

# Korištenje otpadne vode za dobivanje energije

---

**Beliga, Petra**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:054885>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-27**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET**

**PETRA BELIGA**

**KORIŠTENJE OTPADNE VODE ZA DOBIVANJE ENERGIJE**

**DIPLOMSKI RAD**

**VARAŽDIN, 2021**

Sazivam članove ispitnog povjerenstva  
za 20.09.2021. u 9 sa  
Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred  
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu  
Varaždin, 06.09.2021.

Predsjednik  
ispitnog povjerenstva:

Izv.prof.dr.sc. Saša Koreć

**Članovi povjerenstva**

- 1) Doc.dr.sc. Jelena Lobjarec
- 2) Doc.dr.sc. Simiša Štrec
- 3) Izv.prof.dr.sc. Aleksandra Anić Vučinić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

PETRA BELIGA

DIPLOMSKI RAD  
**KORIŠTENJE OTPADNE VODE ZA DOBIVANJE ENERGIJE**

KANDIDAT:

PETRA BELIGA

univ.bacc.ing.amb.

*Petra Beliga*

MENTOR:

Doc.dr.sc. JELENA LOBOREC

VARAŽDIN, 2021.



Sveučilište u Zagrebu  
Geotehnički fakultet



## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnica: PETRA BELIGA  
Matični broj: 280 - 2019./2020.  
Smjer: GEOINŽENJERSTVO OKOLIŠA

### NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

KORIŠTENJE OTPADNE VODE ZA DOBIVANJE ENERGIJE

Rad treba sadržati:


1. Uvod
2. Otpadne vode
3. Obrada otpadnih voda
4. Uređaji za pročišćavanje otpadnih voda u RH i svijetu
5. Energija iz otpadne vode danas i u budućnosti
6. Zaključak
7. Popis literature

Pristupnica je dužna predati mentoru jedan uvezen primjerak diplomskog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade diplomskog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 19.03.2021.


Rok predaje: 06.09.2021.

Mentor:

  
Doc.dr.sc. Jelena Loborec



Predsjednik Odbora za nastavu:

  
Izv.prof.dr.sc. Sanja Kovač



## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

### KORIŠTENJE OTPADNE VODE ZA DOBIVANJE ENERGIJE

---

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom

**Doc.dr.sc. Jelene Loborec**

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 03.09.2021.

Petra Beliga

---

(Ime i prezime)

*Petra Beliga*

---

(Vlastoručni potpis)

## **IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI ZAVRŠNOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA**


Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom:

### **Korištenje otpadne vode za dobivanje energije**

pregledan anti-plagijat programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog završnog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni postotak sličnosti završnog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5%.

U Varaždinu, 03.09.2021.

Doc.dr.sc. Jelena Loborec  
(Mentor)

  
\_\_\_\_\_  
(Vlastoručni potpis)

## **Sažetak**

Pročišćavanje otpadnih voda postupak je smanjenja količine štetnih tvari do te razine da voda koja se ispušta natrag u prirodu nema štetni utjecaj na okoliš, živa bića u njemu te na zdravlje ljudi. U procesu pročišćavanja otpadnih voda nastaje mulj kao nusproizvod. Otpadni mulj predstavlja mješavinu organskih i anorganskih tvari iz vode, a može sadržavati parazite, patogene mikroorganizme, viruse te mnoge potencijalne otrovne elemente i štetne spojeve. Pročišćene otpadne vode ispuštaju se u prirodni prijamnik, a odvojeni mulj zahtjeva daljnju obradu i odlaganje kako ne bi predstavljao opasnost za okoliš i ljudsko zdravlje, sve u skladu s ekološkim i ekonomski prihvatljivim načinima. Održivi pristup upravljanja muljem podrazumijeva primjenu prikladne tehnologije obrade mulja, što bi omogućilo njegovo ponovno korištenje uz zadovoljavajuće financijske i ekološke uvjete. U Hrvatskoj taj problem oko pametnog zbrinjavanja i obrade otpadnog mulja do dan danas nije u konačnici jasno definiran ni reguliran određenim uputama, smjernicama i propisima. U posljednje vrijeme ideje o korisnosti i isplativosti gradnje kvalitetnog postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda koja bi uključivala i obradu te uporabu proizvedenog mulja u RH postaje sve intenzivnija. Opće je poznato da povećanjem životnog standarda raste količina otpadne vode, povećanje stupnja pročišćavanja otpadne vode raste i količina nastalog mulja kojeg je potrebno obraditi. Sve to zajedno povećava troškove rada komunalnih poduzeća koji se bave odvodnjom i pročišćavanjem otpadne vode. Ovaj rad razmatra problematiku pročišćavanja otpadnih voda te mogućnosti daljnje uporabe mulja na ekološki prihvatljiv i ekonomski isplativ način, posebice u području energetike.

**Ključne riječi:** pročišćavanje otpadnih voda, mulj iz otpadnih voda, energija iz mulja, energetika



## **Abstract**

Wastewater treatment is a process of reducing the amount of harmful substances to such an extent that water that is filled back into nature has no harmful effects on the environment, living beings in it and on human health. Sludge is formed as a by-product in a wastewater treatment process. Waste sludge is a mixture of organic and inorganic substances isolated from wastewater, and may contain parasites, pathogenic microorganisms, viruses and many potential toxic elements and harmful compounds. The treated wastewater is discharged into a natural receiver, and separated sludge requires further treatment and disposal so as not to pose a danger to the environment and human health, all in accordance with environmentally and economically acceptable methods. A sustainable sludge management approach implies the application of an appropriate sludge treatment technology, which would enable its reuse with satisfactory financial and environmental conditions. The problem regarding the smart disposal and treatment of waste sludge according to certain instructions, guidelines and regulations. has not been clearly defined or regulated in Croatia so far. Recently, the idea of usefulness and cost-effectiveness of building a quality wastewater treatment plant that would include and process the recovery of produced sludge in Croatia and in the world is becoming more interesting. It is generally known that as the standard of living increases, the amount of wastewater increases and as the degree of wastewater treatment increases so does the amount of sludge that needs to be treated. All of this increases the operating costs of utility companies engaged in drainage and wastewater treatment. This paper presents the issue of wastewater treatment and the possibility of further use of sludge in an environmentally friendly and economically advantageous way, especially in the field of energy.

**Keywords:** wastewater treatment, sludge from wastewater, energy from sludge, energetics

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. OTPADNE VODE .....	2
2.1. Sanitarne otpadne vode.....	2
2.2. Industrijske otpadne vode.....	2
2.3. Oborinske otpadne vode .....	3
2.4. Tuđe vode .....	3
3. OBRADA OTPADNIH VODA .....	4
3.1. Stupnjevi pročišćivanja otpadnih voda.....	4
3.2. Obrada mulja iz pročišćivača otpadnih voda.....	9
3.3. Bioplin iz anaerobne digestije .....	14
3.4. Zakonska regulativa zbrinjavanja otpadnog mulja u RH .....	18
4. UREĐAJI ZA PROČIŠĆIVANJE OTPADNIH VODA U RH I SVIJETU .....	23
5. ENERGIJA IZ OTPADNE VODE DANAS I U BUDUĆNOSTI.....	28
6. ZAKLJUČAK.....	34
7. LITERATURA .....	36
8. POPIS SLIKA .....	39
9. POPIS TABLICA.....	40
10. POPIS I OBJAŠNJENJE KRATICA KORIŠTENIH U RADU .....	40

# 1. UVOD

Proces pročišćivanja otpadnih voda vrlo je kompleksan i precizno određen tijek radnji koji za provedbu trebaju veliku količinu energije kako bi svi standardi rada i standardi kvalitete ispuštanja bili zadovoljeni. Pročišćavanjem se iz otpadnih voda uklanjaju neželjene komponente, pri čemu nastaje mulj kao neizbježan nusproizvod. Mulj nastao tijekom obrade trajno odložen u okoliš najveći je problem u aktivnostima pročišćavanja otpadnih voda. Učinak pročišćavanja otpadnih voda ne mjeri se samo kvalitetom pročišćene otpadne vode, već i količinom i svojstvima mulja koji se izdvaja tijekom postupka obrade. Mulj je složenog sastava, mješavina je organskih i anorganskih tvari, fizički prisutnih ili raspršenih u vodi, a može sadržavati patogene mikroorganizme, parazite, viruse itd., potencijalno otrovne elemente te štetne spojeve.

Pročišćavanje i zbrinjavanje mulja sastavni je dio procesa pročišćavanja otpadnih voda. Stoga razvoj rješenja za pročišćavanje otpadnih voda mora uključivati i obradu te zbrinjavanje stvorenog mulja što uključuje i troškove obrade i odlaganja mulja kao sastavni dio troška pročišćavanja otpadnih voda. Odabir mjesta prikladnog za odlaganje mulja ovisi o nekoliko čimbenika, uključujući, ali ne ograničavajući se na, kvalitetu i količinu mulja koji proizvede uređaj za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV), legalne propise, lokalne uvjete i ulaganja te troškove rada i održavanja. Nažalost, postojeće europsko zakonodavstvo bavi se prvenstveno rukovanjem i odlaganjem mulja, a kao glavna mogućnost uporabe mulja spominje se jedino korištenje mulja za poljoprivredu. Međutim, na otpadnu vodu ne treba gledati samo kao nešto negativno, već se ona, budući da je sveprisutna i neizostavna, može promatrati kao resurs koji bi pravilnim rukovanjem mogao doprinijeti stvaranju energije. Mulj iz otpadnih voda sadrži oko 70% organske tvari čija se energetska vrijednost može koristiti ili reciklirati na razne načine, ne samo u poljoprivredi, nego i u građevinarstvu, ali i kao energent. Zelena energija i energija biomase kakva nam je danas poznata, potencira upravo takvu vrstu tehnologije i omogućava da postrojenja za pročišćivanje otpadnih voda budu energetska postojana. Postoji niz objašnjenih, sveobuhvatnih energetski učinkovitih tehnologija koje su primjenjive na postrojenjima za pročišćivanje otpadnih voda, a koje će detaljnije biti obrađene u radu. Fokus ovog rada je prikazati načine iskorištavanja energije iz mulja u duhu načela održivog razvoja i zelene energije.

## **2. OTPADNE VODE**

Termin otpadne vode odnosi se na svu vodu koja je u svojoj prošlosti pretrpjela bilo kakve promjene od svog izvornog sastava u odnosu na svoja fizikalna, kemijska i biološka svojstva. Otpadne vode su sve vode iz domaćinstava, industrije, kanalizacijskih sustava, uključujući i kišnicu i druge vode onečišćene ljudskim djelovanjem. Prema načinu nastanka otpadnih voda mogu se podijeliti na sanitarne otpadne vode, industrijske otpadne vode, oborinske otpadne vode i tuđe vode [1, 2].

### **2.1. Sanitarne otpadne vode**

Pod pojmom sanitarne/kućanske otpadne vode podrazumijevamo vode iz kućanstava, uslužnih i javnih ustanova (bolnica, škola, vrtića, policijskih postaja te ostalih javnih i neproizvodnih djelatnosti). Sanitarne otpadne vode dijele se na: fekalne vode (sanitarnih uređaja) i potrošne vode (osobna higijena, pranje, kuhanje i sl.). Količine sanitarnih/kućanskih otpadnih voda ovise o specifičnosti potrošnje vode. Takva voda je jednaka količini vode koja se utroši ili manja od nje za svega 10 %. Sanitarne/kućanske otpadne vode dijelimo još na crne i sive vode. Sive vode tako predstavljaju otpadne vode iz kupaonica, tuševa, bazena, praonica te one ne sadržavaju mnogo krutih tvari. Crne vode su otpadne vode iz kuhinja i sanitarnih čvorova. Zbog upotrebe tople vode u kuhinjama i kupaonicama temperatura kućanskih otpadnih voda je povišena što se pokazuje i u kanalizacijskom sustavu kroz proces biorazgradnje, zbog toga su te vode neugodnog mirisa i vrlo ružnog izgleda što bez pročišćavanja uzrokuje znatno onečišćenje prijemnika [3].

### **2.2. Industrijske otpadne vode**

Industrijske/tehnološke otpadne vode su vode koje nastaju različitim tehnološkim procesima u industriji. One se dijele na dvije osnovne skupine: biološki razgradive i biološki nerazgradive. Biološki razgradive vode se mogu miješati sa sanitarnim/kućanskim otpadnim vodama i kanalizirati u istom sustavu, a biološki nerazgradive vode prije ispuštanja u kanalizacijski sustav trebaju se pročistiti na mjestu

njihovog nastanka (radi kontrole toksičnih tvari u takvim vodama koji sprječavaju biološku razgradnju). Pod biološki razgradive otpadne vode najčešće spadaju vode iz prehrambene industrije. Ovdje je važno spomenuti i onečišćene vode koje su „uvjetno čiste“, a to su vode iz industrije koje nisu pretrpjele značajne promjene fizikalnih i kemijskih svojstava pa se mogu bez predobrade ispustiti u kanalizaciju. Postoji i toplinsko onečišćenje ovih voda, jer većina industrije upotrebljava znatne količine vode kao rashladne vode, pri čemu raste temperatura vode i povećava se koncentracija soli u otpadnoj vodi. Svaka industrija ima specifičan način korištenja voda, pa se i temeljni sastojci u otpadnoj vodi mogu različito manifestirati kroz: teške metale, masti, ulja, kiseline, lužine, itd. Takve vode prije ispuštanja u gradsku kanalizacijsku mrežu potrebno je pročistiti iz više razloga, od kojih su neki: kako bi se uklonile toksične i postojeće tvari koje se u suprotnom gomilaju u organizmu i sprječavaju biološku razgradnju te zbog uklanjanja korozivnih i eksplozivnih tvari koje bi mogle dovesti do oštećenja kanalizacijskih objekata [3].

### **2.3. Oborinske otpadne vode**

To su vode koje nastaju od oborina, a onečišćuju se kroz površine na tlu, na krovovima, a ponekad i u niskim slojevima atmosfere (npr. pustinjska kiša). Takve vode se prihvaćaju u sustav kanalizacije bez prethodne obrade. Količina ovih otpadnih voda ovisi o učestalosti padalina, o načinu održavanja javne higijene (pranje ulica), o jačini intenziteta prometa motornim vozilima. Ove vode su najbližije sanitarnim/kućanskim otpadnim vodama po ukupnom bakteriološkom onečišćenju, ali oborinske otpadne vode s industrijskih površina mogu sadržavati određene količine bakra, olova, arsena i sl. [3].

### **2.4. Tuđe vode**

Pod pojam tuđe vode podrazumijevaju se sve vode koje ulaze u sustav odvodnje, a nisu industrijske ni kućanske otpadne vode. To su podzemne vode koje se procjeđuju u kanalsku mrežu kroz pukotine i spojeve, zatim oborinske vode koje ulaze kroz poklopce i okna te druge otvore kao i ilegalni priključci kućanstava ili oborinskih voda [3].

### **3. OBRADA OTPADNIH VODA**

Podrijetlo otpadnih voda znatno utječe na sam sastav otpadnih voda. Neki od osnovnih svojstava otpadnih voda su: povišena temperatura vode, mikroorganizmi, otrovne tvari, radioaktivne tvari, otopljeni plinovi, krupni otpaci i krutine [2].

Pročišćivanje otpadnih voda složan je proces kojim se otpad odvaja od same onečišćene vode, gdje mulj nastaje kao produkt tog procesa. Obzirom na svojstva otpadnih voda postoje faze kroz koje se odvija proces pročišćivanja. Otpadne vode je potrebno pročistiti prije ispuštanja u prijemnike kako bi se smanjenjem onečišćujućih tvari izbjegle potencijalne opasnosti za život i zdravlje ljudi i neželjene promjene u okolišu. U glavne produkte koji nastaju pri čišćenju otpadnih voda ubrajaju se očišćena otpadna voda, mulj i plin. Već prilikom ispuštanja otpadnih voda u prijemnike, one se trebaju pročistiti do određenog stupnja kako bi se uklonile plivajuće, lebdeće i otopljene tvari koje su prisutne u otpadnim vodama, odnosno koje bitno karakteriziraju svojstva otpadnih voda i mijenjaju kakvoću prirodnih voda [1, 4].

Najvažniji učinak u poboljšanju kakvoće prirodnih vodnih sustava postići će se čišćenjem otpadnih voda. Čišćenje otpadnih voda je tehnološki proces koji se ostvaruje na uređajima za pročišćavanje. „Uređaji za pročišćavanje otpadnih voda su vodne građevine s postrojenjima kojima se pročišćavaju otpadne vode iz sustava javne odvodnje prije njihova ispuštanja u prirodni prijemnik.“ Prema stupnju pročišćavanja dijele se na prethodni stupanj pročišćavanja, prvi stupanj pročišćavanja, drugi stupanj pročišćavanja i treći stupanj pročišćavanja [1].

#### **3.1. Stupnjevi pročišćavanja otpadnih voda**

Za pročišćavanje otpadnih voda služe uređaji s postrojenjima pomoću kojih se otpadne vode iz sustava javne odvodnje pročišćavaju prije ispuštanja u prirodni prijemnik (rijeku, more, itd.). Uređaji za pročišćavanje otpadnih voda dijele se u više kategorija: uređaj prethodnog stupnja pročišćavanja, uređaj prvog stupnja pročišćavanja, uređaj drugog stupnja pročišćavanja i uređaj trećeg stupnja pročišćavanja [1, 2].

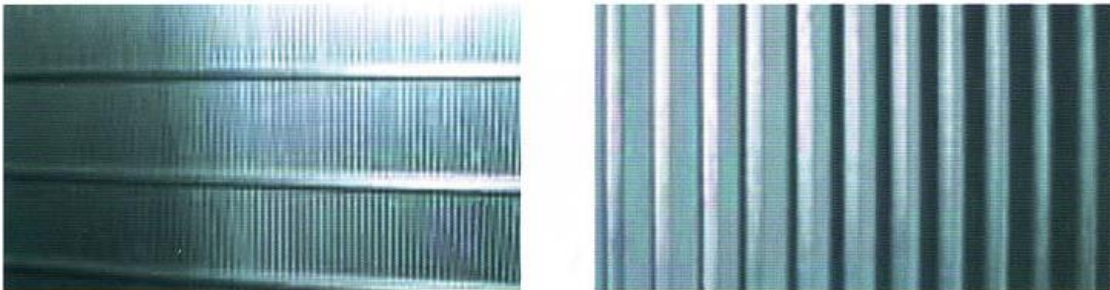
Prethodno pročišćavanje otpadnih voda zajedno sa prvim stupnjem pročišćavanja naziva se još i mehaničko pročišćavanje, jer se iz otpadnih voda izdvajaju krupni otpaci, masti i ulja, pijesak i sl. Ti uređaji sastoje se od rešetki različitih veličina te pjeskolova. Nastali otpad se odvodnjava, preša i sprema u odgovarajuće kontejnere te se na posljetku zbrinjava na odlagalištima komunalnog otpada. Kod prethodnog pročišćavanja pojavljuju se neugodni mirisi [1, 2].

Prvi stupanj pročišćavanja otpadnih voda glavni je postupak u kojem dolazi do taloženja. To je primjena fizikalnih postupaka čišćenja otpadnih voda kojima se iz otpadne vode uklanja najmanje 50 % suspendirane tvari, a vrijednost BPK<sub>5</sub> smanjuje barem na 20 % u odnosu na vrijednost ulazne vode, influenta. Kroz ovaj postupak dodatno se poboljšavaju ekološke karakteristike vode, smanjuje mutnoća vode te količina organskih i anorganskih tvari. Ovaj postupak je vrlo jednostavan, jer se otpadna voda zadržava u taložniku dovoljno dugo da se izdvoje određene količine neželjenih tvari iz vode. Ove izdvojene tvari idu zajedno sa muljem na daljnju obradu. Veća učinkovitost taloženja nastaje dodavanjem kemikalija (npr. vapno), ali u novije vrijeme umjesto uporabe kemikalija, sve češće se u taložnike ugrađuju sita s malim otvorima, koji omogućuju veće taloženje. Na dotoku otpadne vode prije crpne stanice postavljaju se rešetke (*Slika 1.*), kako bi se spriječilo nagomilavanje i začepljivanje u dijelovima uređaja za pročišćavanje raznim predmetima i otpadcima [1].

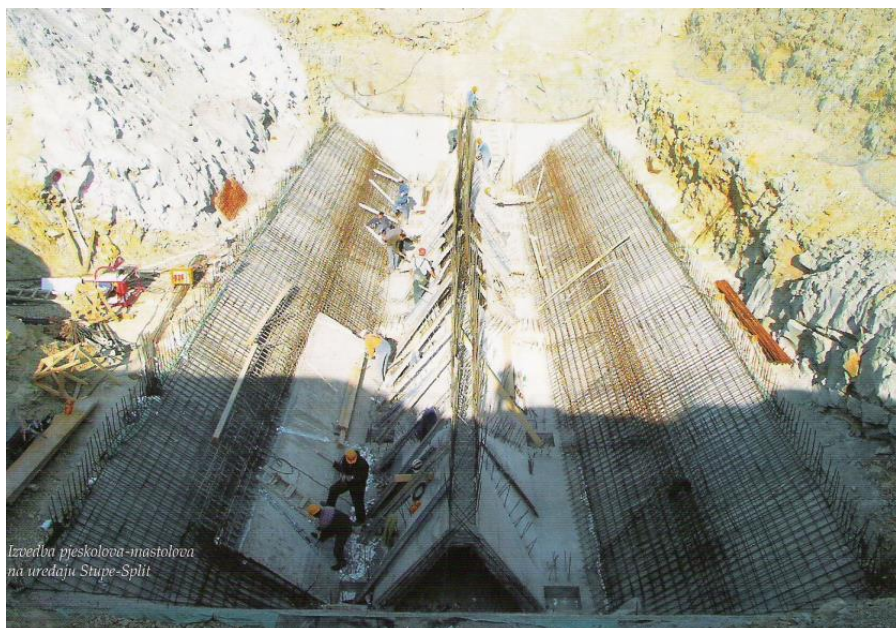


Slika 1. Grube rešetke na uređaju za pročišćivanje (Varaždin) [1]

Kroz prvi stupanj pročišćivanja otpadnih voda, uklanjaju se velike nečistoće na grubim rešetkama (cca 10 mm), zatim manje nečistoće na finim rešetkama (3-6 mm) (Slika 2.), uklanjanje pijeska i šljunka uređajem pod nazivom pjeskolov (uklanjaju pijesak, šljunak i druge krutine, anorganske tvari koje imaju veću brzinu taloženja i nisu biorazgradive. Postavljaju se na početku procesa čišćenja iza rešetki obavezno kod mješovitog sustava kanalizacije) (Slika 3.). Zatim uklanjanje masti i ulja (mastolovom, flotatorom – odvija se proces uzlaznog kretanja čestica raspršenih u vodi kojima je gustoća manja od gustoće vode, kao što su ulja, masti i ostale plivajuće nečistoće, uglavnom organskog podrijetla), uklanjanje suspendiranih tvari (primarni taložnik). Za podizanje nivoa vode zbog njenog protoka koriste se pumpe, koje su najčešće pužne. [1].



Slika 2. Fina i gruba rešetka [1]



Slika 3. Izvedba pjeskolova [1]



Pužne pumpe (Slika 4.), imaju mogućnost dizanje velikih količina vode i nisu osjetljive na oštećenja od predmeta iz otpadnih voda, a također omogućuju i unošenje kisika u sirovu otpadnu vodu u otvorenim betonskim kanalima. Pužne crpke su snažne i jednostavne konstrukcije i prenose sirovu otpadnu vodu najvećeg onečišćenja, a zbog malog broja okretaja su otporne na habanje. Neki od nedostataka su im velika površina pužnog kola koje je potrebno zaštititi od korozije [1, 3].



Slika 4. Pužne pumpe (primjer Bjelovar) [2]

Drugi stupanj pročišćavanja je primjena bioloških i/ili drugih postupaka čišćenja kojima se u otpadnim vodama smanjuje koncentracija suspendirane tvari i  $BPK_5$  influenta za 70-90 %, a koncentracija KPK (kemijska potrošnja kisika) za najmanje 75 % [1]. Zato se drugi stupanj pročišćavanja najčešće naziva i biološko pročišćavanje. Otpadne vode definiraju se kao biološki razgradive vode, pa se s toga najčešće pročišćavaju na biološkim uređajima. Osnovni proces u tom postupku je biološka oksidacija organske tvari u vodi [2].

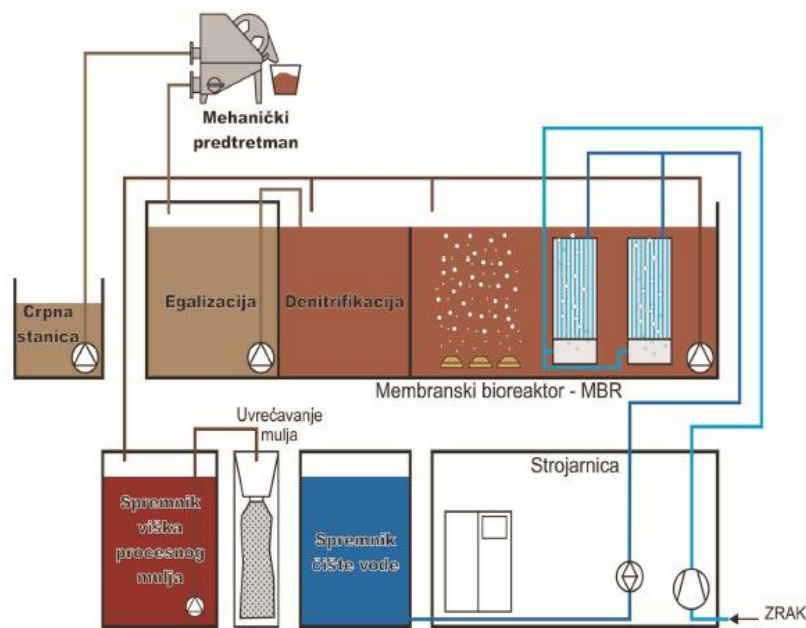
Treći stupanj pročišćavanja je primjena fizikalno-kemijskih, bioloških i dr. postupaka kojima se u otpadnim vodama smanjuje koncentracija hranjivih tvari, influenta za najmanje 80 %, odnosno uklanjaju i drugi posebni pokazatelji otpadnih voda u granicama vrijednosti koje nije moguće postići primjenom drugog stupnja čišćenja.

Kroz treći stupanj pročišćavanja iz otpadnih voda izdvajaju se neželjene količine fosfora, soli i dušika, kako bi se smanjio rizik od eutrofikacije vode. Ovaj stupanj pročišćavanja slijedi neposredno nakon biološkog pročišćavanja, posebno kada se otpadne vode ispuštaju u prijemnike koji su osjetljivi na eutrofikaciju, kao što su to jezera, zatvoreni dijelovi mora i zaljevi. Hranjive tvari (dušik i fosfor) uz povoljne uvjete u prirodnim vodama intenzivno povećavaju primarnu produkciju algi koje ugibaju, razgrađuju se aerobnim postupcima, troše kisik i degradiraju kakvoću vodu. Trećim stupnjem pročišćavanja otpadne vode bitno je ukloniti dušik i fosfor, kao i postojeće organske tvari, teške metale i otopljene anorganske tvari, što se vrši kroz treći stupanj pročišćavanja. Postupci uklanjanja hranjivih tvari mogu biti fizikalno – kemijski i biološki, a koriste se za gradske otpadne vode nakon drugog stupnja pročišćavanja ili uporedno s njim, a obavezno u predtretmanu industrijske otpadne vode prije nego se ona priključi u gradski odvodni sustav [1]. Ti procesi su sljedeći:

- Cijedenje (propuštanje tekućine i krutine kroz cjediljku – filter),
- Adsorpcija (sposobnost pojedinih tvari da privuku i odstrane pojedine molekule ili ione iz otpadne vode),
- Membranski postupci (prolaz vode kroz membranu, nepropusnu za tvari koje treba odstraniti iz vode) – *Slika 5*,
- Neutralizacija (ispravljanje pH vrijednosti dodavanjem kiselina ili lužina),
- Flokulacija (pahuljičenje- spajanje raspršenih čestica u veće pahuljice koje su taložive),
- Koagulacija (zgrušavanje, dodavanje kemijskih tvari radi bržeg taloženja),
- Kemijska precipitacija (taloženje, uklanjanje iz vode otopljenih sastojaka dodavanjem drugih otopina pomoću kojih nastaje reakcija i taloženje),
- Ionska izmjena (postupak zamjene iona između krutine i tekućine),
- Oksidacija (uklanjanje različitih sastojaka iz vode oksidacijskim sredstvima npr. klor, ozon...) [1].

Navedeni niz procesa i njihove kombinacije primjenjuju se za dodatno čišćenje biološki pročišćenih otpadnih voda. Kao najprihvatljiviji često se primjenjuju postupci prirodnog čišćenja u biološkim taložnicama: ribnjacima, lagunama, močvarama, biljnim uređajima ili cijedenje na pješčanim filtrima. Dušik se iz otpadnih voda uklanja postupkom nitrifikacije (oksidacije amonijaka od nitrata), a nakon toga procesom redukcije nitrata pretvara se u plinoviti dušik koji se ispušta u atmosferu

(denitrifikacija). Biološko uklanjanje fosfora moguće je na više načina, a svi zahtijevaju anaerobne uvjete uz potpunu odsutnost otopljenog kisika i nitrata u suspenziji aktivnog mulja i otpadne vode. Postupak s cikličkim mehaničko – biološkim pročišćavanjem poznat kao SBR postupak, također se može primijeniti za kombinirano uklanjanje fosfora i dušika, ako se za to stvore uvjeti u sustavu tj. naizmjenično uspostavljanje anaerobne, anoksične i aerobne zone [1, 2].



Slika 5. Prerada otpadnih voda membranskim bioreaktorom (MBR) [2]

### 3.2. Obrada mulja iz pročišćivača otpadnih voda

Posljedica svake ljudske aktivnosti je i stvaranje otpada, a glavni problem vezan uz tu činjenicu je da pojedine otpadne tvari znatno onečišćuju okoliš. Posljednjih godina proizvodnja otpada koje je stvorio čovjek postala je fokus svjetske pozornosti. Republika Hrvatska također ima problem odgovarajućeg zbrinjavanja otpada. Čak i kad ljudi imaju pozitivan utjecaj na okoliš, primjerice pročišćavanjem otpadnih voda, nastat će velike količine otpada. Stoga su pročišćavanje otpadnih voda i odlaganje nusproizvoda postali veliki problem u svijetu u posljednjih 15 godina. Izgradnja pročišćivača otpadnih voda rezultirala je stvaranjem velike količine mulja u procesu

pročišćavanja otpadnih voda. Nastali mulj mora se zatim tretirati na samoj opremi i tretirati u okolišu u skladu sa zakonskim propisima [5]. Mulj proizveden u postrojenju za pročišćavanje otpadnih voda je nusprodukt nakupljanja krutih tvari u fizikalnom procesu (taloženje), biološkom procesu (mikrobiološke aktivnosti) i kemijskom procesu (koagulacija). Vrlo specifičan i složen sastav samog mulja koji čini mješavina anorganskih i organskih tvari otpadne vode kao i mogućnost sadržaja patogenih mikroorganizama, virusa, toksičnih elemenata, parazita, te toksičnih spojeva poput npr. teških metala.

Količina mulja proizvedenog pročišćavanjem otpadnih voda znatno ovisi o procesu pročišćavanja ali isto tako karakteristikama otpadnih voda koje se pročišćavaju. Što je veći stupanj pročišćavanja otpadnih voda, veća je količina proizvedenog mulja. Količina svježeg mulja uvijek je manja od količina vode koja se pročišćava. Najvažnije je smanjiti masu mulja izdvajanjem što veće količine vode, kako bi njegov transport i daljnja obrada i zbrinjavanje bili ekonomski isplativi (*Slika 6.*). Obrada mulja je kompleksan proces koji ovisi o karakteristikama samog mulja i njegovoj konačnoj namjeni. Proces obrade mulja sadrži različite postupke od mljevenja mulja, prosijavanja mulja, uklanjanja šljunka (pjeskolov) i izjednačivanje sastava mulja u jednoličnu smjesu [8]. Načinom obrade pročišćivanja, razlikujemo primarni ili sirovi mulj, sekundarni ili biološki mulj, tercijarni mulj i aktivni mulj [5].

Primarni mulj je mulj odvojen nakon prve faze pročišćavanja. Primarni mulj sadrži anorganske tvari (pijesak, gline, karbonati i metalni oksidi), lako razgradive organske tvari (proteine, masti, ugljikohidrate) i organske teško razgradive tvari (razna vlakna i guma) te mikroorganizme, poput bakterija, virusa i gljivica. Gustoća primarnog mulja iznosi  $1,0 - 1,03 \text{ g/cm}^3$ . U sirovom stanju veličina čestica primarnog mulja može biti: veća od 7 mm (5 – 20%), 1 - 7 mm (9 – 33%) i manja od 1 mm (50 – 88%) od čega je oko 45 % manje od 0,2 mm [2, 6].

Sekundarni ili biološki mulj odvaja se iz biološkog reaktora aerobnim (bez kisika) ili anaerobnim (uz prisustvom kisika) postupkom. Ovaj mulj uglavnom sadrži bakterije, a njegova količina ovisi o unosu zraka, starosti mulja, vrsti uređaja, postupku pročišćavanja otpadnih voda, itd [2, 6].

Mulj nastao u trećoj fazi pročišćavanja otpadnih voda naziva se tercijarni mulj. Osim spojeva izdvojenih iz otpadne vode on sadrži i ostatke kemikalija dodane prilikom trećeg stupnja obrade [6].

Definicija aktivnog mulja bila bi da je on flokula, odnosno konglomerat živih i mrtvih bakterijskih stanica i drugih mikroorganizama te anorganskih čestica. Aktivni mulj nastaje međusobnim povezivanjem bakterija, fungi-kvasca, algi, protozoa (hrane se bakterijama) i metazoa (hrane se protozoama). Najveći udio u aktivnom mulju imaju bakterije. On nastaje kao posljedica biološkog tretmana otpadne vode u pročišćivačima, a uz adekvatnu i vrlo skupu tehnološku obradu on može biti vrlo koristan i pogodan za okoliš. Kroz posebnu obradu tehnologije stabilizacije u aktivnom mulju uništavaju se patogeni mikroorganizmi, a zadržavaju se hranjive tvari koje pogoduju primjeni u kompostiranom mulju. Takav kompostirani mulj primjenjuje se u poljoprivredi kao koristan materijal za povećavanje plodnosti zemljišta [7].

Konačna dispozicija mulja određuje i postupak prethodne obrade mulja. Način zbrinjavanja mulja ovisi o nekoliko čimbenika: stupnju i tehnologiji čišćenja otpadne vode, svojstvima otpadne vode, količini i svojstvima proizvedenog mulja, kapacitetima uređaja, zakonskim propisima, troškovima izgradnje i održavanju uređaja itd. S toga je za svaki uređaj potrebno odabrati postupak na koji će se mulj zbrinuti [2]. U praksi se primjenjuju tri osnovne faze obrade mulja iz pročišćavanja otpadnih voda, a to su :

- zgrušnjavanje
- stabilizacija
- odvodnjavanje (dehidracija)

			
1000 tona	125 tona	33 tone	15 tona
Svježi mulj (nedehidriran)	Dehidrirani mulj	Osušeni mulj	Pepeo iz ložišta dobiven spaljivanjem mulja
3% suhe tvari	24% suhe tvari	90% suhe tvari	> 99% suhe tvari

Slika 6. Oblici mulja nakon obrade mulja sa uređaja za pročišćavanje otpadnih voda – prema % uklonjene vode [5]

Postupak smanjenja volumena mulja naziva se zgušnjavanje. Njime se postiže koncentracija suhe tvari (2-12%) u mulju. To ovisi o samoj prirodi mulja i primijenjenom tehničkom rješenju. Postoje tri osnovna procesa zgušnjavanja, a to su gravitacijsko zgušnjavanje, zgušnjavanje isplivavanjem i mehaničko zgušnjavanje uz pomoć centrifuge s gravitacijskim pojasom i bubnjem koji ima mogućnost rotacije. Drugi proces je stabilizacija mulja, koji smanjuje ili uklanja raspadanje mulja (organska tvar se razgrađuje uz pomoć mikroorganizama) [2].

Metode stabilizacije mulja su sljedeće:

- biološka stabilizacija
- kemijska stabilizacija
- toplinska stabilizacija

U stabilizaciji biološkog mulja koristi se ili aerobni proces s kisikom ili anaerobni postupak bez kisika. U srednjim i većim uređajima za pročišćivanje otpadnih voda najčešće se primjenjuje anaerobna stabilizacija. To je ujedno i jedini biološki postupak u kojem se može iskoristiti energija mulja kao bioplin. Bioplin koji nastaje kao proizvod anaerobne stabilizacije sadrži 2/3 metana i 1/3 ugljičnog dioksida, a ima ogrjevnu moć od 6,63 kWh/m<sup>3</sup> plina [2].

Postupak uklanjanja vode iz mulja ili tzv. dehidracija mulja je postupak kojim se postiže koncentracija suhe tvari u mulju (25-35 %). Postoje dva načina dehidracije mulja:

- fizikalno uklanjanje vode (polja za sušenje mulja)
- mehaničko uklanjanje vode (centrifuge, vakuumske filter prese i trakaste filter prese) [2].

Za povećavanje suhe tvari u krutom mulju dodaje se vapno, komadići drveta ili piljevina, zbog boljeg omjera ugljika i dušika i povećanja suhe tvari na 40-50 %. Na taj način se smanjuju i prijevozni troškovi kad se koristi kompost od takvog mulja [5].

Uz ranije spomenuta tri osnovna postupka obrade mulja provode se i dodatne faze obrade mulja:

- homogenizacija

- kondicioniranje
- sušenje
- spaljivanje
- dezinfekcija.

Na temperaturi od 200-400 ° C, suhi mulj sa sadržajem suhe tvari od oko 90% može nastati u posebnoj peći. Zbog velike potrošnje energije ovaj se postupak rijetko koristi. Nedavno je razvijen proces koji koristi solarnu energiju za sušenje mulja do 90% suhe tvari, nazvan solarna dehidracija [5]. Obzirom na klimatske uvjete karakteristične za veći dio Republike Hrvatske ovakav postupak bi znatno smanjio potrošnju lož ulja. Kod većih uređaja za pročišćivanje otpadnih voda sve češće se predlaže termička oksidacija mulja, kako bi se mulj ne iskorišten u poljoprivredne i dr. svrhe iskoristio kao energent. Osim što se ovakvim postupkom smanjuju količine otpada, termičkom obradom mulja kroz koji se stvara otpad-pepeo u odnosu na svoj kemijski sastav i druge karakteristike može se upotrijebiti u nekim granama gospodarstva, npr. u građevinskoj industriji, u proizvodnji cementa, betona, keramike i opeke ili u gradnji u asfaltne mješavine u cestogradnji [5].

Još jedan razlog koji ide u prilog obradi otpadnog mulja u energetske svrhe je taj da je sam uređaj za pročišćavanje otpadnih voda energetski vrlo zahtjevan objekt. On se obično nalazi na kraju kanalizacijske mreže i obično ima relativno nisku nadmorsku visinu kako bi dotok do tog mjesta tekao gravitacijski. Stoga je za podizanje sadržaja kanalizacije u sustav za pročišćavanje potrebno koristiti pumpe za podizanje. Taj postupak je energetski intenzivan, a glavni su razlozi velika potrošnja energije crpki. Potrošnja energije može se poboljšati dizajniranjem odgovarajućih pumpi i postavljanjem u odgovarajući položaj. Prije svega u fazi projektiranja postupka pročišćavanja otpadnih voda potrebno je istražiti postojeći sustav cijevne mreže i cjelokupne procese uređaja za pročišćavanje otpadnih voda. Kako bi se smanjila cjelokupna razina otpadne vode koju je potrebno podići u postrojenju zbog obrade koriste se odgovarajuće pumpe. Prema volumenu pročišćavanja otpadnih voda i snazi pumpe odabire se odgovarajuća učinkovita kombinacija crpki. Za transport mulja unutar uređaja se mogu koristiti klipne, centrifugalne, membranske, peristaltičke i visokotlačne klipne pumpe. Na kraju, potrebno je obratiti pažnju na upravljanje postupkom procesa, održavanje opreme, smanjenje kapanja, skaliranje i mehaničko trošenje operativnog sustava. Kada oprema i sustavi rade u uvjetima visoke učinkovitosti smanjuje se i potrošnja energije [9].

### 3.3. Bioplin iz anaerobne digestije

Bioplin je izvor energije s velikim potencijalom. To je 100 % obnovljivi resurs i rezultat je anaerobne digestije različitih vrsta organskih tvari. Različite vrste organskog otpada iz kućanstva, poljoprivrednih i industrijskih izvora, kao i kanalizacija i stajski gnoj, mogu proizvesti bioplin. Stoga je bioplin vrlo raznolik izvor energije, a također može spriječiti nagomilavanje otpada u okolišu kao i njegovo onečišćenje. Bioplin se može pretvoriti u električnu energiju ili toplinu i gorivo. Upotreba bioplina može spriječiti ispuštanje metana u atmosferu, a poznato je da je metan jedan od stakleničkih plinova koji uništavaju ozonski omotač i uzrokuju klimatske promjene. Proizvodnja bioplina osim što znatno utječe na smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima ona na neki način i reciklira otpad, koji bi bez ovakve obrade na poslijetku onečistio okoliš završivši na odlagalištu otpada. Bioplin se dobiva iz organske tvari u četiri koraka u takozvanim digestorima za bioplin. Najekonomičniji oblik obrade je kad se digestori nalaze u blizini izvora organskog otpada, kao što su ostaci iz poljoprivrede ili su dio postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda [2].

Bioplin se prije svega sastoji od metana ( $\text{CH}_4$ ) s udjelom od 55-75 %, zatim ugljičnog dioksida ( $\text{CO}_2$ ) s udjelom od 25-45 % i drugih sastojaka u rasponu od 0-5 % kao što su vodik ( $\text{H}_2$ ), voda ( $\text{H}_2\text{O}$ ), dušik ( $\text{N}_2$ ), kisik ( $\text{O}_2$ ) i vodikov sulfid ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Najjednostavniji oblik dobivanja energije je sakupljanje i korištenje bioplina (produkta anaerobnog procesa razgradnje organskog otpada). Bioplin nastaje kao posljedica mikrobiološke razgradnje organskih tvari bez prisustva kisika (anaerobne digestije). Najčešća tehnologija dobivanja bioplina je fermentacija ljudskog i/ili životinjskog otpada u posebno građenim postrojenjima. Otpadne vode, koje sadrže organska onečišćenja pogodna za biotehnološku anaerobnu obradu, jesu komunalne vode, pogotovo ako u njih utječu otpadne vode iz prehrambene industrije. Ako sadrži velike količine štetnih plinova (sumporovodika,  $\text{CO}$ , itd.) bioplin se mora pročistiti, što podrazumijeva odstranjivanje vlage,  $\text{H}_2\text{S}$ -a i odstranjivanje  $\text{CO}$ -a. Bioplin se prije svega koristi za vlastite potrebe anaerobnog procesa u obliku toplinske i elektroenergije, s viškom za uporabu u sekundarnoj tehnologiji.



Primjena bioplina je slijedeća:

- Bioplin koji se koristi kao gorivo za zagrijavanje toplovodnih kotlova
- Bioplin kao gorivo u stacionarnim motorima s unutarnjim izgaranjem.
- Bioplin kao plinsko gorivo u mobilnom motoru [10, 11].

Bioplin je pogodan za iskorištavanje u postrojenjima, jer se dobiva iz organskog materijala koji u okolišu postoji u velikim količinama. Republika Hrvatska ima veliki potencijal u korištenju bioplina, uz pretpostavku da se on na pravi način iskoristiti. Podupiranjem i ulaganjem u bioplin Republika Hrvatska bi bila manje ovisna o skupom uvoznom plinu, a ujedno bi i podupirala domaću ekonomiju. Tek tada bi se u potpunosti ostvarilo načelo da je „naš otpad, naše bogatstvo“.

Biokemijski proces pomoću kojeg se biorazgradivi organski supstrati razgrađuju mikrobiološkim procesima bez prisustva kisika, naziva se anaerobna digestija. Kao rezultat anaerobne digestije nastaju čvrsti, tekući i plinoviti ostaci koji se koriste kao obnovljivi resursi. Bioplin iz anaerobne digestije koristi se za proizvodnju toplinske i električne energije, a čvrsti tekući ostaci nakon kompostiranja koriste se za poboljšanje kvalitete tla na poljoprivrednim površinama, jer sadrže veliku količinu korisnih sastojaka. Bioplin koji nastaje u ovom procesu sastoji se od metana i ugljičnog dioksida. On se dobiva preradom mulja kroz 4 faze:

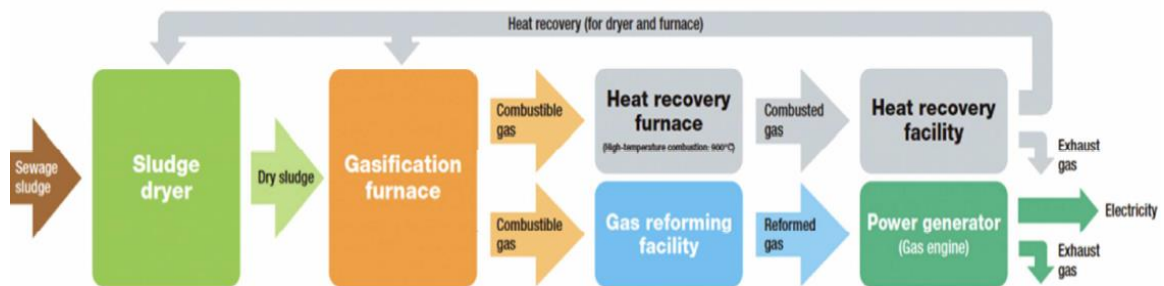
- Hidroliza je prva faza u kojoj se u vodi netopljivi organski spojevi pretvaraju u organske spojeve koji su topljivi u vodi uz pomoć staničnih enzima.
- Druga faza je zakiseljavanje kroz koju se acidofilne bakterije razlažu na molekule vodika, ugljičnog dioksida, alifatske kiseline i alkohole. U toj fazi nastaju također i male količine metilnih amina, amonijaka i sumporovodika.
- Kroz treću fazu dobivene kiseline i alkoholi rastavljaju se na vodik i ugljikov dioksid.
- Četvrta faza anaerobne digestije je faza u kojoj bakterije pretvaraju octenu kiselinu i spojeve klora zajedno s vodikom u bioplin (metan i ugljični dioksid) [2].

Energetska vrijednost bioplina u prosjeku iznosi 6 kWh/ m<sup>3</sup>. Osim spomenutog postupka dobivanja plina procesom anaerobne digestije primjenjuje se i postupak plinofikacije i pirolize.

Zagrijavanjem mulja u procesu plinofikacije proizvodi se sintetički plin, koji se može koristiti kao izvor energije u plinskoj turbini ili u bojleru kako bi se stvorila para za pokretanje parne turbine. Sintetički plin nema tako visoku energetska vrijednost kao

digestirani plin. U procesu plinifikacije vrši se dehidracija mulja. Proces plinifikacije vrši se u dvije faze, a to su piroliza, rasplinjavanje (odvija se u peći zagrijanoj na 1 200-1700 °C u odsutnosti kisika, ovim postupkom nastaje talog pretežno mineralnog sastava) i djelomično izgaranje (Slika 7.) [2].

Definicija pirolize bila bi ta, da se njome kroz odsutnost zraka pretvara mulj u plin i „char“ (crnu supstancu bogatu ugljikom). To je postupak toplinske obrade u kojem se mulj ili biomasa zagrijava pod pritiskom na temperaturi 300-500 °C uz odsutnost kisika. U tom se procesu mulj pretvara u ugljen, pepeo, vodenu paru, pirolizna ulja te zapaljive plinove. Dio krutih i plinovitih proizvoda postupka pirolize spaljuje se i koristi se kao energija grijanja. „Char“ se u drugoj fazi plinificira djelomičnim spaljivanjem uz prisutnost zraka ili kisika kako bi se proizveo sintetički plin. Nakon tog postupka ostaje „char“ koji treba zbrinuti na deponiju. Postupak plinifikacije mulja (Slika 7.) je još uvijek nedovoljno razvijen te nema značajnijih primjena u obradi mulja iz uređaja [2].



Slika 7. Proces rasplinjavanja mulja u centru za melioraciju vode Kiyose u Tokiju [2]

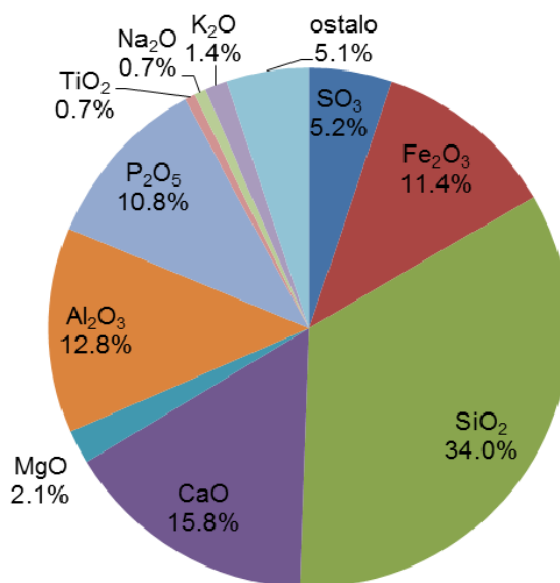
Studije provedene u državama članicama EU pokazuju da se na razini EU spaljuje 20-25% mulja proizvedenog u postrojenjima za pročišćavanje otpadnih voda. Za spaljivanje mulja koriste se različite vrste peći, poput peći s izgaranjem u vrtložnom sloju, modularnih spalionica, kao i električnih, prigušenih peći itd. Nakon spaljivanja mulja ostat će zrnasti otpad koji se može koristiti kao dodatak u proizvodnji građevinskih proizvoda, poput cementnog morta, betona, opeke i drugog materijala prilikom izgradnje cesta. Toplinska vrijednost mulja slična je onoj lignita, samo kalorična vrijednost organskog dijela mulja, dok anorganski dio nema ogrjevnu vrijednost. Zbog toga je potrebno postići da mulj dosegne razinu od 28-33% suhe tvari kako bi se izvršilo „samozagrijavanje“ bez dodavanja vanjskog goriva. Mulj se spaljuje na temperaturi 800-900 °C. Spaljivanjem otpadnog mulja nastaje praškasti materijal

veličine zrna pijeska sa malim udjelom organske tvari i vlage. Kod korištenja u proizvodnji cementnih mortova i betona potrebna je veća količina vode. U prosjeku svega 1/3 krute tvari mulja iz UPOV-a sadrži anorgansku tvar koja tijekom spaljivanja formira čestice iz pepela dobivenog spaljivanjem mulja. Godišnja proizvodnja pepela dobivenog spaljivanjem mulja - kratica: ISSA (*Tablica 1.*) na svjetskoj razini procjenjuje se na oko 1,7 mil. tona uglavnom u zemljama: SAD-a, Japana i EU [5, 11].

Glavni kemijski elementi u tako nastalom pepelu su : Silicij (Si), željezo (Fe), kalcij (Ca), fosfor (P) i aluminij (Al). Sastav ISSA (*Slika 8.*) zapravo iskazuje podrijetlo otpadnih voda te količinu i vrstu dodataka tijekom obrade [5].

Tablica 1. Udio kemijskih spojeva u strukturi ISSA [5]

Udio u ISSA [%]		
Oksid	Raspon	Srednja vrijednost
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,70 – 20,00	11,37
SiO <sub>2</sub>	17,27 – 50,60	34,00
CaO	1,93 – 31,30	15,81
MgO	1,40 – 3,22	2,11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,32 – 19,09	12,78
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,67 – 18,17	10,82
TiO <sub>2</sub>	0,29 – 1,00	0,65
Na <sub>2</sub> O	0,32 – 1,26	0,74
K <sub>2</sub> O	0,62 – 2,34	1,39



Slika 8. Srednje vrijednosti udjela pojedinog kemijskog spoja u ISSA [5]

Kemijski elementi prisutni u ISSA mogu varirati prema prirodi industrijske aktivnosti na području gdje se vrši sustav odvodnje u tim uređajima. Isto tako u sastavu se mogu naći i teški metali kao što su živa, kadmij, arsen, antimon i olovo. Tako da se o tom treba voditi računa prilikom odlaganja na odlagalištima otpada [5].

### 3.4. Zakonska regulativa zbrinjavanja otpadnog mulja u RH

Sve do nedavno u praksi izgradnje i korištenja uređaja za pročišćavanje otpadnih voda pažnja je bila usmjerena na liniju vode, odnosno na nastojanje da konačni rezultat pročišćavanja otpadnih voda tj. pročišćena voda zadovolji propisane kriterije pročišćavanja. Svo to vrijeme projektirani i izgrađeni pročistači i oni koji njima upravljaju nisu u konačnici znali gdje će se mulj kao produkt pročišćavanja odložiti i kakva bi obilježja on trebao imati te opravdava li njegovo zbrinjavanje i ekonomsku učinkovitost. U Republici Hrvatskoj se mulj još uvijek uglavnom zbrinjava na odlagalištima krutog otpada i drugim neprikladnim mjestima te metoda njegove obrade nije uvijek najadekvatnija. Kako izgradnja pročistača otpadnih voda u Republici Hrvatskoj postaje sve intenzivnija, pročišćavanje mulja će sve više opterećivati rad javno komunalnih organizacija koje se bave pročišćavanjem i odvodnjom otpadnih

voda. Problem zbrinjavanja mulja u RH nije cjelovito riješen što znači da isti nije određen smjernicama, propisima i uputama. Stručna javnost u RH je već duže vrijeme upoznata s europskim smjernicama za konačno odlaganje muljeva s pročišćivača otpadnih voda po kojima se može koristiti klasično odlaganje na uređena odlagališta. Prilikom projektiranja novih uređaja za pročišćivanje otpadnih voda treba izvršiti opsežna istraživanja i analize koje će problem odlaganja muljeva i njegovu primjenu vršiti uz zadovoljne sve norme zakonskih odredbi i propisa. U tom smislu trebaju se uzeti u obzir glavna ishodišta o mulju kao što su:

- Kemijski sastav mulja u odnosu na različite mogućnosti njegove obrade u pročišćivačima otpadnih voda
- Količina proizvedenog mulja
- Energetska vrijednost mulja
- Kakvoća mulja obzirom na mogućnost primjene u različite namjene
- Trošak odvoza stabiliziranog i dehidriranog mulja
- Mogućnost za upotrebu u poljoprivredi i industriji [2, 5].

Kako bi se donijela kvalitetna rješenja učinkovitosti i održivosti sustava zbrinjavanja mulja koji nastaje kao posljedica pročišćavanja otpadnih voda, treba postojati pravni i regulatorni prostor koji određuje način postupanja s muljem iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda, a dijele ga tri upravna sektora:

- Sektor za zaštitu okoliša,
- Sektor za gospodarenje vodama
- Sektor za gospodarenje poljoprivrednim zemljištem.

Nakon pristupa Europskoj Uniji (2013. god.), RH se obvezala do 2018. god. Izgraditi nove uređaje za pročišćivanje otpadnih voda u skladu s okvirnom direktivom o vodama Europske Unije. RH se obavezala do 2018. god. graditi sve uređaje za pročišćivanje otpadnih voda kapaciteta većeg od 10 000 ekvivalent stanovnika (ES). U slučaju korištenja UPOV-a (opterećenje 4 500 000 ES) dat će rezultat ukupne količine dehidriranog i stabiliziranog mulja oko 250 000 t/god. (160 m<sup>3</sup>/ god.). Kod odabira termičke obrade muljeva ta količina bi bila znatno manja oko 57 000 t ISSA/ god. odnosno 21 000 m<sup>3</sup> ISSA/god.

Tehničko ekonomska studija izrađena je 2013. god. u kojoj je predložena termička obrada mulja kao optimalno rješenje konačnog zbrinjavanja muljeva za veći dio RH, a izradio ju je WYG Internacional Ltd.

Zbog očuvanja okoliša i njegove održivosti u ekološkom, zdravstvenom i estetskom pogledu otpadne tvari koje se ispuštaju u okoliš moraju se prethodno obraditi da bi se mogle iskoristiti ili odložiti na neškodljiv način. Što znači da se otpadne tvari uklonjene iz otpadnih voda na uređaju UPOV-a vraćaju u prirodni okoliš. Zbog toga su doneseni odgovarajući propisi kojih se treba pridržavati pri donošenju odluke o načinu obrade i odlaganja mulja iz otpadnih voda [2].

Danas postoje mnoge odredbe i zakonske regulative donesene od strane RH za pametno zbrinjavanje i skladištenje mulja usklađeno sa regulativama u EU, a objavljujane su u Narodnim Novinama od 2007.-2015. god. Neki od donesenih Pravilnika i odredbi su:

- Kada se mulj s UPOV-a koristi u poljoprivredi, Uredbom o gospodarenju muljem s UPOV-a dopušta se korištenje najviše 1,66 tona suhog mulja po hektaru poljoprivrednog tla godišnje. U slučaju korištenja mulja u poljoprivredi, treba uzeti u obzir zahtjeve dobre poljoprivredne prakse u korištenju gnojiva iz Pravilnika. U slučaju termičke oksidacije mulja, ne postoje posebni propisi, već propisi koji se primjenjuju na spaljivanje krutog otpada, odnosno propisi doneseni u skladu s propisima o razinama onečišćivača zraka u Zakonu o zaštiti zraka [12].
- Strategija gospodarenja otpadom Republike Hrvatske navodi da se muljem upravlja u skladu s praksama i mogućnostima EU -a. U načelu se može koristiti u poljoprivredi i toplinskoj obradi [13].
- Strategija gospodarenja vodama RH koja se smatra kao buduće rješenje i vodilja za zbrinjavanje mulja s UPOV-a. Otpadni mulj iz UPOV-a razvrstan je u „Posebne kategorije otpada“. „Gospodarenje otpadnim muljem iz UPOV-a u suradnji s ministrom nadležnim za vodno gospodarstvo, propisuje ministar Pravilnikom“. Taj Pravilnik propisuje načine obrade, sakupljanja, skladištenja, transporta i kontrole mulja, ali ne i zbrinjavanje mulja. Također strategija propisuje načine iskoristivosti mulja u različite svrhe, pa tako ukida status otpada za kompost kao vrstu otpada, a koji može ulaziti u postupak uporabe proizvoda komposta klase 3 u kojem su korišteni muljevi iz komunalnih

otpadnih voda kroz postupak aerobne ili anaerobne stabilizacije muljeva. Kompost klase 3 namijenjen je upotrebi na tlima koja se ne koriste za proizvodnju hrane, ali ova vrsta komposta može se koristiti za šumsko ili parkovno zemljište ili za uređenje posljednjeg sloja odlagališta. Osim toga, sukladno posebnim kriterijima za ukidanje statusa otpada građevinskih proizvoda, ti građevinski proizvodi ulaze u proces uporabe i koriste se za proizvodnju građevinskih proizvoda od otpada sakupljača pijeska i mulja komunalnih otpadnih voda. Propisi propisuju mjere zaštite okoliša kada se mulj koristi u poljoprivredi radi sprječavanja štetnih posljedica po tlo, biljke, životinje i ljude. Mulj koji se koristi u poljoprivredi ne smije sadržavati teške metale. U poljoprivredi se može koristiti samo stabilan mulj u kojem su uništene patogene i potencijalne patogene supstance [14].

- Prema Pravilniku „Obradeni mulj“ označava mulj koji je podvrgnut biološkoj, kemijskoj ili toplinskoj obradi, dugotrajnim skladištenjem (najmanje 6. mj.) ili nekom drugom postupku kojem je znatno smanjena razgradnja i opasnost po zdravlje. Ovaj Pravilnik usklađen je sa Direktivom EU te se njime zabranjuje korištenje obrađenog mulja na određenim zemljištima, a to su: tlo na kojem postoji opasnost od ispiranja mulja u površinske vode, tlo krških polja, plitko ili skeletno tlo krša i priobalno i vodozaštitno područje. Ovo se posebno odnosi na cijelo područje južno od Karlovca gdje je isključena mogućnost korištenja u poljoprivredi [2, 12].
- Pravilnik o metodama i uvjetima termičke obrade otpada donesen je 2007. godine i ostat će na snazi do donošenja novog. Ova se Uredba primjenjuje na sva postrojenja za spaljivanje i kombinirano spaljivanje otpada, uključujući postrojenja za pirolizu otpada i postrojenja za spaljivanje otpada u svrhu proizvodnje energije. Prema osnovnoj definiciji, spaljivanje je proces sagorijevanja otpada sa ili bez korištenja topline nastale izgaranjem. „Suspacionica je svaka nepokretna ili pokretna jedinica kojoj je svrha proizvodnja energije u kojoj se otpad koristi kao redovno ili dopunsko gorivo radi konačnog zbrinjavanja.“

Direktiva EU o spaljivanju otpada iz 2000. slična je gornjim propisima i također utvrđuje granice emisije u ispušnim plinovima. Pravilnik također zabranjuje prihvatanje biorazgradivih komponenti na odlagalištima komunalnog otpada čija masa prelazi

35% ukupne mase. Ovo pravilo vrijedi za sva odlagališta od 31. prosinca 2016. godine. Budući da stabilizirani mulj sadrži više od 35% biorazgradivih tvari, ova odredba uredbe primjenjuje se i na mulj iz UPOV -a. Mulj se može tretirati na posebnom dijelu odlagališta pod posebnim okolnostima na odlagalištu prema gore navedenim propisima, samo za proizvodnju energije iz otpada s odlagališta (bioplin). Ova metoda obrade otpada bit će u skladu sa Zakonom o održivom gospodarenju otpadom [15].

Tehnologija obrade otpadnog mulja u RH se još uvijek razvija. Također i u ostalim zemljama EU problem zbrinjavanja mulja iz UPOV-a nije cjelovito riješen. Prema izvješću o tretmanu otpadnih voda u RH postoji 140 uređaja koji približno proizvode 35 000-40 000 tona suhe tvari mulja na godinu. Najveću UPOV-a na prostoru RH je u Zagrebu koji proizvodi 50 % ukupnog mulja. U novije vrijeme sve više uređaja za pročišćavanje otpadnih voda se gradi i počinje s radom kako bi se uvođenjem novih tehnologija zbrinuo mulj iz otpadnih voda [2].



## 4. UREĐAJI ZA PROČIŠĆIVANJE OTPADNIH VODA U RH I SVIJETU

Gotovo svaki veći grad na području RH posjeduje svoj UPOV. Međutim ta postrojenja su poprilično zastarjelih tehnologija, izgrađena još u prošlom stoljeću (Velika Gorica 1973. god.) i služe isključivo za pročišćavanje otpadnih voda bez korištenja tehnologije za obradu otpadnog mulja. Nakon pristupanja RH Europskoj Uniji i povlačenja sredstava EU fondova veliki broj gradova odlučio se modernizirati i investirati u vodnokomunalnu infrastrukturu.

Tako i gradovi poput Poreča, Koprivnice, Nove Gradiške, Varaždina, Zadra itd. rade na investiranju u svoje pročišćivače otpadnih voda u cilju iskoristivosti mulja kao potencijalnog energenta [5].

Grad Zagreb kao najveći i najmnogoljudniji grad RH posjeduje suvremeni uređaj za pročišćivanje otpadnih voda iz kojeg u rijeku Savu izlazi pročišćena voda. Centralni dio uređaja je bioplinsko postrojenje u kojem se proizvodi čak 70 % električne energije za potrebe tog velikog pogona na Žitnjaku. Prošle godine je u procesu pročišćavanja vode iz mulja proizvedeno oko 6 milijuna m<sup>3</sup> plina, s udjelom metana oko 60 %. Ovaj uređaj je jedini u RH koji kao sirovinu koristi primarni, i sekundarni mulj nastao obradom otpadnih voda, zato što on ima veliku kalorijsku vrijednost. Obzirom da je Zagrebački UPOV-a najveći takav uređaj u RH u njemu se i proizvodi najveća količina mulja od obrade komunalnih voda u usporedbi za čitavu RH u kojoj je proizvedeno 62, 553 t mulja, na grad Zagreb otpada 48, 614 t (*Tablica 2.*) [16].

Tablica 2. Muljevi od obrade komunalnih voda nastali u razdoblju od 2015.-2018. na UPOV-a grada Zagreba [16]

Županija	Muljevi od obrade komunalnih voda (19 08 05) s CUPOVGZ (t)	
	2015.	2018.
<b>Grad Zagreb</b>	47, 458	48,614
<b>Ukupno u RH</b>	57, 871	62, 553

Bioreaktori-digestori su primarno izrađeni od betona (*Slika 9.*), ali su obloženi srebrnim metalom u obliku stožaca i najljepša su građevina na lokaciji pročistača. Oni su zaštitni znak cijelog postrojenja koje se zahvaljujući vlastitoj proizvodnji energije može pohvaliti da postiže energetska učinkovitost te dobivenu energiju (70 %) koristi za vlastite potrebe, a viškove energije isporučuje u energetska mrežu .



Slika 9. Digestori bioplinskog postrojenja u Zagrebu [17]

Bioplinsko postrojenje u Zagrebu na uređaju za pročišćivanje otpadnih voda izgrađeno je u periodu od 2004. do 2007. god. Koncesijski partneri su Vodoprivreda Zagreb i Njemačka tvrtka WTE Wassertechnik i RWE Aqua, a pogonom rukovodi tvrtka Zagrebačke otpadne vode d.o.o. Uređaj je kapaciteta od 1,2 milijuna ekvivalent stanovnika. Uređaj se sastoji od mehaničkog i biološkog stupnja pročišćavanja te dijela za obradu mulja. Uređaj radi kontinuirano, cjelodnevno, 7 dana u tjednu, svaki dan u godini. ZOV (Tvrtka za zbrinjavanje otpadnih voda) koja upravlja spomenutim postrojenjem stekla je 2012. god. status povlaštenog proizvođača električne energije. U prošloj godini proizvedeno je 13 200 MWh električne energije tako da u satima kada postrojenje troši manje od vlastite potrebe za električnom energijom, višak proizvedene električne energije predaje se u HEP-ovu mrežu (*Slika 10.*) [17, 18].

Stabilizacija mulja dobiva se procesom anaerobne digestije pri čemu dolazi do anaerobne razgradnje muljeva anaerobnim mikroorganizmima (metanogene bakterije) na temperaturi oko 37 °C. Unutar digestora tijekom stabilizacije mulja anaerobnom

digestijom dolazi do razgradnje organske tvari i nastanka bioplina. Kako bi se uklonio višak vlage u proizvedenom bioplinu on se pročišćava preko pješčanih filtera i sakuplja se u spremnike plina iz kojih se odvodi na spaljivanje unutar kogeneracijskog postrojenja za proizvodnju toplinske i električne energije. Kogeneracijsko postrojenje sastoji se od dva plinska motora i dva plinska kotla te sustava za hlađenje plinskih motora. Plinski motori imaju pogonsku snagu 1,3 MW, oni pokreću generatore za proizvodnju električne energije, a toplinska energija koja je dobivena hlađenjem plinskih motora koristi se u procesu zagrijavanja sirovog mulja. Također plinski kotlovi su rezervni sustav grijanja, odnosno služe za dogrijavanje sirovog mulja [17, 18].



Slika 10. Spremnici za bioplin na zagrebačkom Žitnjaku [18]

Proračun kaže da se od jednog kubičnog metra plina dobiva oko 2,3 kWh električne energije, odnosno za proizvodnju 1 kWh potrebno je oko 430 litara plina [18]. U slučaju da se proizvedeni bioplin ne distribuira proizvođačima u cjelini te ako dolazi do maksimalne razine napunjenosti unutar spremnika za plin, sigurnosni uređaj koji je instaliran na spremniku automatski se pali kao plinska baklja. Na taj način se ispušta višak plina u zrak. Stabilizirani mulj koji je nastao u procesu, odvodi se na gravitacijsko zgrušnjavanje unutar zgušnjivača te se dodatno stabilizira tako da se strojno dehidrira sa živim vapnom pri čemu se uništavaju svi mikroorganizmi. Tako obrađeni mulj odlaže se na deponij sa ciljem da se spali u spalionici otpada jednom kad ona bude sagrađena.

Zanimljivo je spomenuti da se smatra da je obrada vode prljav i smrdljiv posao, no na lokaciji zagrebačkog UPOV-a i bioplinskog postrojenja nema neugodnih mirisa. Digestori ovog postrojenja međusobno su povezani mostom i na vrhu jednog nalazi se vidikovac sa pogledom na grad (*Slika 11.*) [17, 18].



Slika 11. Vrh digestora s pogledom na grad [18]

Ovdje je svakako potrebno spomenuti i uređaj za pročišćavanje otpadnih voda u gradu Beču (*Slika 12.*) koji je jedan od najsuvremenijih pročišćivača u ovom dijelu Europe. On je treći po veličini, a sastoji se od 6 spremnika za mulj visine 30 m, svaki s volumenom od 75 000 m<sup>3</sup>. Rješenje za energetske iskorištavanje mulja i sam projekt izradili su stručnjaci Tehničkog sveučilišta u Beču. Projekt je odobren još 2012. god., a počeo je s radom 2020. god. Ovo postrojenje za pročišćavanje otpadnog mulja je potpuno ekološko. Kroz postupak pročišćavanja mulja u ovom uređaju, proizvede se 78 gigavat sati električne energije godišnje što je dostatno za potrošnju struje u više od 30 000 bečkih domaćinstava. Iz otpadnog mulja u ovom uređaju (2 milijuna m<sup>3</sup>) anaerobnom digestijom nakon 25 dana koliko traje sam proces nastaje plin kojeg se proizvede 20 milijuna m<sup>3</sup> (bioplin) koristi se za plinske motore u termoelektranama. Na taj način proizvede se i toplinska energija koja se koristi za grijanje i toplu vodu [19].

Bečki UPOV učinkovitim korištenjem energije iz otpadnog mulja u potpunosti se samostalno opskrbljuje energijom od sredine 2020. godine. To je značajan podatak jer

su postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda od svih komunalnih djelatnosti najveći potrošači energije, u Beču UPOV iziskuje 1% ukupne gradske potrebe za energijom. U određenim situacijama količina proizvedene električne energije na uređaju premašuje količinu energije potrebne za rad samog pročištača te se višak električne energije usmjerava u gradsku električnu mrežu. Izgradnja ovog uređaja je od velikog značenja za Beč, jer on osim smanjenja potrošnje energije smanjuje i ekvivalent CO<sub>2</sub> za 40 000 tona godišnje [19, 20].



Slika 12. Bečko postrojenje za pročišćavanje otpadnih voda [19]

Dok je slučaj u mnogim europskim državama kao što su Španjolska, Irska, Mađarska, Francuska, Češka, upotreba mulja iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda u poljoprivredi, spaljivanje mulja primarno je u Nizozemskoj, Njemačkoj, Austriji, Belgiji i Švicarskoj, a odlaganje na odlagalištima najrašireniji je pristup ili gotovo jedini u Grčkoj i na Malti [5].

## **5. ENERGIJA IZ OTPADNE VODE DANAS I U BUDUĆNOSTI**

Unatoč resursima koje otpadne vode predstavljaju, većina razvijenih zemalja troši znatne količine energije pročišćavajući otpadne vode kako bi se mogle ispustiti bez štete po okoliš. Tako npr. SAD koristi približno 1,3 % ukupne potrošnje električne energije u uređajima za pročišćavanje otpadnih voda. Taj je postotak u urbanim područjima siromašnijih država još i veći [21].

Uobičajeno se procjenjuje da je 30 % operativnih troškova uređaja za pročišćavanje otpadnih voda predviđeno za troškove električne energije. Tijekom sljedećih 20–30 godina očekuje se da će potreba za električnom energijom u postupcima pročišćavanja otpadnih voda čak i rasti i to za ne malih 30–40 %. U vremenu u kojem postoje zabrinutosti oko iznalaženja resursa i korištenja adekvatnog goriva, povećanja troškova energije te zahtjeva za sve višim stupnjevima pročišćavanja koji pak rezultiraju povećanom potrošnjom energije, dizajn i rad uređaja za pročišćavanje otpadnih voda, sve se više usmjerava na poboljšanje učinkovitosti potrošnje električne energije i smanjenje troškova. Mjere za poboljšanje energetske učinkovitosti u prvom redu zahtijevaju znanja o tome koliko se različitih elemenata i procesa pročišćavanja koristi u postrojenju za pročišćavanje otpadnih voda. Jedan od najboljih načina za razumijevanje korištenja energije i potencijala za postizanje poboljšane učinkovitosti i upravljanja energijom je provođenje energetskeg pregleda postojećeg postrojenja. Mogu se izvršiti različite razine energetskeg pregleda kako bi se dobio realan pokazatelj stanja glavne opreme u postrojenju. Jedan od početnih zadataka pregleda je procjena najvećih operacija ili procesa koji troše energiju kao što je prozračivanje aktivnog mulja. Najveća količina potrošene električne energije odnosi se na postrojenja s aktivnim muljem s toga se trebaju razmatrati različite mjere upravljanja energijom na ovom dijelu postrojenja kako bi se moglo postići smanjenje potrošnje električne energije i troškova. Provođenje operativnih promjena ili postupci naknadne ugradnje opreme mogu smanjiti potrošnju energije i troškova. Operativne promjene mogu se izvršiti u procesu ili sustavu najčešće s malim ili nikakvim povećanjem troškova. Međutim postupci ili oprema za prenamjenu često zahtijevaju i značajne troškove za preinaku ili zamjenu postojeće opreme ili za izgradnju novih fizičkih objekata i ugradnju opreme. Potrebno je napraviti detaljne analize troškova za svaku razmatranu

promjenu kako bi se utvrdilo je li ušteda generirana promjenom opravdala kapitalni trošak promjene [22].

Otpadne vode obično se gledaju kao problem na koji je potrebno potrošiti energiju kako bi ga se riješilo, a ne kao resurs koji može doprinijeti energetskej bilanci. Ako se energija sadržana u otpadnim vodama iskoristi ne samo kako bi pomogla vodnoj industriji kako bi postala samodostatna za svoje potrebe, već može postati partner u pružanju energije mrežnim dobavljačima u dijelovima gdje postoji problem opskrbe električnom energijom. Otpadne vode sadrže uglavnom nekarakteriziranu i neobrađenu smjesu spojeva uključujući mnoge organske tvari od jednostavnih do složenijih molekula. Energija koja se može dobiti iz otpadnih voda različitim postupcima varira, to može biti plin metan iz anaerobne digestije, električna energija iz mikrobnih gorivih ćelija ili vodik u slučaju mikrobioloških stanica za elektrolizu. Na tom području provode se velika istraživanja koja do sada nisu osobito doprinijela primjeni rezultata provedenih istraživanja u obradi otpadne vode. Takva istraživanja osobito su vezana za kanadske znanstvenike Shizas-a i Bagley-a u Torontu čiji je glavni zadatak bio iskoristivost otpadnih voda za dobivanje nove energije u postupcima sušenja mulja. Također su se slične metode i materijali koristili na sjeveroistoku Engleske iz postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda iz domaćinstava. Svako istraživanje energije iz otpadnih voda trebalo bi se usredotočiti na tri vrste otpadnih voda koje imaju najveći potencijal za proizvodnju energije.

- Kanalizacija – za postojeće uređaje za pročišćavanje otpadne vode
- Otpadne vode iz stočarstva
- Industrijske otpadne vode od prerade hrane i pića [23].

Različita istraživanja od 2013. god. donose nove smjernice kako bi se otpadne vode promatrale kao nositelj energije. Važno je spomenuti da su novija istraživanja pokazala da kućanske ili sanitarne otpadne vode karakteristične po višoj temperaturi, jer se unutar zatvorenih objekata, zgrada 60% ukupne količine vode zagrijava (tuševima, kadama, sudoperima, perilicama), a ta toplina je izgubljena u kanalizacijskom sustavu, no mogla bi se iskoristiti kao nosač topline. Ta toplina može se ponovno koristiti za proizvodnju čiste i regenerirane toplinske energije putem izmjenjivača topline i dizalice topline za klimatizaciju i grijanje zgrada. Postoje rezultati istraživanja provedenog u Bologni u

Italiji kroz vremenski period od 6 mjeseci, kroz koji je utvrđeno da je temperatura otpadnih voda u kanalizacijskom sustavu varijabilna u rasponu od 0,90 do 1,05. Budući da se toplina otpadnih voda gotovo nikad ne uzima u obzir, postoji vrlo malo statističkih podataka o temperaturi otpadnih voda. Za prikupljanje takvih podataka analizirani su i praćeni kanalizacijski sustavi grada Bologne. Praćnja su pokazala da je temperatura otpadnih voda zimi 11 – 16 °C što je više od temperature zraka dok je minimalna temperatura otpadnih voda zabilježena između kraja prosinca i početka siječnja kada temperatura zraka padne na vrijednost oko 2,5 °C, dok je temperatura otpadnih voda uvijek iznad 11 °C. U razdoblju manje potrošnje vode (noću), temperature su za 2-4 °C niže nego danju. Varijacije također mogu biti i tijekom tjedna, ali se one kreću 10-14 °C zimi, oko 14-18 °C u proljeće i jesen i oko 18-22 °C ljeti. Osim u Bologni slična istraživanja provela su se i u Kanadi, Švicarskoj i Kini. No nažalost primjenjivost ovakve metode dobivanja energije iz sanitarne otpadne vode još uvijek je velika rijetkost te se gotovo ne primjenjuje, ali je pokazatelj za buduća projektiranja i inovacije u pogledu zelene energije budućnosti [24]. Mnogi znanstvenici kao što su Frijns, Nowak, Kind i Levy smatraju da je pronalaženje dodatnih izvora obnovljive energije kontinuirani proces, stoga otpadne vode privlače profesionalni interes, jer se mogu smatrati neiscrpivim resursom trajne dostupnosti. Obradom mulja iz otpadnih voda može se doprinijeti energetske neovisnosti u pojedinim zemljama, tako su istraživanja u Švicarskoj pokazala da potrošnja električne energije može biti smanjena za 40 % ukoliko se primjenjuje obrada otpadnih voda iz UPOV-a [23].

Njemačko Savezno ministarstvo obrazovanja i istraživanja pokrenulo je veliki program financiranja od 2013. – 2017. god. koji se bavi tehnologijama usmjerenima na budućnost kroz upravljanje vodom s energetske učinkovitošću i uštedom resursa. Tim se programima pokazuje da je korištenje otpadnih voda više usmjereno na proizvodnju električne energije, a manje na toplinsku energiju. Ovaj zaključak proizlazi iz razloga što se još uvijek u sklopu objekta za pročišćavanje otpadnih voda ne nalaze postrojenja ili instalacije koje bi mogle proizvoditi toplinu, već su one, ako jesu, postavljene u spalionicama koje u pravilu nisu na istom mjestu pa iz tog razloga UPOV ne čini cjelovit proizvodni proces. No, njemački znanstvenik Schmid izvještava o mogućnostima primjene oko 500 cjelovitih postrojenja diljem svijeta, a može se očekivati da će ova brojka rasti jer sve više zemalja uključuje toplinsku upotrebu otpadnih voda u svoje energetske politike [23].



Sadržaj viška toplinske energije u otpadnim vodama je značajan, ali još uvijek nedovoljno iskorišten. Važna je činjenica da postoji sve veća osviještenost šire javnosti o korištenju obnovljivih izvora energije, tako i energije dobivene pročišćivanjem otpadnih voda. Zbog još uvijek vrlo male količine dobivene energije i starosti postrojenja vezan je i problem ekonomske isplativosti korištenja obnovljivih izvora energije. Međutim obnovljivi izvori energije kao i sada tako i u budućnosti nemaju alternativu. Korištenje i razvoj obnovljivih izvora energije dugoročno doprinosi:

- Normalizaciji proizvodnje energije i sigurnosti opskrbe
- smanjenju upotrebe fosilnih goriva i njihov negativan utjecaj na okoliš
- poticanju razvitka novih tehnologija i razvoj gospodarstva u cjelini
- smanjuju ovisnost o uvozu energenata
- povećavaju konkurentnost kroz razvoj poduzetništva, a time i otvaranja novih radnih mjesta [25].

Dostupnost čistih obnovljivih goriva dobro je prepoznato kao temelj održivog gospodarskog rasta, korištenjem otpadnih voda kao obnovljivog izvora energije, do danas se slabo iskorištavalo, pogotovo u zemljama u razvoju poput Republike Južne Afrike. Otpadne vode kao obnovljivi izvor energije, dragocjene su kao dopuna ili zamjena neobnovljivih izvora, jer smanjuju ekološko opterećenje, konvencionalne proizvodnje električne energije i pružaju dodatnu prednost poboljšane obrade otpada. Preporuke međunarodne zajednice važne su za sektor istraživanja i razvoja u vezi s energijom za oporabu iz otpadnih voda. Također se nastoji pružiti informacija o uputama koje bi bile korisne istraživačkoj zajednici Južne Afrike utvrđivanjem područja u kojima su potrebna istraživanja i razvoj te isticanjem područja na kojem bi se moglo usmjeriti investiranje u budućnosti [26].

Dok je ranije Južna Afrika kao glavni energent koristila ugljen u različitim industrijskim postrojenjima koja su veliki potrošači energije, a time i veliki onečišćivači okoliša danas se Južna Afrika okreće obnovljivim izvorima energije. Prijašnje južnoafričke vlade predviđale su gradnju čak 9 novih nuklearnih reaktora ukupne snage 9 600 MW. No, Južna Afrika je ipak odbacila prijedloge o povećanju udjela nuklearnih elektrana i umjesto toga će se u skladu sa strategijom napuštanja ugljena kao dominantnog resursa u proizvodnji električne energije okrenuti primjeni obnovljivih izvora. Zbog toga se

sada predviđa gradnja vjetroelektrana i plinskih elektrana, kao i sunčanih elektrana. Očekuje se da bi se upravo takav plan mogao ostvariti do 2030. god. Također se očekuje da će udio elektrana iz obnovljivih izvora činiti više od 30 % ukupnog broja te je takav prijedlog prihvatilo Ministarstvo energetike, Nacionalni energetska regulator Južne Afrike. Očekuje se da bi taj plan mogao privući čak 100 milijardi dolara inozemnih ulaganja. Za tako velika ulaganja potrebna su nova istraživanja i inovacije kako bi se utvrdila područja u kojima mogu postojati tehnički problemi u primjeni kapaciteta za pročišćavanje otpadnih voda [26].

Dostupnost čistih obnovljivih goriva prepoznata je kao srž održivog gospodarskog rasta. Korištenje otpadnih voda kao obnovljivih izvora energije do danas se slabo iskorištavalo posebice u zemljama u razvoju poput Južne Afrike. Otpadne vode kao obnovljivi izvor energije dragocjene su kao dopuna ili zamjena neobnovljivih izvora, smanjuju ekološko opterećenje, konvencionalne proizvodnje električne energije i pružaju dodatnu prednost poboljšanje obrade otpada.

Istraživanje potencijala za energiju iz otpadnih voda u Južnoj Africi poslužilo je utvrđivanju vrste izvedivog projekta koji će pokazati koje čimbenike treba uzeti u obzir u korištenju energije otpadnih voda. Studije koje su do sada provedene trebale bi istraživačkoj zajednici pružiti informacije i upute na koja područja bi se usmjerilo financiranje u budućnosti. Nerijetko se događa da uspjeh u provedbi planiranih procesa izostane zbog glomaznih regulatornih pitanja koja donosi država kao npr. u postrojenju za pročišćavanje otpadnih voda Cape Flats u Cape Townu (*Slika 13*). Tamo se bioplin generira na samoj lokaciji pročištača i koristi za sušenje mulja na pelete. Te se pelete dalje mogu koristiti kao gorivo za proizvodnju energije.



Slika 13. Nadogradnja uređaja za obradu otpadne vode u Cape Townu [27]

Međutim politika ne dopušta sekundarnu industriju koja donosi prihode u državnim operacijama, jer ta sekundarna industrija donosi financijsku korist. Također nedostaje ljudskih kapaciteta i ozbiljan je nedostatak vještina u sektoru obrade otpadnih voda. Stoga je potrebna politika za potporu u stjecanju vještina i kvalifikacija s ciljem razvoja nacionalnog kapaciteta za primjenu novih tehnologija u energetsom oporavku. Vlada treba dati jasnu prednost u usmjeravanju na obnovljive izvore kroz politiku i zakonodavstvo. Na taj način dala bi poticaje za nova ulaganja u inovativna rješenja pročišćivanja otpadnih voda za dobivanje energije [26].

## 6. ZAKLJUČAK

U svijetu s ograničenim prirodnim resursima i velikim potrebama za energijom postaje sve važnije razumjeti mehanizme koji degradiraju energiju i resurse te razviti sustavne pristupe za poboljšanje sustava, a time i smanjenje negativnog utjecaja po okoliš. Otpadne vode do sada su u većini slučajeva razmatrane kao problem onečišćenja okoliša bez mogućnosti da ga se izbjegne. U ovom radu predstavljene su neke od mogućnosti korištenja otpadne vode kao energetske resursa i to na dva načina: korištenjem topline iz otpadne vode u kanalizacijskim sustavima te energetska uporaba mulja nastalog pročišćavanjem otpadnih voda.

Postupak pročišćavanja otpadnih voda je proces u kojem se fizikalnim, biološkim i kemijskim metodama iz otpadne vode izdvajaju štetne tvari kako bi na krajnjem dijelu kanalizacijskog sustava efluent zadovoljio potrebnu kvalitetu vode pri ispuštanju u određeni vodeni prijemnik, najčešće prirodni vodotok. Pročišćavanje otpadnih voda je poseban proizvodni postupak, pa se teorija zelene proizvodnje može primijeniti i na sustav za pročišćavanje otpadnih voda. Čista proizvodnja u sustavu za pročišćavanje otpadnih voda uključuje uštedu energije, topline i raznih kemikalija koje se koriste u proizvodnom procesu, smanjenje emisije stakleničkih plinova poput metana, ugljičnog dioksida i dušikovog oksida, smanjenje količine nastalog mulja i poboljšanja njegovih karakteristika te mogućnosti ponovne upotrebe mulja.

Iz tog razloga čista proizvodnja u suvremenim uređajima za pročišćavanje otpadnih voda koja obuhvaća obradu nastalog mulja u energetske svrhe, znatno utječe na smanjenje potrošnje energije te na proizvodnju iste, što doprinosi ekološkoj i ekonomskoj održivosti postupka pročišćavanja otpadne vode. Danas je u svijetu, a posebice u državama EU-a još uvijek mali broj samoodrživih uređaja za pročišćavanje otpadnih voda iako je do 2050. god. na razini EU postavljen dugoročni cilj kojim bi smanjile emisije stakleničkih plinova za 80-95% ispod razine iz 1990. god. primjenom ove metode pročišćavanja. Mulj kao potencijalni energent iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda ima potencijal široke primjene, kako za dobivanje toplinske i električne energije tako i za opskrbu čitavog uređaja za pročišćavanje otpadnih voda. Prema Strategiji energetske razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu [28] teži se korištenju različitih izvora topline sa što je moguće većim udjelom

obnovljivih izvora u koje je uračunata energija biomase te dizalice topline. Slijedom toga, korištenjem topline otpadnih voda kao i mulja iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda povećao bi se udio obnovljivih izvora energije u ukupnoj potrošnji energije te zadovoljila težnja iz spomenute Strategije. Hrvatska ima potencijala u razvoju takvih energetske sustava, ali to zahtijeva značajna financijska sredstva.

Tehnologiji ekološkog inženjerskog pročišćavanja otpadnih voda posvećuje se sve veća pažnja u izgradnji i primjeni malih i srednjih pročišćivača otpadnih voda u manjim i većim gradovima uz punu učinkovitost budućih postrojenja i višestruku korist. Istraživanja koja se trenutno provode svjedoče o još brojnim mogućnostima unapređenja spomenute tehnologije za još veću učinkovitost. Potrebno je prepoznati njenu vrijednost i uložiti dodatna financijska sredstva u istraživanja i primjenu.

## 7. POPIS LITERATURE

- [1] Tušar, B. (2009): Pročišćavanje otpadnih voda. Zagreb. Kiegen. 190 str.
- [2] Banić I. (2017.) „Obrada i zbrinjavanje mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda“ Završni rad, Istarsko veleučilište, Pula. Dostupno na:  
<https://zir.nsk.hr/islandora/object/politehnikapu:100/preview>. Datum pristupa: 11.06.2021. god.
- [3] Sustav odvodnje. Dostupno na:  
<http://www.grad.hr/nastava/hidrotehnika/gf/odvodnja/vjezbe/Projektiranje%20sustava%20odvodnje%20-%20za%20web2.pdf>. Datum pristupa: 11.06.2021. god.
- [4] Šeremet D. (2016.) „Mogućnosti zbrinjavanja viška aktivnog mulja iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda“, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Prehrambeno – biotehnološki fakultet. Dostupno na:  
<https://www.google.com/search?q=Mogu%C4%87nosti+zbrinjavanja+vi%C5%A1ka+aktivnog+mulja+iz+ure%C4%91aja+za+pro%C4%8Di%C5%A1%C4%87avanje+otpadnih+voda&oq=Mogu%C4%87nosti+zbrinjavanja+vi%C5%A1ka+aktivnog+mulja+iz+ure%C4%91aja+za+pro%C4%8Di%C5%A1%C4%87avanje+otpadnih+voda&aqs=chrome..69i57.841j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8> Datum pristupa: 12.06.2021.god.
- [5] Vouk, D., Nakić, D., Štirmer, N., Serdar, M. „Korištenje mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda u betonskoj industriji“, ITG d.o.o. Zagreb, 2015. g. Dostupno na: [http://www.grad.hr/rescue/materijali/1-radionica/PRIRUCNIK\\_Koristenje-mulja-s-UPOV-u-betonskoj-industriji.pdf](http://www.grad.hr/rescue/materijali/1-radionica/PRIRUCNIK_Koristenje-mulja-s-UPOV-u-betonskoj-industriji.pdf) Datum pristupa: 12. 06. 2021. god.
- [6] Čavrag M. (2015.) „Obrada i zbrinjavanje mulja s pročišćavača otpadnih voda“, Završni rad, Međimursko veleučilište u Čakovcu. Dostupno na:  
<https://repositorij.mev.hr/islandora/object/mev%3A271/datastream/PDF/view>. Datum pristupa: 12.06.2021. god.
- [7] Aktivni mulj. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/82658>. Datum pregleda: 25. 06.2021. god.

[8] Kuzik M. (2017.) „Usporedba kvaliteta otpadnih muljeva s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda“, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet. Dostupno na: <https://repozitorij.gfv.unizg.hr/islandora/object/gfv%3A276/datastream/PDF/view>. Datum pristupa: 20.6.2021. god.

[9] Guo Z., Sun Y., Pan S. Y., Chiang P. „Integration of Green Energy ana Advanced Energy – Efficient Technologies for Muncipal Wasterwater Treatment Plants“, Taiwan 2019.god. Dostupno na: [https://www.researchgate.net/publication/332338946\\_Integration\\_of\\_Green\\_Energy\\_and\\_Advanced\\_Energy-Efficient\\_Technologies\\_for\\_Municipal\\_Wastewater\\_Treatment\\_Plants](https://www.researchgate.net/publication/332338946_Integration_of_Green_Energy_and_Advanced_Energy-Efficient_Technologies_for_Municipal_Wastewater_Treatment_Plants), datum pristupa: 10.06.2021. god.

[10] Vuleta G. (2021.) „Bioplin i prednosti obnovljivih izvora energije“ Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb. Dostupno na: [http://www.powerlab.fsb.hr/neven/pdf/supervision\\_of\\_msc\\_eq\\_thesis/24\\_05\\_2012\\_diplomski\\_Goran\\_Vuleta.pdf](http://www.powerlab.fsb.hr/neven/pdf/supervision_of_msc_eq_thesis/24_05_2012_diplomski_Goran_Vuleta.pdf) Datum pristupa: 15.6.2021. god.

[11] Bioplin i deponijski plin. Dostupno na: <https://rudar.rgn.hr/~dkarasal/NIDS/GOSPODARENJE%20PLINOVIMA%202/Bioplin%20i%20deponijski%20plin.pdf> Datum pristupa: 15.6.2021. god.

[12] Pravilnik o gospodarenju muljem iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda kada se mulj koristi u poljoprivredi, Zagreb: NN 38/08

[13] Odluka o donošenju Plana gospodarenja otpadom Republike Hrvatske za razdoblje 2017. - 2022. godine, Zagreb: NN 3/2007

[14] Strategija gospodarenja vodama RH koja se smatra kao buduće rješenje i vodilja za zbrinjavanje mulja. Zagreb: NN 91/2008

[15] Pravilnik o termičkoj obradi otpada, Zagreb: NN 75/2016

[16] Nastavni materijal za kolegij Pročišćavanje otpadnih voda na Gfv, doc.dr.sc. Siniša Širac, dipl.ing.kem.

- [17] Pročistač otpadnih voda grada Zagreba. Dostupno na: <https://www.zagreb.hr/procistac-otpadnih-voda/160486> Datum pristupa: 25.06.2021.god.
- [18] Od otpadnih voda do bioplina. Dostupno na: <http://www.energetika-net.com/specijali/posjetili-smo/od-otpadnih-voda-do-bioplina-18941> Datum pristupa: 25.6.2021.god.
- [19] Bečki pročistač vode. Dostupno na: <https://www.ekovjesnik.hr/clanak/2973/becki-procistac-vode-proizvodi-energiju-iz-otpadnog-mulja>. Datum pristupa: 25.06.2021. god.
- [20] Bečki pročistač vode postaje energetska autarkična. Dostupno na: <http://www.energetika-net.com/vijesti/instalacije-termotehnika-i-voda/becki-procistac-vode-postaje-energetski-autarkican-29293> Datum pristupa: 25.06.2021. god.
- [21] E. S. Heidrich, T. P. Curtis, J. Dolfing, „Determination of the Internal Chemical Energy of Wasterwater“ U.K., 2010. god. Dostupno na: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es103058w> , datum pristupa: 10.06.2021. god.
- [22] G. Tchobanoglous, F. L. Burton, H. D. Stensel (2002.) „Issues Related to Treatment-Plant Performance: Energy Efficiency in Wasterwater Treatment“ WASTEWATER ENGINEERING Treatment ana Reuse, Metcalf & Eddy, 1704-1708 str.
- [23] R. Kollmann, G. Neugebauer, F. Kretchmer, B. Truger, H. Kindermann, G. Stoeglehner, T. Ertl, M. Narodslawsky, „Renewable energy from wastewater - Practical aspects of integrating a wastewater treatment plant into local energy supply concepts“ Graz, Austrija, 2017. god. Dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652616313415> , datum pristupa: 10. 06. 2021. god.
- [24] S. S. Cipolla, M. Maglionico, „Heat recovery from urban wasterwater: analysis of the variability of flow rate and temperature in the sewer of Bologna, Italy“ Bologna, Italy, 2014. god. Dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214000320> , datum pristupa: 1.9.2021. god.
- [25] A. S. Stillwell, D. C. Hoppock, M. E. Webber, „Energy Recovery from Wasterwater Treatment Plants in the United States: A Case Study of the Energy-Water



Nexus“, USA, 2010.god. Dostupno na: <https://www.mdpi.com/2071-1050/2/4/945>, datum pristupa: 10.06.2021. god.

[26] S Burton, B Cohen, S Harrison, S Pather-Elias, W Stafford, R van Hille & H von Blottnitz, „ENERGY FROM WASTEWATER– A FEASIBILITY STUDY“, University of Cape Town, 2019.god. Dostupno na: <http://www.wrc.org.za/wp-content/uploads/mdocs/TT%20400-09%20Municipal%20Wastewater%20Management.pdf> , datum pristupa: 10.06.2021.god.

[27] Upgrades to Cape Flats WWTW Sludge Handling Facility, Cape Town. Environmental Management Programme. Dostupno na: <https://docs.srk.co.za/sites/default/files/images-20181122/South Africa/Public Documents/Cape Flats WWTW Sludge Handling Facility/Appendices/24 Appendix W Environmental Management Programme.pdf> Datum pristupa: 12.08.2021.

[28] Strategija energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu (NN 25/2020)

## 8. POPIS SLIKA

Slika 1. Grube rešetke na uređaju za pročišćivanje (Varaždin) [1]

Slika 2. Fina i gruba rešetka [1]

Slika 3. Izvedba pjeskolova [1]

Slika 4. Pužne pumpe (primjer Bjelovar) [2]

Slika 5. Prerada otpadnih voda membranskim bioreaktorom (MBR) [2]

Slika 6. Oblici mulja nakon obrade mulja sa uređaja za pročišćavanje otpadnih voda – prema % uklonjene vode [5]

Slika 7. Proces rasplinjavanja mulja u centru za melioraciju vode Kiyose u Tokiju [2]

Slika 8. Srednje vrijednosti udjela pojedinog kemijskog spoja u ISSA [5]

Slika 9. Digestori bioplinskog postrojenja u Zagrebu [16]

Slika 10. Spremnici za bioplin na zagrebačkom Žitnjaku [17]

Slika 11. Vrh digestora s pogledom na grad [17]

Slika 12. Bečko postrojenje za pročišćivanje otpadnih voda [18]

Slika 13. Nadogradnja uređaja za obradu otpadne vode u Cape Townu [26]

## **9. POPIS TABLICA**

Tablica 1. Udio kemijskih spojeva u strukturi ISSA [5]

Tablica 2. Muljevi od obrade komunalnih voda nastali u razdoblju od 2015.-2018. na UPOV-a grada Zagreba [16]

## **10. POPIS I OBJAŠNENJE KRATICA KORIŠTENIH U RADU**

BPK<sub>5</sub> – Petodnevna biokemijska potrošnja kisika

ES – Ekvivalent stanovnika

ISSA – (eng. Incinerated sewage sludge ash) – pepeo dobiven spaljivanjem mulja

KPK – Kemijska potrošnja kisika

MBR – Membranski bioreaktor

SBR – Tehnologija sekvencijalnih šaržnih reaktora

UPOV – Uređaj za pročišćavanje otpadnih voda