

- NAKNADNA DEHIDRACIJA

Nakon anaerobne digestije, mulj se ponovo dehidrira. U ovoj fazi koncentracija suhe tvari raste na 30% ST, a masa dehidriranog mulja iznosi 4882 kg ST/d. Godišnja proizvodnja dehidriranog mulja iznosi 5182 t/godišnje. Ukupna dnevna količina dehidriranog mulja nakon THP procesa iznosi 12,8 m³/d.

Postupak proračuna:

$$KM_{deh} = 30 \text{ \%ST} ; g_{spec,deh,THP} = 1,1$$

$$M_{as}M_{deh,THP} = M_{as}M_{AD,THP} + 0,01 * M_{as}M_{AD} = 4882 \text{ kgST/d}$$

$$M_{as}M_{deh,THP} = (M_{as}M_{deh} / (KM_{deh} * 0,01)) * 0,365 = 5182 \text{ t/godišnje}$$

$$K_{ol}M_{deh,THP} = M_{as}M_{deh,THP} / (g_{spec,deh,THP} * KM_{deh,THP} * 10) = 12,8 \text{ m}^3/\text{d}$$

-

Specifična proizvodnja bioplina za mulj iz primarnog taložnika iznosi 0,95 Nm³/kg VSS, dok je za nitrifikacijski mulj 0,86 Nm³/kg VSS. Ukupna proizvodnja bioplina dnevno iznosi 2509 Nm³/d. Od te količine bioplina, 67% čini metan, što daje 1669 Nm³/d metana. Korištenjem metana u kogeneraciji, specifična energetska vrijednost iznosi 6,4 kWh/m³, što rezultira ukupnom dnevnom proizvodnjom energije od 16,1 MWh/d, odnosno 5862 MWh/godišnje.

Postupak proračuna:

$$BIOP_{spec,PT,THP} = 0,95 \text{ Nm}^3/\text{kgVSS}$$

$$BIOP_{spec,NT,THP} = 0,86 \text{ Nm}^3/\text{kgVSS}$$

$$BIOP = (M_{as}VSS_{PT} * VSS_{R,PT} * K_R * BIOP_{spec,PT}) * 100 + (M_{as}VSS_{NT} * VSS_{R,NT} * K_R * BIOP_{spec,NT}) * 100 = 2509 \text{ Nm}^3/\text{d}$$

$$CH_{4,BIOP} = 0,67$$

$$K_{olCH_4,BIOP} = BIOP * CH_{4,BIOP} = 1669 \text{ Nm}^3/\text{d}$$

$$E_{spec} = 6,4 \text{ kWh/m}^3$$

$$E = BIOP * E_{spec} * 0,01 = 16,1 \text{ MWh/d} = 5862 \text{ MWh/god}$$

- KORIŠTENJE BIOPLINA ZA PROIZVODNJU PARE

Dio bioplina se koristi za proizvodnju pare, pri čemu je iskoristivost bioplina za ovaj proces 24%. Preostala količina bioplina koja ide u kogeneraciju iznosi 1907 Nm³/d. Od tog bioplina, količina metana za kogeneraciju iznosi 1268 Nm³/d, a dnevna proizvodnja energije u kogeneracijskom sustavu je 12 MWh/d, odnosno 4455 MWh/godišnje.

Postupak proračuna:

$$I_{sk,BIOP,para} = 0,24$$

$$K_{ol,BIOP,kogen} = BIOP - (BIOP * I_{sk,BIOP,para}) = 1907 \text{ Nm}^3/\text{d}$$

$$K_{olCH_4,BIOP,kogen} = CH_{4,BIOP} * K_{ol,BIOP,kogen} = 1268 \text{ Nm}^3/\text{d}$$

$$E_{kogen} = E_{spec} * K_{ol,BIOP,kogen} * 0,001 = 12 \text{ MWh/d} = 4455 \text{ MWh/godina}$$

- PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Iskoristivost u proizvodnji električne energije iz bioplina iznosi 40%, a ukupna učinkovitost kogeneracije je 76%. Efektivna godišnja proizvodnja električne energije iznosi 1354 MWh_e/godina. To odgovara prosječnoj snazi proizvodnje električne energije od 155 kW. Specifična cijena električne energije iznosi 250 €/MWh, što znači da godišnji prihod od prodaje električne energije iznosi 338567 €/godina.

Postupak proračuna:

$$E_{el,isk} = 0,4$$

$$BIOP_{kogen} = 0,76$$

$$E_{el} = E * E_{el,isk} * BIOP_{kogen} = 1354 \text{ MWh}_e/\text{godina} \quad \text{efektivna energija}$$

$$E_{snaga} = E_{el} / 8,76 = 155 \text{ kW}$$

$$C_{spec,el} = 250 \text{ €/MWh}$$

$$C_{el} = E_{el} * C_{spec,el} = 338567 \text{ €/godina}$$

3.3 Usporedba proračuna bilance mase i energije

U nastavku je prikazana tablica koja ključne parametre koji se odnose na učinkovitost obrade mulja u postrojenju UPOV-a Karlovac, i to prije i nakon primjene THP procesa. Ovi parametri uključuju udio razgradivog mulja, specifičnu težinu mulja nakon anaerobne digestije, ukupnu masu dehidriranog mulja, proizvodnju bioplina, količinu metana te godišnji prihod od prodaje električne energije.

Analizom ovih podataka, moguće je uočiti kako primjena THP-a utječe na efikasnost obrade mulja, kao i na proizvodnju bioplina i energetske iskoristivost u postrojenju.

Tablica također ističe prednosti koje THP donosi u kontekstu obrade mulja u UPOV Karlovac. Primjena THP tehnologije donosi značajna poboljšanja u razgradnji mulja, smanjenje mase dehidriranog mulja, te povećanje proizvodnje bioplina i električne energije. Ovo se posebno odražava na povećanje ukupne proizvodnje bioplina i količine električne energije, dok se godišnji prihod, unatoč poboljšanjima, smanjuje uslijed promjena u učinkovitosti kogeneracije.

Kroz ovu tablicu, može se dobiti jasnija slika o utjecaju THP-a na operativnu učinkovitost postrojenja i njegovu ekonomsku isplativost.

Tablica 2: Utjecaj THP tehnologije na obradu mulja i proizvodnju energije u UPOV Karlovac

Parametar	Bez THP-a	S THP-om	Prednost
Udio Razgradivog Mulja	49,15%	62,15%	Povećanje efikasnosti razgradnje
Specifična Težina (KMAD)	41,47 kgST/m ³ (4,15% ST)	66,58 kgST/m ³ (6,6% ST)	Povećanje specifične težine nakon THP-a
Ukupna Masa Dehidriranog Mulja	7128 t/godišnje	5182 t/godišnje	Smanjenje mase mulja nakon THP-a
Proizvodnja Bioplina	1690 Nm ³ /d	2509 Nm ³ /d	Značajno povećanje proizvodnje bioplina
Količina Metana (CH ₄)	1124 Nm ³ /d	1669 Nm ³ /d	Povećanje količine metana
Udio Metana za Kogeneraciju	1124 Nm ³ /d	1268 Nm ³ /d	Povećanje udjela metana za kogeneraciju
Proizvodnja Električne Energije	3947 MWh/godišnje	4455 MWh/godišnje	Povećanje proizvodnje električne energije
Godišnji Prihod u Eurima	347,373 €	338,567 €	Smanjenje prihoda uslijed učinkovitosti kogeneracije

ZAKLJUČAK

Zaključno, pročišćavanje otpadnih voda ključan je proces za održavanje okoliša i zdravlja ljudi, osobito u urbaniziranim područjima s velikim količinama otpada. Pročišćavanje putem uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) koristi mehaničke, biološke i kemijske metode za uklanjanje nečistoća iz vode, dok je obrada nusproizvoda, poput mulja, jednako važna. Mulj, koji sadrži visok udio organskih tvari, može se obraditi putem procesa kao što je termalna hidroliza (THP). THP proces omogućuje veću učinkovitost u smanjenju volumena mulja, povećanu proizvodnju bioplina i smanjenje troškova obrade. Ova metoda se sve više koristi u zemljama s naprednim sustavima gospodarenja otpadom, iako su visoki troškovi ograničavajući faktor. Integracija THP-a s anaerobnom digestijom može značajno smanjiti štetne utjecaje na okoliš, poboljšati učinkovitost obrade te smanjiti ukupne troškove zbrinjavanja mulja. S obzirom na prednosti koje THP nudi, njegova primjena u većim sustavima obrade, kao što su UPOV-i u većim hrvatskim gradovima, mogla bi donijeti značajne koristi u smislu energetske učinkovitosti i zaštite okoliša.

Postupkom proračuna ugradnja postrojenja za toplinsku hidrolizu (THP) donijela bi značajne prednosti uređaju za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) Karlovac, koji je trenutno dimenzioniran na 98.500 ekvivalent stanovnika. Glavne prednosti uključuju povećanje efikasnosti razgradnje mulja, smanjenje ukupne mase dehidriranog mulja, povećanje proizvodnje bioplina, povećanje količine metana (CH₄), povećanje proizvodnje električne energije.

Unatoč tome što bi godišnji prihod od prodaje energije mogao biti nešto manji zbog veće učinkovitosti kogeneracijskog sustava, dugoročno smanjenje operativnih troškova (manje mulja za zbrinjavanje) i povećanje energetske proizvodnje čini investiciju u THP vrlo isplativom.

Zaključno, ugradnja THP-a omogućila bi UPOV-u Karlovac da postane regionalno središte za pročišćavanje otpadnih voda, s poboljšanom efikasnošću obrade, većom proizvodnjom bioplina i značajnim smanjenjem količine otpada.

POPIS LITERATURE

- [1] Vouk, D., Nakić, D., Šiljeg, M., Petković, I.: Izvedivost THP procesa obrade mulja na postojećim i novim UPOV-ima, 8th International Conference WATER FOR ALL, 2019. , str 40.-51. , http://www.ptfos.unios.hr/voda/wpcontent/uploads/2023/03/Zbornik-radova_VODA-ZA-SVE-2019_e-izdanje.pdf
- [2] Barber, W.P.F. (2010), The influence on digestion and advanced digestion on the environmental impacts of incinerating sewage sludge: UK case study, United
- [3] Barber, W.P.F. (2012), Thermal Hydrolysis: The Missing Ingredient for Better Biosolids, Sludge Management.
- [4] Whitlock, D., Sandino, J., Novak, J., Johnson, B., Filmore, L., (2009), Underlying Mechanistic Principles and Proposed Modeling Approach for Waste Activated Sludge Reduction Technologies. Proceedings from the 23th annual WEF Residuals and Biosolids Conference.
- [5] Gurieff, N., Bruus, J., Hoejsgaard, S., Boyd, J., Kline, M. (2011.), Maximizing Energy Efficiency and Biogas Production; EXELYS-Continuous Thermal Hydrolysis", Proceedings from the 84th annual WETEC Conference.
- [6] P. Weiland. Biogas production: current state and perspectives. Applied Microbiology and Biotechnology (2010) 849-860
- [7] P. G. Kougias, I. Angelidaki. Biogas and its opportunities A review. Frontiers of Environmental Science & Engineering (2018)
- [8] S. Wainaina, Lukitawesa, M. K. Awasthi, M. J. Taherzadeh. Bioengineering of anaerobic digestion for volatile fatty acids, hydrogen or methane production: A critical review. Bioengineered (2019) 437-458

POPIS SLIKA

- Slika 1:** Primjer UPOV-a (Izvor: <https://www.vik-ka.hr/odvodnja/uredaj-za-prociscavanje-otpadnih-voda.html>).. 1
- Slika 2:** Sustav pročišćavanja otpadnih voda i proces nastajanja mulja (Izvor: http://www.grad.hr/rescue/materijali/Izvjestaji_1/Izvjestaj_br_6_Analiza_trzista.pdf)..... 4
- Slika 4:** Izgled mulja prije THP procesa i nakon THP procesa (Izvor: Goss, T. (2015), Lessons Learned from Recent Thermal Hydrolysis Plants Start up and Commissioning, WEAT-NTS Seminar, AECOM.)..... 6
- Slika 5:** Spremnici za skladištenje bioplina (<https://www.enerkon.hr/postrojenje-na-bioplin-pisarovina-1200-kwel/>)..... 8
- Slika 6:** Digestat kao nusproizvod anaerobne razgradnje (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721051457>)..... 9
- Slika 7:** Proces anaerobne digestije za proizvodnju bioplina (<https://www.esco.rs/tretman-otpadnih-voda.html>)..... 9
- Slika 8:** Tehnološka shema linije vode i linije mulja s THP procesom ispred anaerobne digestije (<https://stanceglobal.com/stanceenviro/cambi-thermal-hydrolysis-3/12>)..... 11
- Slika 9:** Tehnološka shema linije vode i linije mulja s THP procesom iza anaerobne digestije (<https://stanceglobal.com/stanceenviro/cambi-thermal-hydrolysis-3/12>)..... 12

POPIS TABLICA I GRAFIKONA

Tablica 1: Vodeće države s pripadajućim THP postrojenjima.....5

Tablica 2: Utjecaj THP tehnologije na obradu mulja i proizvodnju energije u UPOV Karlovac.....27

Grafikon 1: Proizvodnja mulja na UPOV-ima u Europskoj uniji
(Izvor:<https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-023-00837-x>)