

SUŠENJE OTPADNOG MULJA IZ POSTROJENJA OBRADE OTPADNIH VODA UPOTREBOM SOLARNE ENERGIJE

Karas, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac
University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:699717>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-27**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied
Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

STROJARSKI ODJEL

STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

IVAN KARAS

**SUŠENJE OTPADNOG MULJA IZ
POSTROJENJA OBRADJE OTPADNIH
VODA UPOTREBOM SOLARNE ENERGIJE**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2025.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

STROJARSKI ODJEL

STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

IVAN KARAS

**SUŠENJE OTPADNOG MULJA IZ
POSTROJENJA OBRADNE OTPADNIH
VODA UPOTREBOM SOLARNE ENERGIJE**

ZAVRŠNI RAD

Mentor: dr.sc Nenad Mustapić

Karlovac, 2025.



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Klasa:
602-07/ __-01/ __

Ur.broj:
2133-61-04- __-01

ZADATAK ZAVRŠNOG / DIPLOMSKOG RADA

Datum:

* Ime i prezime	Ivan Karas		
OIB / JMBG			
Adresa			
Tel. / Mob./e-mail			
Matični broj studenta			
JMBAG			
Studij (staviti znak X ispred odgovarajućeg studija)	<input checked="" type="checkbox"/> preddiplomski	<input type="checkbox"/> specijalistički diplomski	
Naziv studija	Proizvodno Strojarsvo		
Godina upisa	2019		
Datum podnošenja molbe	18.02.2025.		
Vlastoručni potpis studenta/studentice			

Naslov teme na hrvatskom:

SUŠENJE OTPADNOG MULJA IZ POSTROJENJA OBRADJE OTPADNIH VODA
UPOTREBOM SOLARNE ENERGIJE

Naslov teme na engleskom:

SEWAGE SLUDGE DRYING FROM WASTEWATER TREATMENT PLANTS USING
SOLAR ENERGY

Opis zadatka završnog rada

U uvodnom dijelu završnog rada potrebno je opisati osnovne karakteristike otpadnih voda, načine njihovog prikupljanja, te opisati osnovne procese njihove obrade.

U poglavlju Teoretske osnove opisati različite tehnologije obrade i sušenja otpadnog mulja. Detaljno opisati postupak solarnog isušivanja otpadnog mulja iz obrade otpad voda.

Zadatak završnog rada: Na realnom primjeru grada od 60000 stanovnika dimenzionirati sustav sušenja mulja iz postrojenja za obradu otpadnih voda koji se zasniva na upotrebi solarne energije. Koristeći dostupne ulazne podatke potrebno je dimenzionirati navedeni sustav, te navesti kriterije po kojima su odabrane i dimenzionirane komponente takvog sustava, te navedeno potvrditi izračunom. Završno provesti osnovnu analizu sustava termičke oporabe osušenog mulja.

Rad izraditi i uvezati u skladu s Pravilnikom o završnim radovima Veleučilišta u Karlovcu.

Mentor: Nenad Mustapić, dr. sc.

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

IZJAVA

Izjavljujem da sam ja, Ivan Karas, ovaj rad izradio samostalno pomoću stečenog znanja tijekom studija i navedene literature.

Zahvaljujem se svojoj mentoru, na pomoći tijekom izrade ovog završnog rada.

Ivan Karas

Naslov: **SUŠENJE OTPADNOG MULJA IZ POSTROJENJA OBRADE
OTPADNIH VODA UPOTREBOM SOLARNE ENERGIJE**

SAŽETAK

Ovaj završni rad istražuje suvremene tehnologije za odvajanje nečistoća i njihovu primjenu, uz detaljno dimenzioniranje i analizu pročišćivača na primjeru grada s populacijom od 60.000 stanovnika. Rad obuhvaća pregled i karakteristike otpadnih voda, uključujući povijesni razvoj njihovog zbrinjavanja te procese koji se danas koriste za održavanje i obnovu tih resursa. Posebna pažnja posvećena je izazovima koji se javljaju tijekom procesa pročišćavanja, s naglaskom na tehnološku iskoristivost i mogućnosti primjene u sustavima za zbrinjavanje otpadnog mulja te njegovu daljnju uporabu.

Praktični dio rada fokusira se na analizu i osmišljavanje rješenja za sustave zbrinjavanja, uključujući konstrukcijske aspekte i procese odlaganja, temeljeno na stvarnom primjeru. Na temelju dobivenih podataka, definiran je optimalni sustav za isušivanje otpadnog mulja, kao i specifikacija crpki potrebnih za njegov prijenos. Rezultati istraživanja pružaju uvid u tehnološki učinkovit i održiv sustav upravljanja otpadnim vodama.

Ključne riječi: Otpadne vode, tehnologije odvajanja otpadnih voda, tehnologije separacije nečistoća, mulj, sustav za isušivanje mulja, crpke za mulj

Title: **DRYING OF WASTE SLUDGE FROM WASTEWATER TREATMENT PLANT USING SOLAR ENERGY**

SUMMARY

This thesis explores modern technologies for impurity separation and their application, with detailed dimensioning and analysis of a wastewater treatment plant for a city with a population of 60,000. The study encompasses an overview of wastewater characteristics, including the historical development of its management and the processes currently employed for maintenance and restoration. Special emphasis is placed on the challenges encountered during the purification process, focusing on technological efficiency and the potential for application in sludge management systems and its further utilization.

The practical part of the thesis centers on the analysis and development of solutions for waste management systems, including construction aspects and disposal processes, based on a real-life example. Based on the obtained data, the optimal system for sludge dewatering and the specification of pumps required for its transfer have been defined. The research results provide insights into a technologically efficient and sustainable wastewater management system.

Keywords: Wastewater, wastewater separation technologies, impurity separation technologies, sludge, sludge dehydradion system, sludege pumps

SADRŽAJ

SAŽETAK	1
SUMMARY	2
POPIS SLIKA	5
POPIS TABLICA	7
POPIS OZNAKA	8
1. UVOD.....	1
2. TEORETSKE OSNOVE	2
2.1. Oblici tretiranja otpadnih voda	2
2.2. Svrha, pregled i karakteristike otpadnih voda.....	5
2.3. Povijest razvoja i vrste kanalizacijskih sustava	8
2.4. Vrste procesa obrade otpadnih voda	10
2.4.1. Nisko tehnološki, ekstenzivni ili prirodni procesi obrade otpadnih voda	11
2.4.2. Visokotehnološki, intenzivni ili mehanički procesi.....	13
2.5. Aspekti konstrukcije sustava za zbrinjavanje otpadnih voda	14
2.6. Obrada industrijskih otpadnih voda	17
2.8.1. Konstrukcijski aspekti sekundarnih procesa obrade.....	17
2.8.2. Uklanjanje suvišnih bioloških nutrijenata	22
2.8.3. Uklanjanje suvišnog dušika	23
2.8.4. Uklanjanje suvišnog fosfora	24
2.8.5. Tretmani otpadnih voda za prevenciju mikro zagađivača	25
2.7. Obrada i odlaganje otpadnog mulja	26
2.8. Procesi zbrinjavanja otpadnog mulja	29
2.9. Alternativni načini sušenja mulja.....	35
2.10. Zakonska regulativa	42
2.11. Buduće tehnologije.....	46
3. POSTAVKA ZADATKA	47
4. RAZRADA ZADATKA - PRAKTIČNI DIO	48
4.1. Solarno sušenje mulja	48
4.2. Tehničke karakteristike postrojenja.....	49
4.3. Dimenzije postrojenja za solarno sušenje mulja.....	55
4.4. Sustav grijanja i ventilacije za isušivanje proizvoda	58

4.5. Dimenzioniranje i izbor pumpe za prepumpavanje mulja	60
5. Analiza rezultata.....	63
6. ZAKLJUČAK	64
LITERATURA	66

POPIS SLIKA

Slika 1. Kombinirani kanalizacijski sistem [1]	2
Slika 2. Primarna obrada otpadnih voda grubim odvajanjem [3]	3
Slika 3. Bazen za biološko smanjenje sadržaja količine organske tvari [3]	4
Slika 4. Neadekvatan kanalizacijski sustav [4]	7
Slika 5. Tretman otpadnih voda u razvijenim zemljama [5]	7
Slika 6. Primjeri sanitarnih sustava u dolini rijeke Ind [6].....	8
Slika 7. Cloaca Maxima u Rimu [7].....	9
Slika 8. Presjek većeg kanalizacijskog sustava u Rimu i Konstantinopolu [8]	9
Slika 9. Vizualni prikaz, prikupljanja, obrade i ponovne sekundarne upotrebe otpadnih voda [2]	11
Slika 10. Biološki aerobni bazeni [13].....	12
Slika 11. Simbolički prikaz elektrane na metan [13]	16
Slika 12. Prikupljanje sasušenog otpadnog mulja [14]	16
Slika 13. Popriječeni presjek bazena za primarni tretman otpadnih voda [15]	19
Slika 14. Poprečni presjek bazena za aeraciju kod sekundarne obrade otpadnih voda [16]	20
Slika 15. Prikaz postrojenja za obradu otpadnih voda sa odvozom mulja [17]	27
Slika 16. Isušeni mulj koji se može koristiti kao gnojivo.[18].....	28
Slika 17. Primjer zadržavanja vode u česticama mulja.....	37
Slika 18. Predviđeni prostor za smještaj postrojenja za obradu otpadnog mulja [19]48	
Slika 19. Prikaz solarnog sušenja za proizvodnju mulja[19]	50
Slika 20. Dijagram predviđene mjesečne vrijednosti evaporacije [21]	55
Slika 21. Potencijalna i potrebna količina isparavanja [21]	57
Slika 22. Količine mulja koje ulaze i izlaze iz postrojenja [21]	57
Slika 23. Prikaz postrojenja za solarno sušenje mulja	59

Slika 24. Prikaz industrijskog podnog grijanja u pogonu za isušivanje mulja [19]	59
Slika 25. Centrifugalna muljna pumpa proizvođača Deponpump [22]	62
Slika 26. Horizontalno orijentirana centrifugalna muljna pumpa [23]	63

POPIS TABLICA

Tablica 1. Ovisnost ponašanja mulja ovisno o koncentraciji vlage	38
Tablica 2. Sadržaj hranjivih tvari u mulju	42
Tablica 3. Izlazne i ulazne kvalitete proizvoda prije i nakon solarnog sušenja [19] ..	52
Tablica 4. Količina mulja i njegov sadržaj za grad od 60000 stanovnika [19]	55
Tablica 5. Proizvod (osušeni mulj) po mjesecima [21].....	57

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
b	m	Širina podloge
l	m	Duljina podloge
h	m	Debljina sloja mulja
V	m^3	Volumen nasutog mulja
m	kg	masa mulja
γ	kg/m^3	Gustoća
n		Broj ciklusa
M	t	Količina godišnje proizvodnje
Q	m^3/dan	Protok mulja
v	m/s	Brzina protoka
H	m	Visina dobave
A	m^2	Površina poprečnog presjeka cijevi
d	mm	Promjer cijevi
q	m^3/s	Kapacitet

1. UVOD

U današnjem svijetu, sve izraženiji problemi s nedostatkom pitke vode i onečišćenjem okoliša postavljaju velike izazove pred suvremeno društvo. Kontinuirano povećanje broja stanovnika, urbanizacija te rast industrije i poljoprivrede pridonose porastu opterećenja vodnih sustava. Istovremeno, klimatske promjene i globalno zatopljenje pogoršavaju dostupnost resursa, dok složeni industrijski procesi uvode nove vrste onečišćenja koje tradicionalne metode obrade ne mogu učinkovito ukloniti. Sve navedeno čini sustave za obradu otpadnih voda ključnim alatom za zaštitu okoliša i očuvanje prirodnih resursa.

Otpadne vode, koje sadrže različite kemijske spojeve i organske tvari, predstavljaju ozbiljan izazov zbog njihovog utjecaja na vodne tokove i podzemne resurse. Sustavi za obradu otpadnih voda razvijali su se kroz povijest, kako bi zadovoljili potrebe urbanih sredina, no danas su pred njima složeniji zadaci. Uz osiguranje čistoće ispuštenih voda, dodatni fokus stavljen je na gospodarenje nusproizvodima poput otpadnog mulja. Upravo je mulj jedan od ključnih elemenata procesa obrade, budući da se njegove velike količine moraju pravilno zbrinuti kako bi se smanjio ekološki utjecaj i povećala mogućnost ponovne upotrebe.

Cilj ovog završnog rada je istražiti metode obrade otpadnih voda, s posebnim naglaskom na postupke isušivanja otpadnog mulja pomoću solarne energije. Takvi sustavi nude održivo rješenje koje kombinira tehnološku učinkovitost i ekološku prihvatljivost. Rad započinje pregledom osnovnih karakteristika otpadnih voda, njihovim prikupljanjem te razvojem metoda obrade kroz povijest. Posebna pažnja posvećena je suvremenim tehnologijama odvajanja i isušivanja mulja, uz osvrt na klimatske specifičnosti Hrvatske i zakonske regulative koje usmjeravaju razvoj infrastrukture za obradu otpadnih voda.

Praktični dio rada temelji se na dimenzioniranju sustava za solarno sušenje otpadnog mulja za grad s populacijom od 60.000 stanovnika. Analizirani su tehnički aspekti sustava, od odabira komponenti i njihove specifikacije do simulacije procesa i evaluacije učinkovitosti. Rezultati pružaju uvid u mogućnosti primjene solarnih tehnologija u obradi mulja, uz naglasak na smanjenje troškova energije i povećanje održivosti sustava.

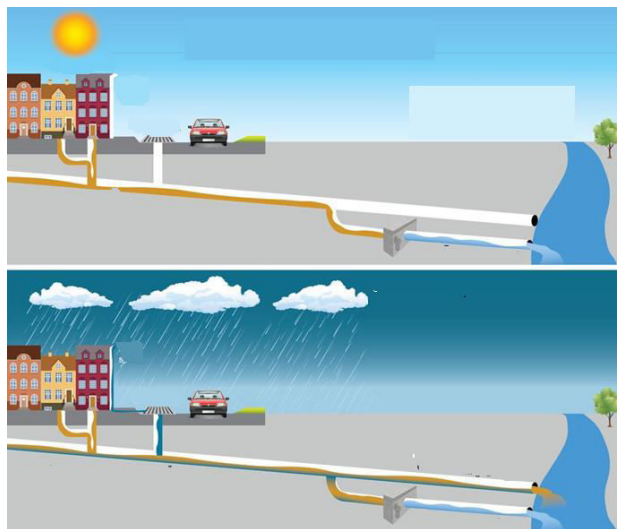
Ovaj rad ne samo da doprinosi razumijevanju tehnologija za obradu otpadnih voda, već i potiče razvoj rješenja koja usklađuju potrebe za ekološkom odgovornošću i tehničkom izvedivošću. Implementacija ovakvih sustava može značajno pridonijeti očuvanju okoliša i osiguravanju čistih resursa za buduće generacije, čineći obradu otpadnih voda prioritetom u održivom razvoju.

2. TEORETSKE OSNOVE

Pročišćavanje otpadnih voda (odnosno tretman komunalnih otpadnih voda, tretman otpadnih voda iz kućanstava) je vrsta pročišćavanja otpadnih voda koja ima za cilj ukloniti onečišćenja iz kanalizacijskih voda kako bi se proizveo tok koji je prikladan za ispuštanje u okoliš ili se može koristiti za predviđenu ponovnu uporabu, čime se sprječava onečišćenje vode izravnim ispuštanjem sirovih otpadnih voda. Kanalizacija sadrži otpadne vode iz kućanstava i poslovnih objekata (tvornice, industrijska postrojenja), a moguće je i prethodno tretirane industrijske otpadne vode.

2.1. Oblici tretiranja otpadnih voda

Postoji veliki broj procesa za pročišćavanje otpadnih voda koji se mogu koristiti, ovisno o okolnostima, potrebama i mogućnostima. Ovi procesi mogu varirati od decentraliziranih sustava (uključujući sustave za pročišćavanje na licu mjesta) do velikih centraliziranih sustava koji uključuju mrežu cijevi i crpnih stanica (koristi se skupni naziv kanalizacija) koje prenose otpadne vode do postrojenja dizajniranog za pročišćavanje.



Slika 1. Kombinirani kanalizacijski sistem

Za gradove koji imaju kombiniranu kanalizaciju (Slika 1.), kanali će također prenositi oborinske vode do postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda, iako postoji sigurnosni cjevovod u slučaju prekomjernih oborina kako ne bi došlo do izlivanja kanalizacije u naseljenim područjima. Pročišćavanje otpadnih voda često uključuje dvije glavne faze,

nazvane primarna (Slika 2.) i sekundarna obrada, dok napredna obrada također uključuje tercijarnu fazu obrade s procesima poliranja i uklanjanja nutrijenata.



Slika 2. Primarna obrada otpadnih voda grubim odvajanjem

Sekundarna obrada može smanjiti udio organske tvari (mjeri se kao biološka potreba za kisikom) iz kanalizacije, koristeći aerobne ili anaerobne biološke procese (Slika 3). Takozvana kvartarna faza obrade (ponekad nazivana naprednom obradom) također se može dodati za uklanjanje organskih mikro zagađivača, poput farmaceutskih proizvoda i uz dodatnu filtraciju, mikro polimere, vezano za koje se svakim danom otkriva niz štetnih utjecaja na okoliš, floru, faunu i ljude. Ovo je djelomično provedeno na određenim lokacijama u Švedskoj [1].



Slika 3. Bazen za biološko smanjenje sadržaja količine organske tvari

Velik broj tehnologija za pročišćavanje otpadnih voda je razvijen, uglavnom koristeći biološke procese obrade. Konstrukcijski inženjeri i donositelji odluka moraju uzeti u obzir tehničke i ekonomske kriterije svakog potencijalnog tehnološkog rješenja pri odabiru odgovarajuće tehnologije.

Često su glavni kriteriji za odabir:

1. željena kvaliteta fluentna;
2. očekivani troškovi izgradnje i rada;
3. raspoloživost zemljišta;
4. energetske zahtjevi;
5. aspekti održivosti.

U zemljama u razvoju i u ruralnim područjima s niskom gustoćom naseljenosti, otpadne vode se često tretiraju raznim sanitarnim sustavima na neposrednoj lokaciji u vidu septičkih jama i ne odvođe se kanalizacijom. Ovi sustavi uključuju septičke jame povezane s drenažnim poljima, sustave za obradu otpadnih voda na licu mjesta, sustave filtriranja i mnoga druga moguća rješenja. S druge strane, napredna i relativno skupa postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda mogu uključivati tercijarnu obradu s dezinfekcijom i eventualno čak i četvrtu fazu obrade za uklanjanje mikro zagađivača (mikro polimeri i farmaceutski otpad poput nakon ljudske konzumacije poput hormona koji se koriste u kontracepcijskim pilulama i mogu imati negativan utjecaj na lokalne životinjske populacije i stanovništvo) [2].

Na globalnoj razini, procijenjeno je da se obrađuje oko 52% otpadnih voda. Međutim, načini i razine obrade otpadnih voda su vrlo nejednake među različitim zemljama u svijetu. Na primjer, u visokorazvijenim zemljama obrađuje se otprilike 74% otpadnih voda, dok se u zemljama u razvoju obrađuje u prosjeku samo 4,2% [2].

Obrada otpadnih voda dio je područja sanitarne obrade. Sanitarna obrada također uključuje upravljanje ljudskim otpadom, krutim otpadom, kao i upravljanje oborinskim vodama (drenažnim vodama). Pojam postrojenje za obradu otpadnih voda često se koristi kao sinonim za pojam postrojenje za pročišćavanje otpadnih voda, dok se ovaj pojam danas se često zamjenjuje pojmom postrojenje za pročišćavanje otpadnih voda. Strogo govoreći, potonji je širi pojam koji također može također obuhvatiti i obradu industrijskih otpadnih voda. Pojmovi centar za reciklažu vode ili postrojenja za obnovu vode također se koriste kao sinonimi.

2.2. Svrha, pregled i karakteristike otpadnih voda

Glavni cilj obrade otpadnih voda je pročišćavanje istih te ispuštanje obrađene vode u okoliš uz minimalno zagađenje vode u koju se ista ispušta. Drugi cilj je izvesti ispražnjenje koje se može ponovno direktno koristiti na koristan način (npr. za navodnjavanje). To se postiže uklanjanjem kontaminirajućeg sadržaja iz otpadnih voda. Taj oblik obrade smatra se upravljanjem otpadom.

Za biološku obradu otpadnih voda, ciljevi obrade mogu uključivati različite stupnjeve obrade poput sljedećih:

1. transformaciju organske tvari;
2. uklanjanje organske tvari;
3. uklanjanje hranjivih tvari (dušik i fosfor);
4. uklanjanje patogenih organizama;
5. uklanjanje specifičnih tragova organskih sastojaka (mikro onečišćenja).

Neke vrste obrade otpadnih voda proizvode mulj (proizvod) iz otpadnih voda koji se može obraditi prije sigurnog odlaganja ili ponovne upotrebe. U određenim okolnostima, obrađeni mulj iz otpadnih voda tretira se kao biološka kruta tvar i može se koristiti kao gnojivo.

Tipične vrijednosti fizičko-kemijskih karakteristika sirovih otpadnih voda u zemljama u razvoju su sljedeće [2]:

1. 180 g/osoba/danu za ukupne čvrste tvari (ili 1100 mg/L kada se izrazi kao koncentracija);
2. 50 g/osoba/d za BOD ili biološki zahtjev za kiksom (300 mg/L);
3. 100 g/osoba/danu za COD ili biološki zahtjev za ugljikom (600 mg/L);
4. 8 g/osoba/danu za ukupni dušik (45 mg/L);
5. 4,5 g/osoba/danu za amonijak-N
6. (25 mg/L) i 1,0 g/osoba/danu za ukupni fosfor (7 mg/L).

Tipični rasponi za ove vrijednosti su:

1. 120–220 g/osoba/danu za ukupne čvrste tvari (ili 700–1350 mg/L kada se izrazi kao koncentracija);
2. 40–60 g/osoba/danu za BOD (250–400 mg/L);
3. 80–120 g/osoba/danu za COD (450–800 mg/L);
4. 6–10 g/osoba/danu za ukupni dušik (35–60 mg/L);
5. 3,5–6 g/osoba/danu za amonijak-N (20–35 mg/L);
6. 0,7–2,5 g/osoba/danu za ukupni fosfor (4–15 mg/L).



Slika 4. Neadekvatan kanalizacijski sustav

Za zemlje s visokim dohotkom, opterećenje organskim tvarima po osobi utvrđeno je na približno 60 grama BOD-a po osobi dnevno. Ovo se naziva ekvivalent populacije (EP) i također se koristi kao parametar usporedbe za izražavanje snage industrijske otpadne vode u odnosu na otpadne vode [2].



Slika 5. Tretman otpadnih voda u razvijenim zemljama

2.3. Povijest razvoja i vrste kanalizacijskih sustava

Potreba da se riješi neugodan miris, ali ne i razumijevanje zdravstvenih opasnosti ljudskog otpada, dovela je do izgradnje prvih pravih kanalizacijskih sustava. Većina naselja rasla je uz prirodne vodotoke u koje je otpad u svim oblicima bio lako usmjeren, no pojava velikih gradova otkrila je neadekvatnost ovog pristupa. Rane civilizacije, poput Babilonaca, koristile su septičke jame ispod razine poda u svojim kućama i stvarale primitivne sustave odvodnje za uklanjanje oborinskih voda. No, tek je 2000. godine prije Krista u civilizaciji doline Inda izgrađena mreža precizno izrađenih kanalizacijskih kanala obloženih ciglom uz ulice za odvod otpada iz kuća (Slika 6). Toaleti u kućama uz ulicu bili su povezani izravno s tim uličnim kanalizacijama i ručno su se ispirali čistom vodom [6].



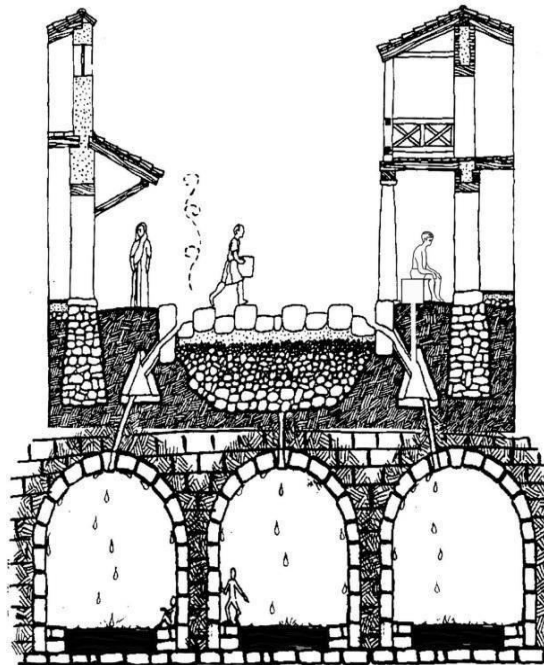
Slika 6. Primjeri sanitarnih sustava u dolini rijeke Ind

Stoljećima kasnije, veliki gradovi poput Rima i Konstantinopola izgradili su sve složenije mreže kanalizacijskih sustava. Neki od njih i dalje su u uporabi - Cloaca Maxima u Rimu, čiji su dijelovi u upotrebi još i danas i prazne se u rijeku Tiber (Slika 7).



Slika 7. Cloaca Maxima u Rimu

Tek nakon izgradnje kanalizacijskih sustava ljudi su shvatili da isto utječe i na smanjenje zdravstvenih opasnosti. U Hrvatskoj su ostatci sanitarnih sustava iz rimskog doba još u upotrebi u Sisku i Puli.



Slika 8. Presjek većeg kanalizacijskog sustava u Rimu i Konstantinopolu

Glavni dio takvog kanalizacijskog sustava čine velike cijevi (tj. kanalizacija ili "sanitarne kanalizacije") koje prenose otpadnu vodu od mjesta nastanka do mjesta obrade ili ispuštanja.

Vrste sanitarnih kanalizacijskih sustava koje obično uključuju gravitacijske kanalizacije su:

1. kombinirani kanalizacijski sustav
2. pojednostavljena kanalizacija
3. oborinske cijevi

Sanitarni kanalizacijski sustavi koji ne ovise isključivo o gravitaciji uključuju:

1. vakumska kanalizacija
2. kanalizacija za otpadne vode

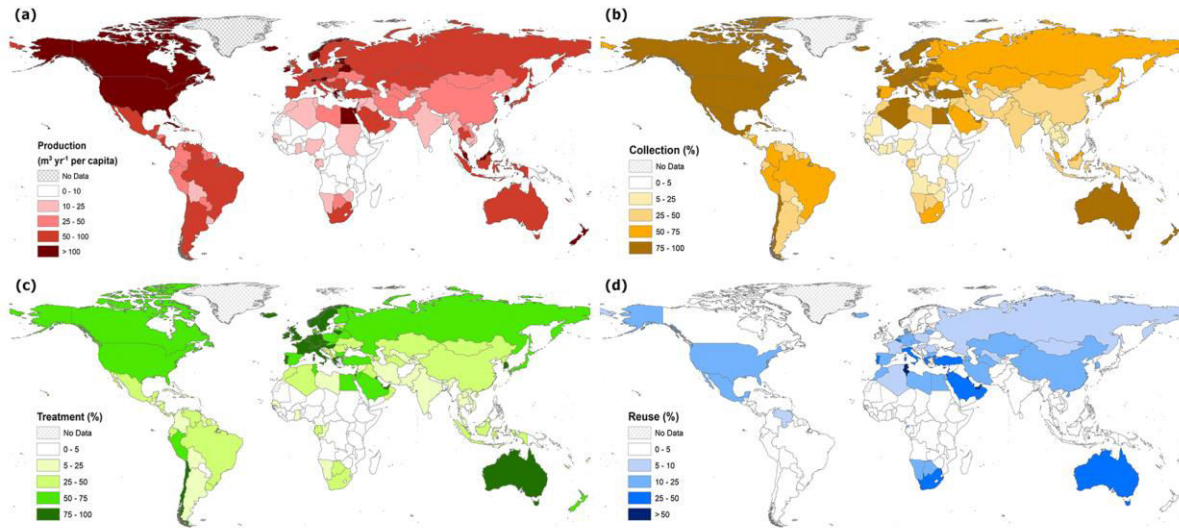
Tamo gdje kanalizacijski sustav nije instaliran, otpadne vode se mogu prikupljati iz kuća pomoću cijevi koje vode u septičke jame. Iste se tamo mogu tretirati ili prikupljati u vozilima i odvoziti na obradu ili odlaganje (proces poznat kao upravljanje fekalnim muljem).

2.4. Vrste procesa obrade otpadnih voda

Otpadne vode se mogu obrađivati blizu mjesta gdje nastaju, što se može nazvati decentraliziranim sustavom ili čak sustavom na lokaciji (sustavi za odvodnju na licu mjesta, septičke jame itd.). Alternativno, otpadne vode se mogu prikupljati i transportirati mrežom cijevi i pumpnih stanica do komunalne postaje za pročišćavanje. Ovo se naziva centraliziranim sustavom (vidi također kanalizaciju i cijevi i infrastrukturu). Ove značajke će jako varirati ovisno o financijskim prilikama i državnoj uređenosti kako je prikazano na slici 9.

Veliki broj tehnologija za pročišćavanje otpadnih voda je razvijen, većinom koristeći biološke procese obrade. Vrlo općenito procesi obrade otpadnih voda mogu se podijeliti

na procese visoke tehnologije (sa pripadajućim visokim troškovi) naspram nisko tehnoloških (sa pripadajućim niski troškovima). Neke tehnologije mogu spadati u obje kategorije.



Slika 9. Vizualni prikaz, prikupljanja, obrade i ponovne sekundarne upotrebe otpadnih voda

Drugi načini klasifikacije su intenzivni ili mehanizirani sustavi (kompaktniji, često koristeći visoke tehnologije) naspram ekstenzivnih ili prirodnih sustava (obično koriste prirodne procese obrade i zauzimaju veće površine).

Ova klasifikacija može ponekad biti previše pojednostavljena jer postrojenje za pročišćavanje može uključivati kombinaciju procesa, a interpretacija pojmova visoke i niske, intenzivne i ekstenzivne, mehanizirane tehnologije i prirodnih procesa može varirati od mjesta do mjesta [8].

2.4.1. Nisko tehnološki, ekstenzivni ili prirodni procesi obrade otpadnih voda

Primjeri jednostavnijih, često jeftinijih sustava za pročišćavanje otpadnih voda često koriste malo ili nimalo energije. Neki od tih sustava ne pružaju visoku razinu obrade ili obrađuju samo dio otpadnih voda (na primjer, samo otpadne vode iz sanitarnih čvorova) ili pružaju samo predobradu, poput septičkih jama. S druge strane, neki sustavi mogu pružiti dobar učinak, zadovoljavajući pritom nekoliko različitih primjena. Mnogi od tih sustava temelje se na prirodnim procesima obrade, koji zahtijevaju velike površine, dok su drugi kompaktniji. U većini slučajeva koriste se u ruralnim područjima ili u malim do

srednje velikim zajednicama. [8] Na primjer, bazeni za stabilizaciju otpada su opcija niskih troškova s gotovo nultim zahtjevima za energijom, ali zahtijevaju veliku površinu zemlje. Zbog svoje tehničke jednostavnosti, većina ušteda (u usporedbi s visoko tehnološkim sustavima) odnosi se na troškove rada i održavanja [12].

Na Slici 10. vidimo biološke aerobne bazene kao primjer nisko tehnološke obrade otpadnih voda [13].



Slika 10. Biološki aerobni bazeni

Vrste anaerobnih digestora i anaerobna digestija [12]:

1. reaktor s uzlaznim anaerobnim slojem;
2. septička jama;
3. konstruirana močvara;
4. decentralizirani sustav otpadnih voda;
5. rješenja temeljena na prirodi;
6. sustav za obradu otpadnih voda na licu mjesta;
7. pješčani filter;
8. bazeni za stabilizaciju otpada s podvrstama poput fakultativnih bazena, bazena visoke brzine, bazena za zrenje itd.

Primjeri sustava koji mogu pružiti potpunu ili djelomičnu obradu samo otpadnih voda iz kućanstava [12]:

1. kompostni wc (poput suhих sanitarnih čvorova);
2. wc s odvajanjem urina i čvrstih tvari.

2.4.2. Visokotehnološki, intenzivni ili mehanički procesi

Primjeri visokotehnoloških, intenzivnih ili mehaničkih sustava za pročišćavanje otpadnih voda, koji su često relativno skupi, navedeni su u nastavku. Neki od njih su također energetske intenzivni, a neki od njih pružaju vrlo visok nivo obrade. Na primjer, općenito govoreći, proces aktiviranog mulja postiže visoku kvalitetu ispuha, ali je relativno skup i energetske intenzivan[8].

Neke od tehnologija koje se primjenjuju su:

1. sustavi aktiviranog mulja;
2. aerobni sustav obrade;
3. poboljšano biološko uklanjanje fosfora;
4. prošireni reaktor s granulatnim muljem;
5. filtracija;
6. membranski bio reaktor;
7. reaktor s pokretnim slojem biofilma;
8. rotirajući biološki kontaktor;
9. reaktor s trickling filterom;
10. UV dezinfekcija.

Postoje i druge opcije procesa koje se mogu klasificirati kao opcije zbrinjavanja, iako se također mogu razumjeti kao osnovne opcije obrade. To uključuje: primjena mulja, navodnjavanje, jama za upijanje, polje za ispiranje, ribnjak, ploveći bazen s vodnom vegetacijom, ispuštanje u vodu odnosno ponovno punjenje podzemnih voda, ispuštanje na površini i skladištenje.

Primjena otpadnih voda na zemljište je i vrsta obrade i vrsta konačnog zbrinjavanja. To dovodi do obnavljanja podzemnih voda i/ili do evapotranspiracije. Primjena na zemljištu uključuje sustave sporog tempa, brzu infiltraciju, infiltraciju u podzemlje i površinski tok. Izvodi se preko poplavlivanja, brazdi, prskanja i kapanja. To je sustav obrade/zbrinjavanja koji zahtijeva veliku količinu zemljišta po osobi.

2.5. Aspekti konstrukcije sustava za zbrinjavanje otpadnih voda

Opterećenje organskom tvari po osobi je parametar koji se koristi u projektiranju postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda. Ovaj koncept je poznat kao ekvivalent populacije (EP). Osnovna vrijednost koja se koristi za EP može varirati od zemlje do zemlje, no širom svijeta koriste se uobičajena pravila poput:

1. 1 EP odgovara 60 grama BPK (biokemijska potrošnja kisika) po osobi
2. dnevna potrošnja po osobi iznosi 200 litara otpadne vode dnevno.

Ovaj koncept se također koristi kao usporedbeni parametar za izražavanje jačine industrijskih otpadnih voda u usporedbi s kanalizacijom. U industrijaliziranim zemljama najvažniji parametri pri odabiru procesa obično su učinkovitost, pouzdanost i zahtjevi za prostorom. U zemljama u razvoju oni mogu biti drugačiji, pri čemu je naglasak više na troškovima izgradnje i rada te jednostavnosti procesa[2].

Odabir najprikladnijeg procesa obrade je složen i zahtijeva stručne ulazne informacije, često u obliku studija izvedivosti upravo zbog važnosti i brojnosti samih čimbenika koje treba uzeti u obzir prilikom procjene i odabira procesa obrade otpadnih voda [12].

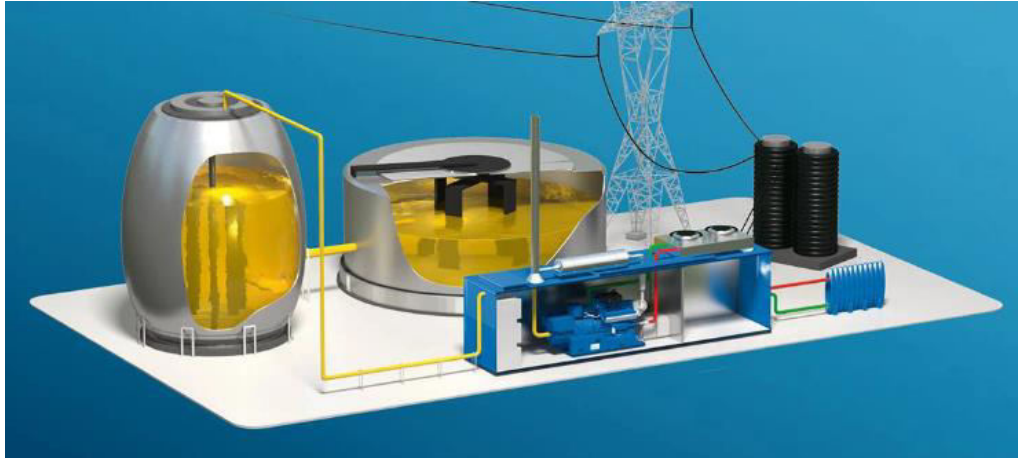
Navedeni čimbenici uključuju:

1. primjenjivost procesa,
2. primjenjivi protok,
3. prihvatljivu varijaciju protoka,
4. karakteristike utjecajnih spojeva
5. inhibirajuće ili teško razgradive spojeve,
6. klimatske aspekte,
7. kinetiku procesa i hidrauliku reaktora,
8. učinkovitost,

9. ostatke obrade,
10. obradu mulja,
11. ekološka ograničenja,
12. zahtjeve za kemijskim proizvodima, energijom i drugim resursima,
13. zahtjeve za osobljem, radom i održavanjem,
14. pomoćne procese,
15. pouzdanost,
16. složenost,
17. kompatibilnost,
18. dostupnost prostora.

Mirisi koji se emitiraju tijekom obrade otpadnih voda obično su pokazatelj anaerobnih ili septičkih uvjeta. Rane faze obrade imaju tendenciju proizvoditi neugodne mirise, pri čemu je sumporovodik najčešći uzrok pritužbi okolnog stanovništva. Velika procesna postrojenja u urbanim područjima često tretiraju mirise pomoću reaktora s ugljenom, kontaktnih medija s biofilmom (poput sječke smreke ili bora u kombinaciji sa ventilacijskim sustavima), malih doza klora ili kruženja tekućina kako bi biološki uhvatili i metabolizirali štetne plinove. Postoje i druge metode kontrole mirisa, uključujući dodavanje željeznih soli, vodikovog peroksida, kalcijevog nitrata i sličnog upravo da bi se upravljalo razinama sumporovodika.

Energetski zahtjevi variraju ovisno o vrsti procesa obrade otpadnih voda kao i o jačini otpadnih voda. Na primjer, konstruirani mokri biotopi i stabilizacijski bazeni imaju niske energetske zahtjeve, a u usporedbi s njima, proces aktivnog mulja ima visoku potrošnju energije zbog uključivanja faze prozračivanja (aktivnog dovođenja kisika uz pomoć pumpi). Neka postrojenja za obradu otpadnih voda proizvode bioplin iz procesa obrade mulja koristeći proces koji se naziva anaerobna digestija. Ovaj proces može proizvesti dovoljno energije da zadovolji većinu energetske potrebe samog postrojenja za obradu otpadnih voda, a u nekim slučajevima i viška, što omogućuje proizvodnju električne energije ili potpomaganje sustavu grijanja.



Slika 11. Simbolički prikaz elektrane na metan

Mala ruralna postrojenja koja koriste biološke filtere mogu raditi bez neto energetskih zahtjeva, pri čemu cijeli proces pokreće gravitacijski tok uključujući raspodjelu protoka pomoću nagibne kante i uklanjanje mulja iz taložnih spremnika na za to predviđene površine za sušenje. Ovo je obično praktično samo na brdovitom terenu i u područjima gdje je postrojenje za obradu relativno udaljeno od stambenih objekata zbog poteškoća u upravljanju mirisima.



Slika 12. Prikupljanje sasušenog otpadnog mulja

2.6. Obrada industrijskih otpadnih voda

Obrada industrijskih otpadnih voda odnosi se na postupak obrade industrijskih otpadnih voda zajedno s komunalnim otpadnim vodama u istom postrojenju za obradu otpadnih voda. Tokovi industrijskih otpadnih voda često imaju zasebni odvojeni sastav u usporedbi s običnim komunalnim otpadnim vodama, jer takve industrijske otpadne vode mogu zahtijevati posebne tretmane kako bi se štetne tvari uklonile prije nego što se voda iz industrije može ispustiti u okoliš ili ponovno direktno reciklirati i iskoristiti u procesu proizvodnje.

Ovaj pristup može biti ekonomski isplativiji od izgradnje zasebnih postrojenja za obradu industrijskih otpadnih voda, no može biti izazovan u smislu upravljanja različitim kemijskim sastavima i osiguravanja učinkovitog uklanjanja zagađivača. U visoko reguliranim razvijenim zemljama, industrijske otpadne vode obično se podvrgavaju pred tretmanima, ako ne i potpunom tretmanu u samim tvornicama kako bi se smanjio teret zagađivača prije ispuštanja u kanalizaciju. Neke vrijedne sirovine i kemijski spojevi koji se mogu ponovno upotrijebiti u proizvodnji se i rekuperiraju.

Pred tretman ima dva glavna cilja:

1. spriječiti ulazak toksičnih ili inhibicijskih spojeva u biološku fazu postrojenja za obradu otpadnih voda i smanjiti njegovu učinkovitost;
2. izbjeći nakupljanje toksičnih spojeva u proizvedenom mulju, što bi smanjilo mogućnosti korisne ponovne uporabe.

Neke industrijske otpadne vode mogu sadržavati zagađivače koje postrojenja za obradu otpadnih voda ne mogu ukloniti. Također, promjenjiv protok industrijskog otpada povezan s proizvodnim ciklusima može narušiti dinamiku populacije u biološkim jedinicama za obradu [12].

2.6.1. Konstruktivski aspekti sekundarnih procesa obrade

Sekundarna obrada (pod kojom se uglavnom podrazumijeva biološka obrada otpadnih voda) je uklanjanje biorazgradivih organskih tvari (u otopini ili suspenziji) iz kanalizacije

ili sličnih vrsta otpadnih voda. Cilj takvog postupka je postizanje određenog stupnja kvalitete izlazne vode u postrojenju za obradu otpadnih voda, prikladnog za predviđeno odlaganje ili ponovnu uporabu.

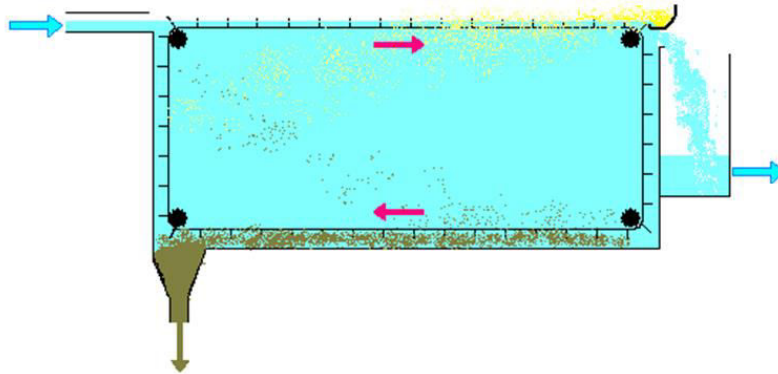
Primarna obrada često prethodi sekundarnoj obradi, pri čemu se koristi fizička fazna separacija za uklanjanje taložnih krutih tvari. Tijekom sekundarne obrade, biološki procesi se koriste za uklanjanje otopljenih i suspendiranih organskih tvari, mjenjenih kao biokemijska potrošnja kisika (BPK). Ove procese izvode mikroorganizmi u upravljanoj aerobnoj ili anaerobnoj obradi, ovisno o tehnologiji obrade.

Bakterije konzumiraju biorazgradive topljive organske onečišćivače (primjerice šećere, masti i organske ugljikove molekule iz izmeta, hrane, sapuna i različitih deterdženata) te se pritom razmnožavaju stvarajući biološke krute tvari. Sekundarna obrada široko se koristi u obradi otpadnih voda i također je primjenjiva na mnoge poljoprivredne i industrijske otpadne vode.

Sustavi koji se koriste za sekundarnu obradu klasificiraju su kao sustavi s fiksnom preprekom (filmom) ili sustavi sa suspendiranim mikrobiološkim rastom te ovisno o vrsti mikroorganizama kao anaerobni ili aerobni sustavi. Sustavi s fiksnom propusnom preprekom ili sustavi s prinuđenim rastom uključuju filtre koji imaju rotirajući dio (sloj), močvarne sustave koji su planirani i kultivirani, tornjeve za biološku razgradnju i rotirajuće biološke kontaktne površine u kojima biomasa raste direktno na hranjivom mediju, a kanalizacija prolazi preko te površine. Načelo fiksnog filma dodatno se razvilo u reaktore s pomičnim slojem biološkog filma i procese integriranog filma aktiviranog supstrata. To su sustavi koji podržavaju suspendirani rast uključuju biološki aktivirani mulj, gdje aerobni sustav obrade temeljni na održavanju biomase i cirkularnom opticanju kompleksne biomase sastavljene od mikroorganizama obavlja ulogu apsorpcije i adsorpcije organske tvari koja je prisutna u otpadnim vodama. Također se koriste i umjetno kultivirane močvare, a primjer jednog anaerobnog sekundarnog sustava obrade je reaktor s uzlaznim anaerobnim slojem mulja.

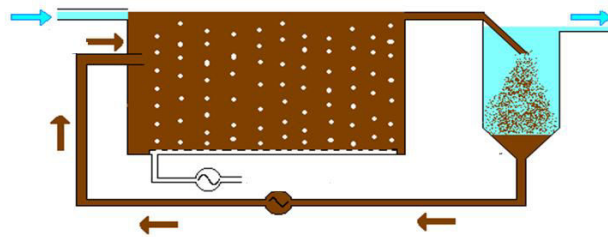
Primarnom obradom smatra se uklanjanje dijela suspendiranih čestica i organskog materijala iz otpadnih voda, a sastoji se od prolaska otpadnih voda kroz bazen u kojem teže čestice mogu taložiti na dno, dok se ulja, masti i lakše čestice uzdižu na površinu i skidaju. Ovi bazeni nazivaju se primarni sedimentacijski bazeni ili primarni razdjeljivači te obično imaju hidrauličko zadržavanje od 1,5 do 2,5 sata. Talog i plutajući materijali se

uklanjaju, a preostala tekućina može biti ispražnjena ili podvrgnuta sekundarnoj obradi. Primarni sedimentacijski bazeni obično su opremljeni mehanički vođenim strugačima koji kontinuirano usmjeravaju prikupljeni mulj prema spremniku na dnu bazena koji se dalje pumpaju u postrojenja za obradu mulja.



Slika 13. Popriječeni presjek bazena za primarni tretman otpadnih voda

Primarna obrada taloženjem uklanja otprilike polovicu čestica i trećinu biorazgradivog organskog materijala (BOD-a) iz sirovih otpadnih voda. Sekundarna obrada definirana je kao uklanjanje biorazgradivog organskog materijala (u otopini ili suspenziji) i suspendiranih čestica. Dezinfekcija je također obično uključena u definiciju konvencionalne sekundarne obrade. Biološko uklanjanje hranjivih tvari neki inženjeri za sanitarije smatraju sekundarnom obradom, dok drugi to smatraju tercijarnom obradom. Nakon ove vrste obrade, otpadne vode se mogu nazvati sekundarno obrađenim otpadnim vodama [12].



Slika 14. Poprečni presjek bazena za aeraciju kod sekundarne obrade otpadnih voda

Napredna obrada otpadnih voda obično uključuje tri glavne faze nazvane primarna, sekundarna i tercijarna obrada, ali može također uključivati srednje faze i završne procese dorade. Svrha tercijarne obrade je pružiti konačnu fazu obrade kako bi se dodatno poboljšala kvaliteta izlazne vode prije nego što se ispusti u prijemno vodno tijelo ili prije ponovne upotrebe. Može se koristiti više od jednog procesa tercijarne obrade u bilo kojem postrojenju za obradu otpadnih voda. Ukoliko se primjenjuje proces dezinfekcije, to je uvijek posljednji proces u nizu. Tercijarni proces se također naziva doradom izlazne vode. Tercijarna obrada može uključivati biološko uklanjanje hranjivih tvari (alternativno, ovo se može klasificirati kao sekundarna obrada), dezinfekciju i uklanjanje mikro zagađivača kao što su okolišni trajni farmaceutski zagađivači. Tercijarna obrada ponekad se definira kao bilo koja obrada koja nadilazi primarnu i sekundarnu obradu kako bi se omogućilo ispuštanje u izrazito osjetljiv ili fragilan ekosustav poput ušća rijeka, rijeka s malim protokom ili koraljnih grebena. Pročišćena voda se ponekad dezinficira kemijski ili fizički (na primjer, kroz lagune i mikro filtraciju) prije ispuštanja u potok, rijeku, zaljev, lagunu ili močvaru ili se pak može koristiti za navodnjavanje sportskih terena, zelenih površina ili parkova. Ako je dovoljno čista, može se koristiti i za dopunjavanje podzemnih voda ili u poljoprivredne svrhe[12].

Pješčana filtracija uklanja većinu preostale suspendirane tvari. Filtracija preko aktivnog ugljena, također nazvana adsorpcija ugljena, uklanja preostale toksine. Mikro filtracija ili sintetičke membrane koriste se u membranskim bio reaktorima i također mogu ukloniti patogene. Taloženje krutina i svako daljnje biološko poboljšanje otpadne vode koja je tretirana može se postići zadržavanjem u umjetnim jezerima ili lagunama velikog kapaciteta. Ta umjetna stajaća vodena tijela su izrazito aerobna, te se u njima potiče rast lokalnog vodenog raslinja, osobito trska.

Dezinfekcija otpadne vode koja je prethodno obrađena ima za cilj uništenje patogena (mikroorganizmi koji uzrokuju bolesti) prije konačnog odlaganja. Njena učinkovitost se povećava nakon što su završeni svi prethodni stupnjevi obrade. Dezinfekcija u obradi otpadnih voda ima značajnu svrhu smanjiti broj patogena u vodi koja se ispušta natrag u okoliš ili je predviđena za ponovno korištenje. Ciljana razina smanjenja bioloških kontaminanti poput patogena često je regulirana od strane nadležnih vladinih tijela. Postupak dezinfekcije, ili bolje rečeno, njezina učinkovitost će ovisiti o kvaliteti vode koja će se obrađivati (faktori poput zamućenost i pH vrijednosti pri tome imaju značajnu ulogu), tipu korištene dezinfekcije, koncentraciji sredstva za dezinficiranje i vremenskog trajanja primjenjivanja istog te drugim okolišnim varijablama. Zamućena voda, posebno ukoliko u sebi ima veliki broj plutajućih čestica bit će u manjoj mjeri tretirana s uspjehom jer čvrste čestice mogu zaštititi organizme, osobito od ultraljubičastog zračenja ili kratkotrajne izloženosti. Kratko vrijeme kontakta, niske doze kemijskih reagensa i veliki protočni volumen djeluju negativno na učinkovitost dezinfekcije. Uobičajene metode dezinfekcije uključuju ozon, klor, ultraljubičasto svjetlo.

Klor, koji se koristi za pitku vodu, ne koristi se u obradi otpadnih voda zbog svoje postojanosti [12]. Kloriranje vode je najčešći oblik dezinfekcije otpadnih voda koje su obrađene u mnogim zemljama zbog niskih ulaznih i trajnih troškova te dugogodišnje učinkovitosti. Kloriranje kao jedan od glavnih nedostataka ima problem što od zaostalog organskog materijala može stvoriti različite organske spojeve koji mogu biti kancerogeni i dugoročno štetni za okoliš u svim pogledima. Višak klora također može kontaminirati i organski materijal u prirodnom vodenom okolišu dalje od centara obrade otpadnih voda. Budući da je zaostali klor toksičan za floru i faunu, obrađena otpadna voda također mora biti kemijski obrađena kako bi se uklonio višak klora, što povećava složenost procesa i podiže troškove obrade.

Ultraljubičasto zračenje može se koristiti kao zamjena za klor, jod ili druga kemijska sredstva. Budući da se kemijska sredstva ne koriste, obrađena voda nema negativan učinak na organizme koji je naknadno nastanjuju ili konzumiraju, što može biti slučaj kod drugih metoda obrade. Ultraljubičasto zračenje uzrokuje oštećenje DNA i RNA genetske strukture bakterija, virusa i drugih patogenih organizama, što onemogućava njihovu daljnje razmnožavanje. Glavni nedostaci dezinfekcije ultraljubičastim zračenjem je učestalo održavanje i zamjena lampi te potreba za visoko obrađenim ispuštom kako bi se osiguralo da mikroorganizmi koji nisu poželjni nisu zaštićeni od ultraljubičastog zračenja (ili bolje rečeno, bilo kakve organske ili anorganske strukture koje). U mnogim zemljama

ultraljubičasto zračenje postaje najčešći način dezinfekcije zbog zabrinutosti od utjecaja klora na obradu zaostalih organskih tvari u obrađenoj otpadnoj vodi i utjecaj klora na organske tvari u dolaznoj vodi [12].

Kao i kod UV tretmana, toplinska sterilizacija također ne dodaje kemikalije vodi koja se tretira. Međutim, za razliku od UV-a, toplina može prodrijeti u tekućine koje nisu prozirne. Toplinska dezinfekcija također može prodrijeti u krute materijale unutar otpadne vode, sterilizirajući njihov sadržaj. Sustavi za toplinsku dekontaminaciju odtoka pružaju dekontaminaciju s niskim resursima i niskim održavanjem nakon instalacije.

Ozon (O_3) nastaje kada se kisik (O_2) propušta kroz visok napon, što rezultira time da se treći atom kisika veže i formira O_3 . Ozon kao kemijski spoj je izrazito nestabilan zbog slabih kemijskih veza i s time reaktivan te oksidira s organskim materijalima s kojima dolazi u dodir, čime direktno uništava mnoge mikroorganizme (patogene ili ne). Ozon je sigurniji od klora jer, za razliku od klora koji se mora skladištiti na licu mjesta u posebnim spremnicima, a pritom je vrlo otrovan u nezgodama slučajnog ispuštanja, ozon se može stvarati na licu mjesta po potrebi iz kisika iz okolnog zraka uz pomoć ultraljubičastog zračenja. Ozoniranje također proizvodi manje nusproizvoda dezinfekcije u usporedbi s kloriranjem. Dezinfekcija ozonom kao nedostatak ima visoku cijenu opreme koja je potrebna za generiranje ozona i zahtjev za posebnim operaterima. Tretman otpadnih voda ozonom zahtijeva upotrebu generatora ozona koji dekontaminira vodu dok se mjehurići ozona filtriraju kroz spremnik.

Membrane također mogu biti učinkoviti dezinficijensi jer djeluju kao barijere koje sprječavaju prolazak mikroorganizama. Kao rezultat toga, konačni proizvod može biti bez patogenih organizama, ovisno o vrsti korištene membrane. Ovaj princip se primjenjuje u membranskim bio reaktorima [12].

2.6.2. Uklanjanje suvišnih bioloških nutrijenata

Otpadne vode mogu sadržavati visoke razine hranjivih tvari, poput dušika i fosfora. Tipične vrijednosti za opterećenje hranjivim tvarima po osobi i koncentracije hranjivih tvari u sirovim otpadnim vodama u zemljama u razvoju objavljene su kako slijedi [12]:

1. 8 g/osobi/dan za ukupan dušik (45 mg/L),
2. 4,5 g/osobi/dan za amonijak-N (25 mg/L),

3. 1,0 g/osobi/dan za ukupan fosfor (7 mg/L).

Tipični rasponi za te vrijednosti su [12]:

1. 6-10 g/osobi/dan za ukupan dušik (35–60 mg/L),
2. 3,5-6 g/osobi/dan za amonijak-N (20–35 mg/L),
3. 0,7-2,5 g/osobi/dan za ukupan fosfor (4–15 mg/L).

Prekomjerno ispuštanje navedenih organskih tvari u okoliš može dovesti do preopterećenja okoliša hranjivim tvarima, što se može manifestirati kao nekontrolirana eutrofikacija. Ovaj proces može uzrokovati cvjetanje algi, brz rast i kasnije propadanje populacije algi. To uzrokuje smanjenje udjela kisika i potiče rast određenih vrsta algi koje proizvode toksične spojeve idealne za kontaminaciju izvora pitke vode.

Amonijev dušik, u obliku slobodnog amonijaka (NH_3), toksičan je za ribe. Amonijev dušik, kada se u procesu dovođenja dušika pretvori u nitrit i dalje u nitrat u vodenom tijelu, povezan je s potrošnjom otopljenog kisika. Nitrit i nitrat također mogu imati značajan utjecaj na javno zdravlje ako su koncentracije visoke u pitkoj vodi jer mogu uzrokovati kronične bolesti.

Fosfor se mora prioritetno ukloniti jer je jedan od glavnih nutrijenta koji uzrokuje prekomjerni rast algi u slatkovodnim sustavima, što može dovesti do destabilizacije biološke stabilnosti. Stoga, višak fosfora može dovesti do eutrofikacije. Izuzetno je važno za sustave čiji je prioritet ponovna uporaba vode jer tamo je fosfor u visokim koncentracijama i može dovesti do zagađenja opreme za pročišćavanje koja se nalazi nizvodno, poput opreme za reverznu osmozu. Dušik i fosfor se mogu ukloniti uz pomoć niza različitih procesa. Biološko uklanjanje nutrijenata neki smatraju vrstom sekundarnog procesa obrade dok ga drugi smatraju tercijarnim (ili naprednim) procesom obrade.

2.6.3. Uklanjanje suvišnog dušika

Dušik se uklanja uz pomoć biološke oksidacije iz amonijaka u nitrat (procesom dovođenja), a zatim se izdvaja denitrifikacijom, točnije procesom redukcije nitrata u dušik u plinskom stanju. Dušik u plinskom stanju se oslobađa u atmosferu i na taj način uklanja iz vode.

Dovođenje dušika je dvofazni aerobni proces, pri čemu svaki potrebni korak provode različite vrste bakterija. Oksidaciju amonijaka (NH_4^+) u nitrit (NO_2^-) najčešće olakšavaju bakterije poput dušičnih bakterija (dušik se odnosi na stvaranje dušične funkcionalne

skupine). Oksidaciju nitrita u nitrat (NO_3^-), za koju se tradicionalno vjerovalo da ju provodi dušična bakterija (dušik se odnosi na stvaranje dušične funkcionalne skupine).

Kako bi došlo do procesa denitrifikacije potrebno je postići uvjete bez kisika da bi se omogućilo razmnožavanje odgovarajućih bioloških zajednica. Uvjeti bez kisika odnose se na situaciju gdje je kisik odsutan, ali je prisutan nitrat. Široki spektar bakterija olakšava denitrifikaciju. Procesi poput aktivnog mulja, pješčanih filtera, stabilizacijskih jezera, izgrađenih močvara i drugih procesa su idealni kao rješenja za smanjenje dušika. Kako je proces denitrifikacija redukcija nitrata u dušik u plinovitom stanju (N_2), potreban je donator elektrona. Ovisno o kakvom obliku otpadne vode je riječ, to može biti organska tvar prisutna u samim otpadnim vodama, sulfid ili dodani donator poput metanola. Mulj prisutan u spremnicima bez kisika (spremnicima za denitrifikaciju) mora biti homogeno raspoređen (mješavina optičajne miješane tekućine, povratnog aktiviranog mulja i sirovog aktivnog sredstva), što se može postići pomoću potopnih miješalica kako bi se postigla denitrifikacija.

S vremenom su razvijene različite konfiguracije procesa aktivnog mulja kako bi se postigli visoki nivoi uklanjanja dušika. Početna shema nazvana je Ludzack–Ettinger proces no ona nije mogla postići visok nivo denitrifikacije. Kasnije je došao poboljšani proces pod nazivom Modificirani Ludzack–Ettinger (MLE) proces, koji je bio unaprijeđenije originalnog koncepta. Ovaj proces reciklira miješanu tekućinu s kraja aeracijskog spremnika na početak spremnika bez kisika. To omogućuje prisutnost nitrata za fakultativne bakterije. Postoje i druge konfiguracije procesa, poput varijacija Bardenpho procesa. One se mogu razlikovati u položaju spremnika bez kisika, na primjer, prije i nakon spremnika u kojima se dovodi kisik.

2.6.4. Uklanjanje suvišnog fosfora

Različite studije kanalizacije na području Sjedinjenih Američkih Država krajem 1960-ih procijenile su prosječne količine po osobi od 500 grama u urinu i fekalijama, 1000 grama u različitim deterdžentima sintetičkog porijekla te manje količine kemikalija za kontrolu korozije i vapnenačkih spojeva koji stvaraju kamenac u vodovodnim sustavima. Smanjenje fosfora postignuto je pomoću alternativnih formulacija deterdženata dok je prirodni sadržaj fosfora u urinu i fekalijama ostao nepromijenjen.

Uklanjanje fosfora u biološkom procesu je moguć jer u tom procesu postoje specifične kulture bakterija koje akumuliraju poli fosfate te se selektivno obogaćuju kako bi

akumulirale velike količine fosfora unutar svojih stanica (do 20% njihove sveukupne mase). Uklanjanje fosfora može se također postići kemijskom precipitacijom, obično pomoću soli željeza (npr. fer klorid) ili aluminijske soli (npr. aluminij sulfati) te vapna. Ovo može dovesti do veće proizvodnje mulja jer se spojevi s vodikom precipitiraju, a dodane kemikalije mogu biti skupe. U usporedbi s biološkim uklanjanjem, kemijsko uklanjanje fosfora zahtijeva značajno manji fizički prostor za opremu, lakše je za upravljanje procesom i često je pouzdanije od biološkog procesa uklanjanja. Također postoje i sustavi koji istovremeno koriste kombinirani biološki i kemijski proces uklanjanja fosfora. Kemijsko uklanjanje fosfora se u takvim sustavima koristi kao sigurnosni oblik uklanjanja u slučaju da biološko uklanjanje fosfora nije u stanju ukloniti dovoljne količine ili se koristiti kontinuirano u određenom omjeru kako bi se zadržala željena kvaliteta. Korištenjem obaju metoda uklanjanja fosfora, prednost je u tome što se ne povećava proizvodnja mulja kao što je slučaj s kemijskim uklanjanjem fosfora. Nedostatak ove metode su veći početni troškovi jer je potrebno instalirati dva različita sustava.

Nakon uklanjanja, mulj bogat fosfatima, može biti odvojen na odlagalište ili se koristiti kao gnojivo u mješavini s drugim obrađenim i odvojenim oblicima mulja iz otpadnih voda. U tom slučaju, tretirani mulj iz otpadnih voda ponekad se također naziva biosolidima. Oko 22% svjetskih potreba za fosforom moglo bi se zadovoljiti recikliranjem kućanskih otpadnih voda.

2.6.5. Tretmani otpadnih voda za prevenciju mikro zagađivača

Mikro zagađivači poput lijekova, sastojaka kućanskih kemikalija, kemikalija korištenih u malim poduzećima ili industriji, okolišnih postojanih farmaceutskih zagađivača ili pesticida ne uklanjaju se uvijek u uobičajenim procesima obrade otpadnih voda (primarna, sekundarna i tercijarna obrada) i zbog toga mogu uzrokovati zagađenje voda. Iako su koncentracije tih tvari i njihovih proizvoda razgradnje prilično niske, postoji rizik od štetnog djelovanja na vodene organizme. Za lijekove su identificirane sljedeće tvari kao toksikološki relevantne: tvari s učinkom narušavanja endokrinih funkcija, genotoksične tvari i tvari koje povećavaju razvoj bakterijske otpornosti.

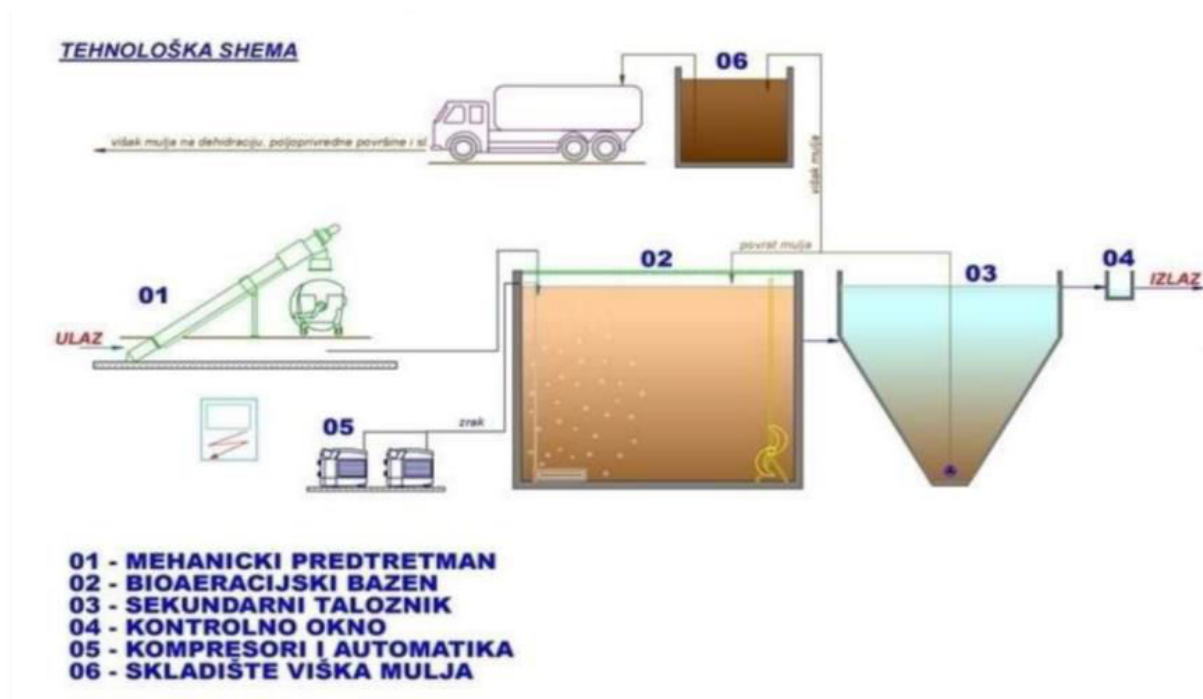
Tehnike za uklanjanje mikro zagađivača kroz četvrti stadij obrade tijekom obrade otpadnih voda primjenjuju se u Njemačkoj, Švicarskoj, Švedskoj i Nizozemskoj, dok su testovi u tijeku u nekoliko drugih zemalja. Takvi procesi uglavnom se sastoje od filtera s aktivnim ugljenom koji adsorbiraju mikro zagađivača. Kombinacija napredne oksidacije s

ozonom, praćena granuliranim aktivnim ugljenom (GAC), sugerirana je kao isplativa kombinacija tretmana za ostatke lijekova. Za potpuno smanjenje mikro plastike predložena je kombinacija ultra filtracije praćena GAC-om. Također, istražuje se korištenje enzima poput lakaze koju izlučuju gljive. Mikrobnne bio elektrane istražuju se zbog njihove sposobnosti za tretiranje organskog materijala u otpadnim vodama. Kako bi se smanjila prisutnost farmaceutskih tvari u vodama, istražuju se mjere kontrole izvora, poput inovacija u razvoju lijekova ili odgovornijeg rukovanja lijekovima. Pozitivan primjer istog je dobrovoljni program Nacionalna inicijativa za povrat lijekova u SAD-u koji je namijenjen općoj javnosti, a cilj mu je poticati ljude da vraćaju neiskorištene ili istekle lijekove umjesto njihova ispiranja ili bacanja u u kanalizaciju.

2.7. Obrada i odlaganje otpadnog mulja

Objedinjenim pojmom obrada mulja nazivaju se svi procesi koji se koriste za upravljanje i odlaganje mulja proizvedenog tijekom obrade otpadnih voda. Ti procesi obrade usmjereni su na smanjenje mase i obujma kako bi se smanjili troškovi odlaganja i po potrebi prijevoza (primjerice ako se isti koristi kao gnojivo), te za smanjenje potencijalnih zdravstvenih rizika koji mogu nastati prilikom različitih oblika odlaganja. Primarni način smanjenja težine i volumena je i uklanjanje vode što je pritom i najjednostavniji način. S druge strane, uništavanje patogena često se postiže zagrijavanjem tijekom kompostiranja ili čak spaljivanja za proizvodnju energije.

Metode obrade mulja ovise o količini proizvedenog mulja i troškova obrade koji su potrebni za dostupne opcije odlaganja. Isušivanje na zraku i kompostiranje mogu biti privlačne ukoliko postoje veliki prostori ili manji za ruralne zajednice, dok ograničena dostupnost zemljišta aerobnu biološku i mehaničko dehidraciju čini poželjnom za gradove, a ekonomski razlozi mogu potaknuti i različite oblike proizvodnje energije u metropolitanskim područjima (električna ili toplinska) [17].



Slika 15. Prikaz postrojenja za obradu otpadnih voda sa odvozom mulja

Obrada mulja usredotočena je na smanjenje težine i volumena mulja s ciljem smanjenja troškova transporta i odlaganja te na smanjenje potencijalnih zdravstvenih rizika od opcija odlaganja. Uklanjanje vode je glavni način smanjenja težine i volumena, dok se uništavanje patogena često postiže zagrijavanjem tijekom termofilne probave, kompostiranja ili spaljivanja. Odabir metode obrade mulja ovisi o volumenu proizvedenog mulja i o usporedbi troškova obrade potrebnih za dostupne opcije odlaganja. Sušenje na zraku i kompostiranje mogu biti privlačni za ruralne zajednice, dok ograničena dostupnost zemljišta može učiniti aerobnu probavu i mehaničko dehidriranje poželjnim za gradove. Ekonomije razmjera svakako mogu potaknuti alternativne metode uporabe energije u metropolitanskim područjima.

Većinski sastav mulja je voda s različitim količinama krutih materijala uklonjenih iz otpadnih voda. Primarno dobiveni mulj nastaje taloženjem krute tvari uklonjene tijekom obrade u sedimentacijskim spremnicima (primarna obrada). Sekundarni mulj odvojen je u sekundarnim sedimentacijskim spremnicima koji se koriste u bio reaktorima za biološku obradu ili procesima koji koriste anorganske metode oksidiranja. U procesima obrade otpadnih voda koji su intenzivni, proizvedeni je mulj potrebno kontinuirano uklanjati iz protočne linije zato što volumeni spremnika protočnoj liniji nemaju dovoljni kapaciteta za pohranu. To je potrebno raditi da bi se održala ravnoteža procesa obrade (proizvodnja mulja mora odgovarati uklanjanju mulja). Mulj koji je uklonjen iz tekuće linije prelazi u liniju za obradu. Aerobni procesi obično proizvode više mulja u usporedbi s anaerobnim

procesima. Ukoliko se koriste prirodnim procesima, kao što su konstruirane močvare i bazeni, proizvedeni mulj se sedimentacijom akumulira u za to predviđenom prostoru i jedinicama obrade, a ukloniti će se tek nakon što se postigne kritična masa (obično nakon nekoliko godina rada) [17].

Način na koji će se mulj obraditi ovisi o količini izdvojene krute tvari i uvjetima specifičnim za lokaciju na kojoj se odvajanje izvodi. U malim postrojenjima se najčešće primjenjuje kompostiranje, dok se aerobna obrada koristi za srednje velike operacije kako bi se ubrzao postupak, a anaerobna probava za veća postrojenja kako bi se najbrže obavljao željeni proces. Mulj ponekad prolazi kroz tzv. pred dehidriranje koje uklanja vodu. Tipovi predisušivača uključuju isušivanje mulja centrifugiranjem, rotacijske bubnjeve i trake za filtriranje. Dehidrirani mulj može se spaljivati (po mogućnosti u procesu stvaranja dodatne električne i toplinske energije) ili transportirati na mjesto za odlaganje na odlagalištu ili koristiti kao gnojivo.



Slika 16. Isušeni mulj koji se može koristiti kao gnojivo.

Kao što je već ranije spomenuto, energija se može povratiti iz mulja putem proizvodnje metana tijekom anaerobne razgradnje ili spaljivanjem suhog proizvoda, ali povrat energije često je nedovoljan kako bi osigurao isparavanje sadržaja vode iz mulja ili za trajno napajanje ventilatora, pumpi i mehaničkih pomagala za isušivanje. Primarni grubi/kruti materijali i mulj iz otpadnih voda mogu uključivati toksične kemikalije koje su uklonjene iz

tekućih otpadnih voda apsorbacijom na krute čestice u mulju. Kako kod proces isušivanja i smanjenja volumena mulja dolazi do povećanja gustoće istog, raste i koncentracija toksičnih tvari.

2.8. Procesi zbrinjavanja otpadnog mulja

Proces kondicioniranja i dehidracije mulja kao nužan korak u upravljanju otpadnim vodama, započinje zgušnjavanjem. Ova operacija ima za cilj povećanje koncentracije suhih tvari u mulju, a često se provodi u uređajima sličnim konvencionalnim taložnicama, ali opremljenim dodatnim mehanizmima za miješanje i flokulaciju. Dodatkom kemijskih reagensa, sirovi mulj iz primarnih ili sekundarnih spremnika za taloženje se transformira u čestice veće gustoće koje se brže talože, omogućujući efikasnije odvajanje tekućeg od čvrstog dijela. Ovaj postupak je ključan za smanjenje volumena mulja i pripremu za daljnje faze obrade, kao što su dehidracija i stabilizacija [12].

Nakupine mulja koje nastaju tijekom obrade otpadnih voda trebaju biti obrađene i zbrinute na siguran i efikasan način. U velikim postrojenjima često se koristi proces probave kako bi se smanjio volumen sirovog mulja.

Zgušnjavanje je obično prvi korak u obradi mulja. Mulj iz primarnih ili sekundarnih spremnika za taloženje može se miješati, često uz primjenu koagulanata, kako bi se stvorile veće nakupine koje se brže talože. Primarni mulj može se zgusnuti na približno 8 do 10 posto krutih tvari, dok se sekundarni mulj zgusne na oko 4 posto. Zgušnjivači po svom izgledu podsjećaju na spremnike za taloženje, ali s dodatkom mehanizama za miješanje. Mulj, zgusnut na manje od deset posto krutih tvari, prolazi kroz daljnju obradu, dok se višak tekućine vraća u sustav obrade otpadnih voda [12].

Smanjenje sadržaja vode u mulju može se postići centrifugiranjem, filtracijom i/ili isparavanjem, čime se smanjuju troškovi transporta tijekom zbrinjavanja ili se poboljšava prikladnost mulja za kompostiranje. Centrifugiranje se često koristi kao početni korak za smanjenje volumena mulja prije provođenja daljnjih procesa filtracije ili isparavanja. Filtracija može biti izvedena putem drenažnih cijevi u slojevima pijeska za sušenje ili kao samostalni mehanički proces koji koristi traku za filtriranje. Filtrat i centrat se najčešće vraćaju u proces obrade otpadnih voda. Nakon sušenja, mulj se klasificira kao krutina s udjelom vode od 50 do 75 posto. Muljevi s višim sadržajem vlage nakon sušenja obično se tretiraju kao tekuće tvari [12].

Muljevi se često tretiraju različitim metodama digestije s ciljem smanjenja udjela organske tvari te smanjenja broja patogenih mikroorganizama prisutnih u krutim tvarima. Najčešće korišteni postupci obrade uključuju anaerobnu digestiju, aerobnu digestiju i kompostiranje. Digestija mulja pruža značajne ekonomske prednosti, smanjujući volumen mulja za približno 50% te omogućujući proizvodnju bioplina koji predstavlja vrijedan izvor energije. Primarna svrha ovog procesa je smanjenje količine organskog materijala i patogena u krutim tvarima. Proces digestije često je optimiziran za proizvodnju metana, koji se može koristiti kao energent za potrebe postrojenja ili za komercijalnu prodaju.

Anaerobna digestija je biološki proces kojim bakterije razgrađuju mulj u uvjetima bez prisutnosti kisika. Ovaj proces može biti izveden kao termičko razgrađivanje, gdje se fermentacija mulja odvija u spremnicima na temperaturi od 55 °C ili kao mezofilna digestija na približno 36 °C. Iako termičko razgrađivanje omogućuje kraće vrijeme zadržavanja i zahtijeva manje spremnike, ona je energetski intenzivnija zbog potrebe za dodatnim zagrijavanjem mulja. Mezofilna anaerobna digestija (MAD) jedna je od uobičajenih metoda za obradu mulja u postrojenjima za pročišćavanje otpadnih voda, pri čemu se mulj uvodi u velike spremnike i ostaje najmanje 12 dana.

Iako proces može trajati i do 30 dana, zahtijevajući znatna početna ulaganja, mnogi veći objekti koriste bioplin za kombinirano grijanje i proizvodnju električne energije. Voda za hlađenje iz generatora često se koristi za održavanje temperature u postrojenjima na optimalnih 35 ± 3 °C. Ovaj pristup može rezultirati proizvodnjom veće količine električne energije nego što je potrebna za pogon samih strojeva. Na primjer, postrojenje za obradu mulja poput "T-PARK" u Hong Kongu koristi toplinu generiranu spaljivanjem mulja kako bi proizvodilo električnu energiju ne samo za vlastitu upotrebu, već i za javnu mrežu [12].

U procesu metano geneze, složeni proteini i ugljikohidrati razgrađuju se na jednostavnije spojeve poput vode, ugljikovog dioksida i metana. Proizvedeni bioplin, koji je bogat metanom, može se koristiti za grijanje spremnika ili za pogon motora i mikro turbina u drugim procesima na lokaciji, čineći proizvodnju metana jednom od glavnih prednosti anaerobne digestije.

Aerobna digestija je biološki proces u kojem bakterije razgrađuju organske tvari u prisutnosti kisika, a taj proces podsjeća na produžetak postupka aktiviranog mulja. U aerobnim uvjetima, bakterije brzo troše organske tvari, pretvarajući ih u ugljikov dioksid. Nakon što potroše sve raspoložive organske tvari, bakterije počinju umirati te postaju hrana za druge bakterije - endogena respiracija. U ovoj fazi dolazi do značajnog

smanjenja udjela čvrstih tvari. Iako aerobna digestija teče brže od anaerobne, zbog čega su početni kapitalni troškovi niži, operativni troškovi su znatno viši zbog velike potrošnje energije potrebne za rad ventilatora, pumpi i motora koji osiguravaju dovod kisika u proces. Međutim, najnovije tehnološke inovacije uključuju sustave filtracije s prozračivanjem bez uporabe električne energije, gdje prirodni zračni tokovi zamjenjuju električne uređaje za dovođenje kisika. Aerobna digestija također se može provoditi korištenjem sustava difuzora ili mlaznih dovoditelja kisika za oksidaciju mulja. Difuzori s finim mjehurićima često su isplativiji, no problem začepljenja zbog taloženja sedimenta u sitnim zračnim otvorima može otežati njihov rad. S druge strane, difuzori s grubim mjehurićima češće se primjenjuju u spremnicima s aktiviranim muljem ili tijekom faza flokulacije. Ključni kriterij pri odabiru vrste difuzora je osigurati odgovarajuću brzinu prijenosa kisika, koja je neophodna za učinkovitost procesa.

Tehnologije obrade mulja koje se koriste za zgušnjavanje ili dehidraciju proizvode dva glavna izlaza: zgusnuti ili dehidrirani mulj te tekuću frakciju koja se naziva tekućina za tretman mulja. Ove tekućine, poznate i kao tokovi dehidracije mulja ili likvori, kada potječu iz centrifuge ili filtrata (kada dolazi iz presa s trakama), zahtijevaju daljnju obradu jer su bogate dušikom i fosforom, posebno ako je mulj prošao kroz anaerobnu digestiju. Obrada tih tekućina može se provesti unutar postrojenja za tretman otpadnih voda, obično recikliranjem tekućine na početak procesa tretiranja, ili putem zasebnog procesa posebno namijenjenog za njihovu obradu.

Jedna od metoda za obradu tokova dehidracije mulja uključuje primjenu postupka za oporavak fosfora. Ova metoda nudi dodatnu prednost za operatere postrojenja za obradu otpadnih voda jer smanjuje nastajanje naslaga koje mogu uzrokovati začepljenje cijevi, pumpi i ventila. Takve naslage predstavljaju izazov u održavanju, osobito u postrojenjima za biološko uklanjanje nutrijenata, gdje je koncentracija fosfora u mulju povišena. Primjer ove tehnologije je proces koji nudi kanadska tvrtka Ostara Nutrient Recovery Technologies. Njihova metoda se temelji na kontroliranom kemijskom taloženju fosfora unutar reaktora s filmskim tekućim slojem, pri čemu se sloj oporavlja u obliku kristalnih peleta iz tokova dehidracije mulja. Dobiveni kristalni produkt prodaje se u poljoprivrednom sektoru, kao i u industriji travnjaka i ukrasnih biljaka, gdje se koristi kao gnojivo [12].

Kompostiranje je aerobni proces u kojem se otpadni mulj miješa s izvorima ugljika poput poljoprivrednih nusproizvoda, primjerice piljevine, slame ili drvenih sječka. U prisutnosti kisika, bakterije razgrađuju i mulj i biljni materijal, pri čemu se oslobađa toplina koja eliminira patogene mikroorganizme i parazite. Za održavanje aerobnih uvjeta s razinom

kisika od 10 do 15 posto, koriste se materijali koji osiguravaju prostor za cirkulaciju zraka unutar mulja. Tvrdi materijali, poput klipova kukuruza, ljuski od orašastih plodova ili usitnjenih drvenih ostataka, omogućuju bolju ventilaciju nego mekani biljni materijali poput lišća i trave.

Za kontrolu vlage, kompostne smjese mogu se slagati na betonske ploče s ugrađenim zračnim kanalima i prekrivati slojem nekomprimiranih materijala. Neugodni mirisi se smanjuju ventilatorskim sustavom koji izvlači zrak kroz kompostnu masu putem kanala i filtrira ga kroz sloj prethodno kompostiranog mulja. Tekućina koja se nakuplja u drenažnim kanalima vraća se u postrojenje za pročišćavanje otpadnih voda. Ploče za kompostiranje često su pokrivene kako bi se bolje kontrolirala vlažnost. Nakon odgovarajućeg vremena kompostiranja, smjesa se prosijava radi ponovne upotrebe neprobavljenih materijala, dok se kompostirani čvrsti materijal koristi kao poboljšivač tla, sličan tresetu.

Idealni omjer ugljika i dušika u smjesi za kompostiranje kreće se između 26:1 i 30:1. Ovaj omjer može varirati ovisno o količini potrebnoj za razrjeđivanje toksičnih kemikalija u mulju na sigurne razine za korištenje komposta. Iako većina poljoprivrednih nusproizvoda nema visok stupanj toksičnosti, ostaci trave iz predgrađa mogu sadržavati herbicide štetne za određene poljoprivredne namjene. Također, svježe kompostirani drveni proizvodi mogu imati fito toksine koji ometaju klijanje biljaka dok ih ne razgrade gljive prisutne u tlu.

Jednolika distribucija temperature potrebne za eliminaciju patogena može se postići dodavanjem izolacijskog sloja prethodno kompostiranog materijala na vrh kompostne mase. Početna vlaga smjese trebala bi biti oko 50 posto, no ako vlažni mulj poveća vlažnost iznad 60 posto, to može spriječiti postizanje potrebne temperature za uklanjanje patogena.

Spaljivanje mulja se također koristi, iako u znatno manjem opsegu. Ova metoda je manje raširena zbog zabrinutosti oko emisije štetnih plinova u atmosferu i dodatnih troškova za gorivo (najčešće prirodni plin ili lož ulje) koje je potrebno za sagorijevanje mulja s niskom kaloričnom vrijednošću i isparavanje preostale vode. Vrijednost goriva mulja, mjerena na osnovi suhih čvrstih tvari, varira od oko 9.500 britanskih toplinskih jedinica po funti (5.300 cal/g) za neprobavljeni otpadni mulj do 2.500 britanskih toplinskih jedinica po funti (1.400 cal/g) za probavljeni primarni mulj [12].

Najčešće korišteni sustavi za spaljivanje otpadnog mulja uključuju stepenaste višeslojne spalionice s visokim vremenom boravka i spalionice u tekućem sloju. Povremeno se

koristi i su-spaljivanje u postrojenjima za pretvorbu komunalnog otpada u energiju, što može biti isplativije ako su objekti već namijenjeni za čvrsti otpad i dodatno gorivo nije potrebno. Spaljivanje često rezultira povećanjem koncentracije teških metala u preostalom čvrstom pepelu, koji zahtijeva poseban tretman i zbrinjavanje. Međutim, opcija vraćanja vlažnog ispiranja u proces pročišćavanja otpadnih voda može smanjiti emisije u zrak povećanjem koncentracije otopljenih soli u ispuste postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda.

Jednostavni slojevi za sušenje mulja koriste se u mnogim zemljama, osobito u onima u razvoju, zbog svoje pristupačnosti i jednostavnosti u sušenju otpadnog mulja. Ovi slojevi obično nisu pokriveni, premda se ponekad koriste pokrivači, a odvodni vod mora se prikupiti. U početnim fazama procesa sušenja mogu se koristiti mehanički uređaji za okretanje mulja kako bi se poboljšala učinkovitost sušenja.

Slojevi za sušenje obično se sastoje od četiri različita sloja materijala [12]:

1. grubi šljunak - prvi sloj debljine 15 do 20 centimetara;
2. fini šljunak - drugi sloj debljine 10 centimetara;
3. pijesak - treći sloj debljine između 10 i 15 centimetara, koji djeluje kao filter između mulja i šljunka.

Tijekom procesa, mulj se suši, a voda se filtrira kroz slojeve, prodirući u prvi sloj, gdje se skuplja u odvodnoj cijevi smještenoj ispod svih slojeva.

Kada se tekući mulj proizvede, često je potrebna dodatna obrada kako bi postao prikladan za konačno odlaganje. Muljevi se obično zgusnu i/ili dehidriraju kako bi se smanjio volumen koji se transportira izvan lokacije za odlaganje. Proces koji smanjuje sadržaj vode uključuju [12]:

1. rastresanje u umjetnim lagunama/u sušilicama za mulj - ovaj proces proizvodi gustu masu koja se može primijeniti na zemljište ili spaliti;
2. prešanje - mehaničko filtriranje mulja kroz platnene mreže kako bi se dobila čvrsta torta;
3. centrifugiranje - koristi centrifugalnu separaciju kako bi se zgusnule čvrste tvari i tekućine.

Nakon obrade, muljevi se mogu odložiti injekcijom tekućine u zemljište ili na odlagalištima. Međutim, nijedna metoda ne eliminira potrebu za odlaganjem obrađenog otpadnog mulja.

Mnogi muljevi iz komercijalnih ili industrijskih područja mogu biti kontaminirani toksičnim materijalima koji se ispuštaju u kanalizaciju kroz industrijske ili komercijalne procese, kao i iz kućanskih izvora. Povećane koncentracije tih materijala mogu učiniti mulj neprikladnim za poljoprivrednu upotrebu, što može zahtijevati njegovo spaljivanje ili odlaganje na odlagalište. Unatoč ovim ograničenjima, primjena na poljoprivrednom zemljištu ostaje često korištena opcija.

Linija za obradu mulja uključuje pumpnu stanicu za povratni i višak mulja (pri čemu se povratni mulj može smatrati dijelom biološkog tretmana), primarni mulj iz skupljača, plutajući mulj iz sekundarnog skupljača, zgušnjavanje mulja, anaerobno probavljanje, mehaničku dehidraciju i odlaganje mulja.

Primarni mulj, izdvojen iz primarnog skupljača, pumpa se u prethodni sedimentni spremnik putem posebne pumpne stanice, zajedno s plutajućim muljem iz sekundarnog skupljača. Pumpna stanica povratnog i viška mulja ima dvostruku funkciju – pumpanje mulja iz sekundarnog skupljača natrag u biološki označavajući bazen (preko anaerobnog bazena) te odvođenje viška mulja iz biološke faze pročišćavanja. Obe tlačne linije opremljene su mjeracima protoka. Višak mulja pumpa se ovisno o sadržaju suhe tvari u označavajućem bazenu.

Sav mulj izdvojen iz otpadnih voda vodi se u prethodni zgušnjivač, koji je oblikovan kao cilindrični bazen. U tom bazenu, mulj iz različitih faza tretmana otpadnih voda miješa se pomoću zgrtača s vertikalnim šipkama i gravitacijski se zgušnjava. Osim toga, ovaj prethodni zgušnjivač služi i kao među spremnik za opskrbu anaerobnog digestora. Zgusnuti i homogenizirani mulj se pomoću muljnih pumpi doprema u anaerobni digestor. Za opskrbu digestora muljem predviđene su tri muljne pumpe u suhoj izvedbi - dvije radne pumpe i jedna rezervna pumpa. Cijela zapremina digestora mora biti reciklirana barem jednom dnevno. Također, sustav uključuje izmjenjivač topline tipa "cijev u cijev" koji zagrijava mulj na temperaturu od približno 35 do 37 °C, što je neophodno za pravilno odvijanje procesa digestije.

Dva kružna anaerobna digestora predviđena su za stabilizaciju mulja i proizvodnju plina. Mulj se unutar digestora homogenizira pomoću miješalica koje rade ciklično, otprilike četiri puta dnevno. Kao što je već navedeno, recirkulacija mulja mora se odvijati najmanje jednom dnevno. Dok se mulj pumpa iz prethodnog zgušnjivača, stabilizirani mulj automatski se odvodi u naknadni zgušnjivač putem preljevnog sustava. Tijekom anaerobne stabilizacije, proizvedeni bioplin se odvodi u liniju plina. Proces stabilizacije

mulja je bio-kemijski proces koji se odvija u odsutnosti zraka, ali ne i kisika. Ključne za digestiju mulja su anaerobne bakterije koje razgrađuju mulj u dva koraka.

Veće molekule se dijele na manje, a otpadne tvari metaboliziraju. Ugljik i kisik se koriste iz kemijskih spojeva organske tvari, pri čemu nastaju alkohol, organske kiseline, H_2S , H_2 , CO_2 i male količine CH_4 . Mnoge od ovih tvari, otopljene u vodi, reagiraju kiselo.

U trećoj fazi, octene bakterije proizvode octenu kiselinu, H_2 i CO_2 . Četvrta faza anaerobne digestije, koja je ključna za funkcioniranje postrojenja, uključuje stvaranje CH_4 . Bakterije koje proizvode metan razgrađuju organsku materiju do osnovnih molekula, pri čemu nastaju NH_3 , CO_2 i CH_4 . CO_2 i CH_4 izlaze iz sustava, dok se NH_3 u prisutnosti vode pretvara u NH_4OH .

Stabilizirani mulj se zatim odvodi u naknadni zgušnjivač, koji je identičan prethodnom i služi za homogenizaciju mulja prije mehaničke dehidracije. Voda se gravitacijski vraća na početak uređaja za pročišćavanje.

2.9. Alternativni načini sušenja mulja

Muljevi nakupljeni tijekom procesa obrade otpadnih voda moraju se obraditi i zbrinuti na siguran i učinkovit način. U mnogim velikim postrojenjima, sirovi muljevi smanjuju se u volumenu postupkom digestije.

Postoje tri glavna razloga zašto sušenje mulja iz otpadnih voda može biti korisno:

1. smanjenje sadržaja vode (ili vlage) u mulju i, posljedično, volumena više nego što je moguće mehaničkim sredstvima;
2. prilagodba mulja za obradu određenim termo kemijskim metodama, prvenstveno spaljivanjem i pirolizom;
3. proizvodnja stabiliziranog proizvoda, tj. onog koji je u velikoj mjeri oslobođen patogenih organizama i mirisa te nije podložan truljenju (tj. sklon raspadanju).

Smanjenje sadržaja vlage povećava koncentraciju organskog ugljika i time energetske vrijednost mulja, koja se obično izražava u jedinicama mega-džula po kilogramu suhe tvari mulja (MJ/kg DS).

Druge jedinice za stabilizaciju mulja uključuju anaerobnu digestiju (AD) i termo kemijske metode. Termo kemijske metode primjenjuju agresivnije uvjete zagrijavanja od onih

korištenih za sušenje mulja, pretvarajući krute tvari u stabilan čvrsti proizvod u obliku ugljena uz plinovite produkte koji mogu, ali i ne moraju, imati kalorijsku vrijednost ovisno o korištenoj termo kemijskoj metodi.

Sušenje mulja također bitno mijenja njegovu prirodu i konzistenciju. Mulj osušen na manje od 65% suhe tvari (DS) može postojati kao pelete ili, pri najvećim koncentracijama suhih tvari od 90% ili više, kao prah. Oba ova oblika lakše se prenose od odvlaženog mulja s višim udjelom vode, koji postoji u obliku velikih grudica koje se mogu transportirati samo pomoću pokretne trake.

Kada se mulj osuši, prolazi kroz tri različite faze dok voda isparava:

1. Prilagodba/preliminarna faza;
2. Faza konstantne brzine sušenja;
3. Faza opadajuće brzine sušenja.

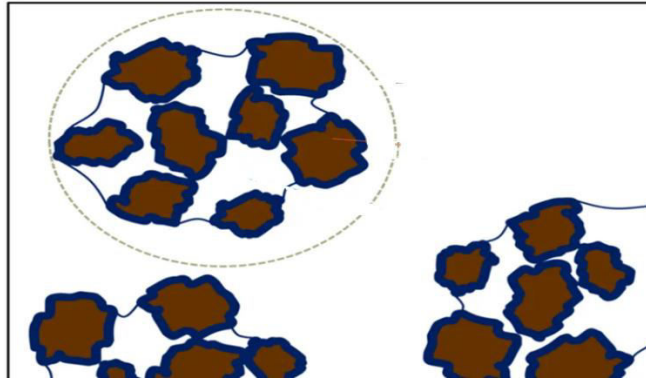
Tijekom prilagodbene/preliminarne faze, brzina isparavanja vode brzo raste do gotovo konstantne vrijednosti. Proces zatim nastavlja s gotovo konstantnom brzinom sušenja dok se ne ukloni najpristupačnija slobodna voda.

Muljevi različitog podrijetla i karakteristika pokazuju različita ponašanja pri sušenju. To se najlakše uočava usporedbom masene pretvorbe vode – mase isparene vode po jedinici površine čvrstih tvari po jedinici vremena ($\text{kg m}^2/\text{s}$) – u odnosu na sadržaj vlage u mulju. Ova korelacija obično otkriva tri različite faze sušenja.

Nakon uklanjanja većine slobodne vode – vode koja nije povezana s flokulama – brzina sušenja se smanjuje, što odgovara fazi opadajuće brzine sušenja. Ova faza može imati dvije prepoznatljive zone, koje odgovaraju uklanjanju:

- a) intersticijalne vode – vode koja se nalazi unutar flokula, ali nije povezana s čvrstim tvarima, i
- b) površinske vode – vode koja je izravno povezana s česticama čvrste tvari i vezana za njihove površine vodikovim vezama.

Isparavanje više od ~95% ukupne vode obično nije izvedivo niti nužno. Posljednjih 5% vlage odnosi se na površinsku vodu, koju je mnogo teže ukloniti. Stoga, termičko sušenje obično ima za cilj ukloniti većinu intersticijalne vode zajedno sa slobodnom, kako bi se proizveo proizvod s ~90% suhe tvari (DS) ili više.



Slika 17. Primjer zadržavanja vode u česticama mulja

Mulj s ~10% sadržaja vlage ili manje stabiliziran je, lako se prenosi (budući da je u granuliranom ili prahastom obliku) i općenito je prikladan za:

1. krajnju upotrebu, primjerice kao sredstvo za poboljšanje tla ili
2. obradu pomoću "suših" termo kemijskih metoda poput spaljivanja, pirolize ili plinifikacije.

Krivulja sušenja mulja može se koristiti za određivanje ključnih parametara dizajna sušača kao što su temperatura i vrijeme zadržavanja. Brzina i opseg sušenja utječu na mehanička svojstva mulja, koja se značajno mijenjaju tijekom procesa sušenja kako se sadržaj vode smanjuje.

Tablica 1. Ovisnost ponašanja mulja ovisno o koncentraciji vlage

Koncentracija mase krutih tvari (% suhe tvari)	Mehanička svojstva mulja
< 40%	Na početku procesa – kada je sadržaj vlage najviši i brzina isparavanja raste – mulj nalikuje pasti.
~40 – ~50%	Mulj počinje stvarati grudice te postaje "ljepljiv" i težak za manipulaciju.
>70%	U trenutku kada nema dovoljno vlage za održavanje ovih grudica, one se urušavaju i formiraju granule ili prah.

Sušenje mulja zahtijeva pažljivu kontrolu. Sušači se obično dizajniraju kako bi izbjegli "ljepljivu" fazu, čime se sprječavaju problemi s rukovanjem te se formira slobodno protočan proizvod u obliku granula ili praha. To se postiže bilo povratnim miješanjem ili agitacijom.

Kod povratnog miješanja, ulazni dehidrirani mulj miješa se s dijelom prethodno osušenog zrnastog materijala iz sušača kako bi se dobio mulj s prosječnim sadržajem vode ispod razine povezane s ljepljivom fazom. Ovaj miješani proizvod zatim se uvodi u sušač radi daljnjeg smanjenja sadržaja vode. Agitacija sprječava nastanak ljepljivog mulja učinkovitom mješavinom tijekom problematične ljepljive faze kako bi se održalo kretanje mulja. Time se osigurava da se grudice brzo raspadaju prije nego što postanu ljepljive.

Kontrola svojstava mulja tijekom sušenja je ključna. U određenim uvjetima, te kod određenih karakteristika mulja, čestice prašine mulja mogu eksplodirati ili se krute tvari mogu samozapaliti. Ti se rizici mogu smanjiti prekrivanjem inertnim plinom.

Sušenje mulja ima za cilj ukloniti vodu, za razliku od termokemijskog procesa koji uništava krute tvari. Tijekom sušenja mulja, temperatura krutih tvari obično se održava između 60 i 93 °C. Temperatura zraka znatno je viša od ovog raspona temperature krutih tvari kako bi se potaknulo isparavanje vode.

Pod uvjetima sušenja s konstantnom brzinom, brzina gubitka vode proporcionalna je:

1. površini navlaženih čestica,
2. razlici u temperaturi i sadržaju vode između zraka za sušenje (tj. njegove temperature i vlažnosti) i površine mulja, i
3. intenzitetu mehaničke i plinske agitacije čestica mulja.

Proces sušenja vrlo je energetski izazovan, zahtijevajući do 1400 kWh energije po toni isparene vode, pri čemu se vrijednosti obično kreću u rasponu od 700 do 1000 kWh/t. Iako se potrošnja energije može smanjiti do 20% pomoću povrata energije, ona predstavlja značajan trošak obrade mulja, što je potrebno kompenzirati dodatnom vrijednošću sušenog proizvoda.

Kod spaljivanja, najčešćeg procesa uništavanja mulja nakon sušenja, latentna energija (ili kalorijski sadržaj u MJ po kg) mulja se iskorištava sagorijevanjem organskih krutih tvari. Generirana toplina se vraća i pretvara u korisnu energiju korištenjem kombiniranih sustava za proizvodnju topline i električne energije. Tako dobivena energija više je nego

dovoljna za nadoknadu energije potrebne za sušenje mulja do točke kada je prikladan za spaljivanje. Budući da sušači uglavnom koriste toplinsku energiju, potencijalno se može koristiti bilo koji izvor topline. To uključuje bioplin dobiven anaerobnom digestijom (AD); međutim, za razliku od spaljivanja, kod AD procesa nije potrebno termički sušiti mulj prije obrade.

Ukupna potreba za energijom, izražena u kWh po toni suhe tvari mulja, ovisi i o sadržaju vode u ulaznom mulju i o toplinskoj učinkovitosti samog procesa sušenja. Ulazni mulj gotovo se uvijek mehanički odvlažuje do najnižeg mogućeg sadržaja vlage, zbog čega ima gustu, pastoznu konzistenciju. U ovom obliku može se usitniti ili izmiješati prije unošenja u sušač kao grubi, vlažni granulati.

Sušenje mulja proizvodi i plinske i tekuće otpadne tokove. Svi ispušteni plinovi zahtijevaju obradu prije ispuštanja kako bi se uklonile čestice prašine i neugodni mirisi. Budući da zadržavaju nešto latentne energije nakon upotrebe, često se recikliraju natrag u sušač nakon pročišćavanja. Također, ulaganje u povrat topline iz ovog toka može biti isplativo kod energetski intenzivnijih procesa.

Procesi sušenja mulja općenito se dijele u tri glavne kategorije:

1. konvektivno (ili direktno) sušenje;
2. konduktivno (ili indirektno) sušenje i
3. solarno sušenje.

Izbor metode sušenja ovisi o klimatskim uvjetima, dostupnosti energije, troškovima te specifičnim karakteristikama mulja i ciljevima obrade.

Konvektivni (ili direktni) sušači najčešće se koriste za sušenje otpadnog mulja. Čestice mulja dolaze u izravan kontakt s vrućim plinom – zrakom ili parom – koji pruža toplinu potrebnu za isparavanje vode. Budući da proces zahtijeva značajan volumen zraka, zrak se često recirkulira prije ispuštanja, kako bi se uštedjela energija.

Konvektivni sušači mogu biti konfigurirani kao:

1. Trake za prijenos: Mulj se raspoređuje na pokretnim trakama, a vrući zrak prolazi kroz mulj, čime se uklanja voda. Ova konfiguracija omogućava kontinuirani proces sušenja, ali zahtijeva dosta prostora.
2. Fluidizirani slojevi: Mulj se miješa s vrućim zrakom koji stvara fluidizirani sloj, čime se poboljšava ravnomjerno sušenje. Ova metoda omogućava bolju kontrolu temperature i veću učinkovitost.

3. Rotirajući bubnjevi: Mulj se stavlja u rotirajući bubanj, a vrući zrak prolazi kroz mulj kako bi ispario vodu. Ova konfiguracija često se koristi zbog svoje jednostavnosti i učinkovitosti.
4. Pneumatski sušači: U ovom tipu sušača, mulj se brzo susreće s vrlo vrućim zrakom, čime se brzo uklanja voda. Ovi sušači često se koriste za sušenje mulja s nižim sadržajem vlage.

Većina konfiguracija konvektivnih sušača zahtijeva povratno miješanje dijela suhog mulja s ulaznim muljem kako bi se spriječilo da mulj prođe kroz ljepljivu fazu.

Kod sušenja kondukcijom, mulj se zagrijava indirektno dovodenjem u kontakt s površinom koja je zagrijana parom ili sustavom vrućeg ulja. Primjeri konduktivnih procesa uključuju:

1. Sušače s lopaticama: Mulj dolazi u kontakt s rotirajućim lopaticama koje prenose toplinu s površine na mulj, čime se potiče isparavanje vode.
2. Sušače s diskovima: Mulj se širi na rotirajuće diskove, koji su zagrijani parom ili vrućim uljem, a voda se uklanja putem kondukcije.
3. Sušače s tankim slojem: Mulj se nanosi u tankom sloju na zagrijanu površinu, obično pod niskim vakuumom, čime se ubrzava proces isparavanja.

Solarni sušači imaju oblik velikih staklenika u koje se mulj unosi kontinuirano ili u serijama. Solarno sušenje koristi sunčevu energiju za postupno uklanjanje vlage iz mulja, čineći ovaj proces ekološki prihvatljivim i ekonomičnim u područjima s dovoljno sunčeve svjetlosti.

Prije konačnog odlaganja i/ili uporabe mulja sirovi je mulj potrebno obraditi. Obrada mulja ovisi i o načinu njegove uporabe. Mulj iz otpadnih voda nije bezvrijedan materijal jer sadrži oko 70 % organske tvari čija se energetska vrijednost može iskoristiti. Ogrijevna moć suhe organske tvari ovisna je o vrsti mulja te je procijenjena kao srednja vrijednost od 25.000 KJ/kg kod neobrađenog mulja, a do 12.000 KJ/kg kod anaerobno stabiliziranog mulja. Energijska vrijednost mulja može se iskoristiti tijekom obrade, kao na primjer pri proizvodnji bioplina kod anaerobne stabilizacije ili iskorištavanjem energijskog potencijala pri termičkoj stabilizaciji. Mulj sadrži i određenu količinu hranjivih tvari koje se mogu iskoristiti (dušik, fosfor, kalij).

Tablica 2. Sadržaj hranjivih tvari u mulju

Sadržaj hranjivih tvari u mulju	
Element	% od suhe tvari
Dušik	3-7
Fosfor	2-7
Kalij	<1,5

Troškovi obrade i zbrinjavanja mulja kod uređaja manjih kapaciteta iznose gotovo 50% ukupnih troškova poslovanja. Procesi obrade mulja su različiti i mogu se kombinirati na razne načine, što ovisi o veličini uređaja i načinu iskorištavanja mulja.

Najbitnije je smanjiti volumen mulja odnosno iz njega ukloniti što više vode. Obrada mulja bazirana je na tri osnovne faze: zgušnjavanje, stabilizaciju i odvodnjavanje ili dehidraciju. Postotak vlažnosti, odnosno postotak suhe tvari u mulju je jedan od osnovnih pokazatelja bitnih za odabir tretmana mulja, iz čega proizlazi da mulj može biti: tekući sa 1 – 10 % ST, vlažni sa 10 – 30 % ST, kruti sa 30 – 90 % ST i osušeni sa > 90 % ST. Slika 5. prikazuje pojednostavljeni grafički prikaz procesa obrade mulja.

2.10. Zakonska regulativa

Regulatorni i pravni prostor koji određuje kako će se sustavno postupati s muljem iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda dijeli se na tri upravna sektora:

1. sektor za zaštitu okoliša,
2. sektor za gospodarenje vodama,
3. sektor za gospodarenje poljoprivrednim zemljištem.

Kvaliteta rješenja, učinkovitost i održivost sustava zbrinjavanja mulja koji nastaje kao nusprodukt pročišćavanja otpadnih voda izravno ovisi o usklađenosti, ekonomskoj mogućnosti i ekološkom kapacitetu sustava propisa koje donose nabrojeni sektori. Važnu

ulogu imaju djelatnosti javne odvodnje jer uključuju i obavljanje procesa obrade mulja čime je odgovornost za odgovarajuće zbrinjavanje mulja delegirana na jedinice lokalne samouprave i njihovog komunalnog društva koja su nadležna za zbrinjavanje otpadnih voda, samim time i mulja. Tako se potpuno primjenjuje načelo “onečišćivač plaća”, čime je onečišćivač dužan otkloniti onečišćenje koje unosi u okoliš.

U Republici Hrvatskoj potrebno je potaknuti unaprijeđenije zakonske regulative i projekte izgradnje uređaja za pročišćavanje otpadnih voda koji uključuju ne samo obradu voda, već i obradu i zbrinjavanje mulja. Otpadne vode (sanitarne, industrijske, oborinske) sadrže različite vrste i količine otpadne tvari. Radi očuvanja okoliša u ekološkom, zdravstvenom i estetskom pogledu, otpadne tvari prije ispuštanja u okoliš moraju se obraditi, a ostatak koji se pojavljuje kao nusprodukt obrade odložiti na neškodljiv način.

Pri donošenju odluke o načinu obrade i konačne dispozicije (odlaganja) mulja izdvojenog u postupcima pročišćavanja voda potrebno je voditi računa o relevantnoj zakonskoj regulativi, odnosno o odredbama i propisima koji su na snazi. Na žalost Hrvatsko zakonodavstvo ne nudi puno opcija po pitanju uporabe i zbrinjavanja mulja.

Sam posao uporabe i zbrinjavanja mulja nije atraktivan sa financijskog aspekta. Prije svega na iskorištavanje mulja treba gledati kao na rješavanje ekološkog problema. Oporabom mulja prije samog zbrinjavanja mogu se umanjiti materijalni izdaci cjelokupnog procesa rješavanja problematike mulja. Okvir politike zbrinjavanja mulja definiran je s tri zakona, a detaljnije razrađeni aspekti gospodarenja muljem su sadržani u sedam podzakonskih akata. Konačno zbrinjavanje mulja i sve aktivnosti vezane za zbrinjavanje sadržane su u dvije strategije i više planova. Uz probleme zbrinjavanja mulja, posredno su vezani i propisi Zakona o poljoprivredi, osobito u dijelu koji se odnosi na pitanje upravljanja pa time i zaštite poljoprivrednog zemljišta. Politika gospodarenja muljem nije bila posebno razmatrana kao zasebna tema, nego je uzeta kao dio ukupne politike zbrinjavanja otpada, što je rezultiralo nedorečenošću propisa i dokumenata koje su donosila različita državna i lokalna upravna tijela. Sve to dovelo je do problema provedbi propisa u praksi i do usporavanja, čak i zaustavljanja realizacije projekata, a time i do kašnjenja realizacije planova.

Korištenje mulja u poljoprivredi bez prethodne obrade je, u skladu s EU Direktivom za mulj [24], EU direktivom za otpadne vode [25] i hrvatskim nacionalnim zakonima kao što je Pravilnik o gospodarenju muljem iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda kada se mulj koristi u poljoprivredne svrhe [26] i Pravilnik o zaštiti poljoprivrednog zemljišta od

onečišćenja [27], neprimjenjiv i zabranjen. U poljoprivredi se smije koristiti samo stabilizirani mulj u kojem su uništeni patogeni organizmi, potencijalni uzročnici oboljenja. Prema Pravilniku "obrađeni mulj" označava mulj koji je podvrgnut biološkoj, kemijskoj ili toplinskoj obradi, dugotrajnom skladištenju (najmanje šest mjeseci) ili nekom drugom postupku kojim je znatno smanjena razgradnja i opasnost po zdravlje. U Hrvatskoj odlaganje mulja na odlagalištima nije dopušteno, kao rezultat Pravilnika o uvjetima i načinima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagališta otpada i daljnjim navodima da prihvaćanje "otpada ako njegova masa biorazgradivih komponenti prelazi 35% ukupne težine" je također zabranjeno. Biološki stabilizirani mulj uvijek sadrži više od 35% biorazgradive tvari. Za slučaj termičke oksidacije mulja nema posebnih propisa. Primjenjuju se propisi koji se koriste kod spaljivanja krutog otpada, odnosno propisa donesenih temeljem Pravilnika o termičkoj obradi otpada (NN 75/2016), Uredbe o razinama onečišćujućih tvari u zraku (NN 117/12) i Zakona o zaštiti zraka (NN 130/11, 47/14).

Zgušnjavanje mulja je proces u kojem se dolazi do smanjenja volumena mulja, kako bi se smanjili troškovi njegove kasnije obrade, kao i troškovi izgradnje objekata koji slijede na liniji mulja. Ovisno o svojstvima mulja i primijenjenom tehnološkom rješenju, zgušnjavanjem se postiže koncentracija suhe tvari u mulju od 2 do 12% suhe tvari. Razlikuju se tri osnovna postupka: gravitacijsko zgušnjavanje, zgušnjavanje [37] isplivavanjem i mehaničko zgušnjavanje (centrifuga, gravitacijska traka i rotacijski bubanj).

Stabilizacijom mulja postiže se inhibicija, smanjenje ili eliminacija mogućnosti daljnjeg truljenja mulja (razgradnje organske tvari uz pomoć mikroorganizama). Trenutno najbolji postupci stabilizacije mulja su: biološka stabilizacija i kemijska stabilizacija. Posebno treba izdvojiti biološku stabilizaciju mulja. Biološka stabilizacija mulja podrazumijeva primjenu jednog od dva postupka biološke razgradnje organske tvari – aerobni (uz prisutnost kisika) ili anaerobni (bez prisutnosti kisika). Kod srednjih i većih uređaja obično se primjenjuje anaerobna stabilizacija. Anaerobna stabilizacija je jedini biološki postupak kojim se može iskoristiti energijska razina mulja i to proizvodnjom bioplina. Bioplin koji je proizvod anaerobne stabilizacije sadrži oko 2/3 metana i 1/3 ugljikovog dioksida i ima donju ogrjevnu moć od 6,63 kWh/m³ plina.

Kemijska stabilizacija uz pomoć vapna posebno je prikladna zbog dostupnosti sirovine. Upotrebom vapna otpadni se mulj može učiniti neprikladnim za preživljavanje mikroorganizama. Vapno se dodaje neobrađenom mulju u dovoljnoj količini za podizanje

pH na 12 i više čime se stvara okruženje koje nije pogodno za opstanak mikroorganizama. Sve dok se pH održava na toj razini, mulj neće trunuti, stvarati neugodne mirise ili predstavljati opasnost za zdravlje. Kao alkalni materijal najčešće se koriste hidratizirano vapno (Ca(OH)_2) i živo vapno (CaO). Kao zamjena za vapno može se koristiti praškasto gorivo pepela, prašina vapnenca i karbidno vapno. Dodatkom živog vapna u mulj, ono reagira s vodom iz mulja te nastaje hidratizirano (gašeno) vapno.

Dehidracija mulja je postupak kojim se iz mulja uklanja voda. Ovisno o svojstvima mulja, primijenjenom tehnološkom rješenju te mogućnosti dodavanja određenih kemijskih sredstava (CaO , FeCl_3 i dr.), dehidracijom se postiže koncentracija suhe tvari u mulju 25-35 % ST. Dva su osnovna tehnološka rješenja dehidracije mulja: fizikalno uklanjanje vode (polja za sušenje mulja), mehaničko uklanjanje vode (centrifuge, trakaste filter preše, vakuumske filter preše).

Uz prethodno izdvojena tri osnovna postupka obrade mulja, izdvajaju se i neke dodatne faze obrade mulja koje se prema potrebi mogu primijeniti: kondicioniranje, sušenje, pasterizacija, spaljivanje, ostakljivanje i kompostiranje.

Svrha kondicioniranja mulja je poboljšanje njegovih karakteristika kako bi se lakše zgusnuo i/ili dehidrirao. Mulj se može kondicionirati kemijskim ili termalnim tehnikama. Kemijskim kondicioniranjem mulja može se smanjiti sadržaj vlage u mulju sa 90 do 99%, sa 65 do 85%, ovisno o prirodi tretiranog mulja. Ono rezultira koagulacijom krutina i otpuštanjem apsorbirane vode. Kod kemijskog kondicioniranja mogu se koristiti kemikalije poput željeznog klorida, vapna te organskih polimera. Nakon provedenog procesa kemijskog kondicioniranja slijede mehanički procesi odvajanja vode najčešće uporabom centrifuga ili filter preša.

Termalno kondicioniranje mulja podrazumijeva zagrijavanje mulja u kratkom vremenskom periodu pod određenim tlakom. Mulj se zagrijava na temperaturu od 180 °C do 200 °C pod tlakom od 12 bara do 15 bara kroz 30 do 40 minuta. Na taj način dolazi do koagulacije krutina, razbijanja strukture mulja i redukcije vode u mulju. Nakon ovakvog postupka mulj je steriliziran i dehidriran.

Prednosti termalnog kondicioniranja su:

1. sadržaj krutih tvari u procesiranom mulju iznosi od 30% do 50%,
2. procesirani mulj nije potrebno kemijski kondicionirati,
3. uništavanje većine patogena.

Kao alternativa metodama koje se obično koriste, predstavljena je nova metoda temeljena na grijanju pomoću mikrovalova. Za razliku od ostalih metoda pirolize kojima se kanalizacijski mulj prethodno suši u zasebnom procesu, mokri kanalizacijski mulj (do 70% vlažnosti) koristi se kao početni materijal u procesu. Tako se mulj tijekom početnih koraka procesa suši, potpuno koristeći efikasno mikrovalno sušenje. Korištenjem dovoljne količine energije, mogu se dostići temperature do 42 1000 0C ili više. Preferira se korištenje visokih temperatura kako bi se povećao prinos frakcije plina kojim se općenito lakše rukuje nego uljnom frakcijom. Na tim temperaturama se, osim pirolize kanalizacijskog mulja, odvija i hidro-plinifikacija. Zbog jedinstvenih obilježja mikrovalnog grijanja, odnosno direktnog grijanja unutar mase i visoke temperature (cca. 200 0C/min), formiraju se velike količine pare na temperaturama na kojima se odvija reakcija plinifikacije. Proizvedena para se uz pomoć parne turbine može pretvoriti u električnu energiju. Slijedom toga sušenje, piroliza i plinifikacija odvijaju se u jednom i relativno brzom procesu. Postupak je još uvijek u razvoju te do sada nema značajnijih primjena u obradi mulja s UPOV-a.

Za postizanje pasterizacije potrebno je najmanje 30 minuta na 70 °C ili 4 sata na 55 °C. Prethodne vrijednosti koriste se kao projektni parametri. Ovo kratko vrijeme izlaganja zahtijeva relativno malu posudu.

Može se koristiti jedna od slijedećih metoda zagrijavanja mulja:

1. plinsko grijanje protočne vode koja zagrijava mulj u toplinskom izmjenjivaču,
2. izravno grijanje mulja pomoću sagorijevanja plina, iznad ili unutar mulja ili
3. mikrovalna obrada u neprekidnom pogonu (sistem trake) sa povećanjem molekularne vibracije vode sadržane u mulju.

Iskustva i istraživanja pokazala su da pasterizacija prije digestije uvelike smanjuje učestalost ponovne zaraze, nego pasterizacija nakon digestije. To je zbog toga što proces digestije u mulju ostavlja benigne organizme koji sprječavaju širenje patogena. Stoga se ovaj proces često naziva pred-pasterizacija.

2.11. Buduće tehnologije

Rekuperacija fosfora iz otpadnog mulja ili iz tokova dehidracije mulja dobiva sve veću pažnju, osobito u Švedskoj, Njemačkoj i Kanadi zbog ograničenosti fosfora kao resursa (poznatog kao "vrhunac koncentracije fosfora") i njegove važnosti kao gnojiva za opskrbu

rastuće globalne populacije. Metode za povrat fosfora iz otpadnih voda ili mulja mogu se klasificirati prema vrsti korištenog materijala (otpadne vode, tekućina iz mulja, obrađeni ili neobrađeni mulj, pepeo) ili prema vrsti procesa povrata (precipitacija, mokra-hemijska ekstrakcija i precipitacija, termička obrada) [12].

Termička hidroliza je dvofazni proces koji uključuje kuhanje mulja pod visokim pritiskom, nakon čega slijedi brza dekompresija. Ova kombinacija djelovanja sterilizira mulj i čini ga biološki razgradivijim, poboljšavajući performanse digestije. Sterilizacija uništava patogene u mulju, čime se zadovoljavaju strogi zahtjevi za primjenu na zemljištu (poljoprivreda). Sistemi za termičku hidrolizu rade u postrojenjima za tretman otpadnih voda u Europi, Kini i Sjevernoj Americi i mogu generirati elektricitet, kao i visokokvalitetni mulj [12].

Nedavno je predloženo korištenje zelenih pristupa, poput fitoremedijacije, kao vrijednog alata za poboljšanje otpadnog mulja kontaminiranog tragovima elemenata i postojećim organskim zagađivačima [12].

3. POSTAVKA ZADATKA

Predviđeni projektirani kapacitet za uređaj koji je potrebno instalirati je ispod 100.000 ekvivalentnih stanovnika (u danjem tekstu ES). Prema dostupnim informacijama, godišnja proizvodnja mulja iznosi 2.000 tona, što odgovara opterećenju od 28.000 ES. Kako bi se ostavilo prostora za rast grada i područja o kome ovisi, potrebno je odabrati uređaj koji bi zadovoljavao opterećenje od 60.000 do 100.000 ekvivalentnih stanovnika.

U praktičnom dijelu, na primjeru grada od 60.000 stanovnika u središnjoj Hrvatskoj i sustava, koristeći dostupne ulazne podatke, dimenzionirati će se:

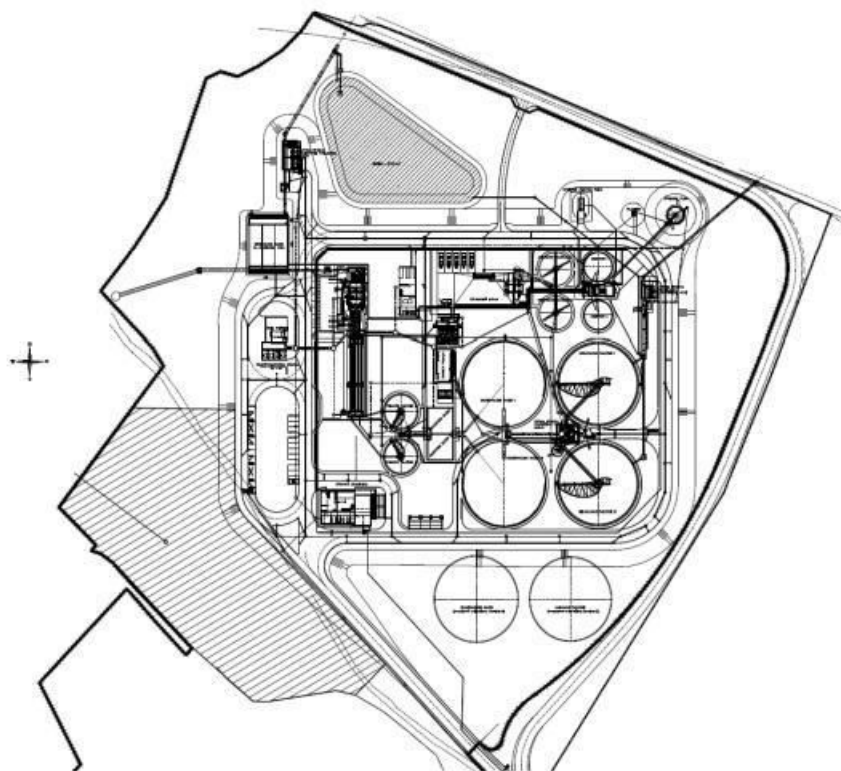
- sustav za odvajanje i solarno isušivanje otpadnog mulja te
- pumpa za prepumpavanje mulja iz retencijskih bazena.

4. RAZRADA ZADATKA - PRAKTIČNI DIO

4.1. Solarno sušenje mulja

Solarno sušenje mulja je metoda toplinske obrade koja smanjuje ukupnu masu mulja i troškove njegovog odvoza. Ovaj pristup razvijen je kao ekonomski povoljnija alternativa tradicionalnim metodama toplinske obrade, jer koristi Sunčevu energiju kao glavni ili jedini izvor topline. Osim što smanjuje troškove pogona, solarno sušenje poboljšava kvalitetu mulja smanjujući koncentraciju patogena i dodatno stabilizirajući mulj, što povećava mogućnosti njegove daljnje upotrebe. Mulj se može odvoziti i zbrinjavati u cementarama, ali za to je ključan visok udio suhe tvari u mulju, koji treba biti najmanje 90%.

Prostor za instalaciju postrojenja za solarno sušenje dehidriranog mulja nalazi se na jugozapadnoj strani postojećeg uređaja za pročišćavanje otpadnih voda.



Slika 18. Predviđeni prostor za smještaj postrojenja za obradu otpadnog mulja

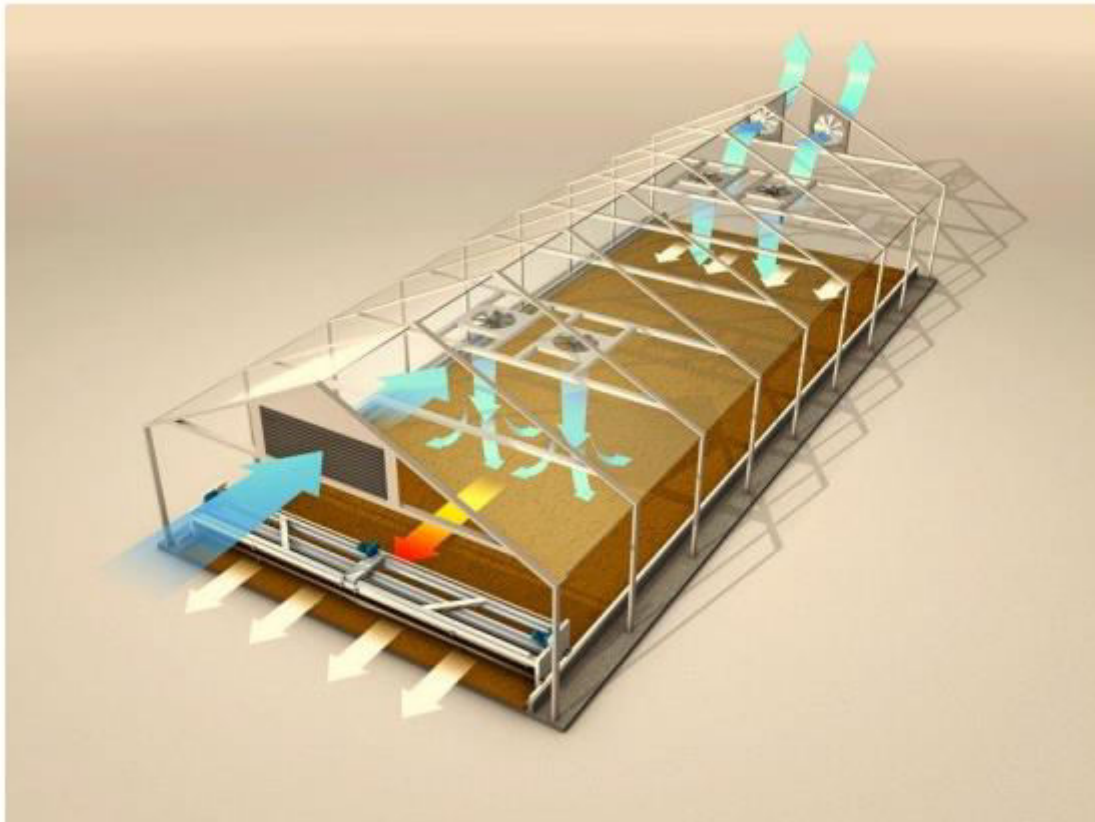
4.2. Tehničke karakteristike postrojenja

Postrojenje za solarno sušenje mulja sastoji se od uređene podloge na koju se ravnomjerno rasprostire dehidrirani mulj. Na podlogu su montirani prozirni zidovi i krov, izrađeni od materijala s visokim faktorom transmisije, što omogućava bolji prolaz Sunčevog zračenja. Ovi zidovi i krov čine komoru, odnosno staklenik, unutar kojeg se mulj postavlja u sloju debljine od 10 do 50 cm. Mulj se automatski miješa i prozračuje pomoću mobilnog prevrtača, koji je povezan s upravljačkim sustavom putem senzora. Tijekom procesa sušenja, mulj se prevrće nekoliko puta dnevno kako bi se ubrzalo sušenje i spriječilo širenje neugodnih mirisa.

Sušenje se temelji na apsorpciji Sunčeva zračenja od strane mulja, što uzrokuje porast temperature unutar staklenika. Brzina sušenja mulja ovisi o razlici tlakova vodene pare između zagrijavanog mulja i zraka u sušari. Budući da je parcijalni tlak vodene pare u zraku izravno povezan s apsolutnom vlagom, najbolji rezultati sušenja postižu se u uvjetima zagrijanog mulja i suhog zraka. Stoga je važno što prije evakuirati nastalu vlagu iz sušare. Za to su osigurani otvori za izmjenu zraka i ventilatori za cirkulaciju kako bi se spriječilo stvaranje slojeva zraka po visini. Sušara također ima niskotemperaturno podno grijanje za slučajeve smanjene insolacije. Potrebnu toplinsku energiju osiguravaju plinske dizalice topline, smještene pored ulaza u sušaru sjeverne strane (između sušare i kolne vage) [19].

U sušari se kontinuirano prate svi ključni parametri: količina zračenja (insolacija), potrošnja električne energije mobilnog prevrtača mulja, temperatura i relativna vlažnost. Povremeno, obično jednom tjedno, uzimaju se uzorci kako bi se mjerile koncentracije suhe tvari i organske tvari u mulju.

Dosadašnja iskustva s izgrađenim postrojenjima pokazala su da solarno sušenje u pravilu omogućava postizanje visokih koncentracija suhe tvari u mulju, što omogućava njegovo spaljivanje i stjecanje energetske dobiti, odnosno uporabu. U nekim svjetskim primjerima koristi se umanjivač napetosti i druge tvari za dodatno ubrzanje procesa sušenja. Ovisno o sastavu i količini obrađivanog mulja, kao i o klimatskim uvjetima lokacije, konačni proizvod može biti osušen od 60 do 90 % suhe tvari, pri čemu se masa ulaznog mulja smanjuje za 50 do 75 %.





Slika 19. Prikaz solarnog sušenja za proizvodnju mulja

Najveća prednost solarnog sušenja vidljiva je u energetskej bilanci jer je specifična potrošnja energije znatno manja. Ovisno o prethodnom tretmanu, količina energije potrebna za isparavanje 1 m³ vode solarnim sušenjem približno je jednaka onoj koja se troši konvencionalnim metodama. Prednost je što solarno sušenje koristi Sunčevu energiju, prirodni i obnovljivi izvor.

Mulj koji dolazi u postrojenje za solarno sušenje već je dehidriran na 25 % koncentracije suhe tvari. Investitor planira konačno zbrinjavanje mulja u najbližim cementarama, koje zahtijevaju sadržaj suhe tvari od 90 %. Stoga je potrebno dodatno toplinski obraditi mulj kako bi ispunio zahtjeve cementara i smanjio masu radi smanjenja troškova transporta.

Nakon solarnog sušenja, konačni proizvod ima koncentraciju suhe tvari od 90 % i masu koja je 3 - 4 puta manja u odnosu na stanje prije sušenja. Sušara je opremljena s dvije identične komore, ali skladište osušenog mulja nije predviđeno; mulj će se odmah nakon sušenja otpremiti korisniku.

Tablica 3. Izlazne i ulazne kvalitete proizvoda prije i nakon solarnog sušenja

	Osušeni mulj (800 tona/god)	Dehidrirani mulj (800 tona/god)
		
Udio vode	75%	10%
Udio suhe tvari	25%	90%

Komora za solarno sušenje mulja ima uređenu podlogu širine 12 m i duljine 120 m na koju se ravnomjerno rasprostire dehidrirani mulj. Na ovu podlogu postavljeni su prozirni zidovi i krov, izrađeni od materijala s visokim faktorom transmisije, što omogućuje bolji prolaz Sunčevog zračenja. Zidovi i krov čine stakleničku komoru u kojoj se mulj polaže u sloju debljine od 10 do 50 cm.

Ako na uređenu podlogu stavimo deset centimetara mulja, možemo izračunati volumen nasutog mulja:

$$V = b \cdot l \cdot h = 12 \cdot 120 \cdot 0.1 = 144 \text{ [m}^3\text{]} \quad (1)$$

gdje je:

- b – širina podloge
- l – dužina podloge
- h – debljina sloja mulja

ako je gustoća neobrađenog mulja: $\gamma = 925 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

tada masa mulja iznosi:

$$m = V \cdot \gamma = 144 \cdot 925 = 133.200,00 \text{ [kg]} \text{ ili } 133,2 \text{ [t]} \quad (2)$$

Kako je predviđeno sušenje u količini od 2000 tona godišnje, tada je godišnji broj ciklusa sušenja:

$$n = \frac{M}{m} = \frac{2000}{133.2} = 15 \quad (3)$$

Ukoliko želimo smanjiti broj ciklusa sušenja s obzirom na broj sunčanih dana tijekom godine, potrebno je povećati debljinu sloja mulja na otprilike 20 cm, pa bi u tom slučaju imali 8 ciklusa sušenja.

Mulj se automatski miješa i prozračuje pomoću mobilnog prevrtača s lopaticama, koji je povezan s upravljačkim sustavom. Tijekom procesa sušenja, mulj se prevrće nekoliko puta dnevno kako bi se ubrzalo sušenje i spriječilo širenje neugodnih mirisa.

Proces sušenja temelji se na apsorpciji Sunčeva zračenja od strane mulja, što uzrokuje porast temperature unutar sušare.

Brzina sušenja mulja ovisi o razlici tlakova vodene pare između zagrijanog mulja i zraka u stakleniku sušare. Budući da je parcijalni tlak vodene pare u zraku izravno povezan s apsolutnom vlagom, najbolji rezultati sušenja postižu se kada je mulj zagrijan, a zrak u sušari odvlažen. Stoga je ključno što prije evakuirati nastalu vlagu. Sušara je opremljena otvorima za izmjenu zraka i ventilatorima za cirkulaciju kako bi se spriječilo stvaranje slojeva zraka po visini.

Dosadašnja iskustva s izgrađenim postrojenjima pokazuju da solarno sušenje obično omogućava postizanje visokih koncentracija suhe tvari u mulju, što omogućuje njegovo spaljivanje i ostvarivanje energetske dobiti ili uporabe. Ovisno o sastavu i količini mulja koji se obrađuje te klimatskim uvjetima lokacije, konačni proizvod može biti osušen od 60 do 90 % suhe tvari, uz smanjenje mase ulaznog mulja za 50 - 75 %.

Najveća prednost solarnog sušenja je znatno manja specifična potrošnja energije. Ukupna količina energije potrebna za isparavanje 1 m³ vode tijekom solarnog sušenja približno je jednaka količini energije koja se koristi konvencionalnim metodama. Prednost solarnog sušenja je što se energija dobiva od Sunca, prirodnog i obnovljivog izvora. U sušari se neprekidno prate svi ključni parametri, uključujući količinu zračenja (insolaciju), potrošnju električne energije mobilnog prevrtača mulja, temperaturu, relativnu vlažnost, dok se koncentracija suhe i organske tvari u mulju provjerava povremeno, obično jednom tjedno uzimanjem uzoraka.

Sušara je opremljena dodatnim niskotemperaturnim podnim grijanjem za slučajeve smanjene insolacije. Potrebna toplinska energija dolazi iz plinskih dizalica topline, koje su smještene pored ulaza u sušaru s njezine sjeverne strane, između sušare i kolne vage.

Sušara se sastoji od dvije identične komore, ali nije predviđeno posebno skladište osušenog mulja. Mulj će se nakon sušenja odmah otpremati krajnjim korisnicima.

Plinski priključak će se izvesti sa srednje tlačnog plinovoda (2 - 4 bara) iz mjerno-redukcijske stanice, koja će biti postavljena uz glavni ulaz u UPOV, a ukopani plinovod će biti položen između sušare i postojeće interne prometnice do dizalica topline.

Sušara, dizalice topline te unutarnja i vanjska rasvjeta bit će napajane električnom energijom iz postojeće transformatorske stanice od 10 kV/0,4 kV.

Mulj koji dolazi u postrojenje za solarno sušenje prethodno je dehidriran do koncentracije suhe tvari od 25%. Investitor planira zbrinjavanje mulja u obližnjim cementarama, koje zahtijevaju koncentraciju suhe tvari od 90%. Stoga je potrebno dodatno toplinski obraditi mulj kako bi se zadovoljili zahtjevi cementara i smanjili troškovi transporta.

Konačni proizvod nakon solarnog sušenja imat će koncentraciju suhe tvari od 90 %, a njegova masa će biti 3 do 4 puta manja u odnosu na početno stanje prije sušenja.

Prema Tablici 3., godišnja količina dehidriranog mulja iznosi približno 2000 tona. Projekcijom je planirana proizvodnja od 3000 tona dehidriranog mulja godišnje, što odgovara kapacitetu postrojenja od 40.000 ES. Ova količina ravnomjerno je raspoređena po mjesecima. U tom slučaju bi imali 12 ciklusa sušenja, to znači da mjesečno moramo osušiti:

$$m = \frac{M}{n} = \frac{3000}{12} = 250 \text{ [t]} \quad (4)$$

Za tu količinu mulja debljina volumen, a potom i debljina sloja h iznose:

$$V = \frac{m}{\gamma} = \frac{250000}{925} \approx 270 \text{ [m}^3\text{]} \quad (5)$$

$$h = \frac{V}{b \cdot l} = \frac{270}{12 \cdot 120} \approx 0,19 \text{ [m]} \quad (6)$$

Konačni proizvod nakon solarnog sušenja postiže koncentraciju suhe tvari od 90 %, uz znatno smanjenu masu (833 t/god). Tablica 3. prikazuje grafički odnos između ulaznog i izlaznog sadržaja suhe tvari u mulju.

Da bi se precizno odredila potrebna površina solarne sušare, uz ukupnu količinu dehidriranog mulja, ključni su i klimatski uvjeti. Na učinkovitost postrojenja utječu razni faktori, s naglaskom na insolaciju i temperaturu zraka.

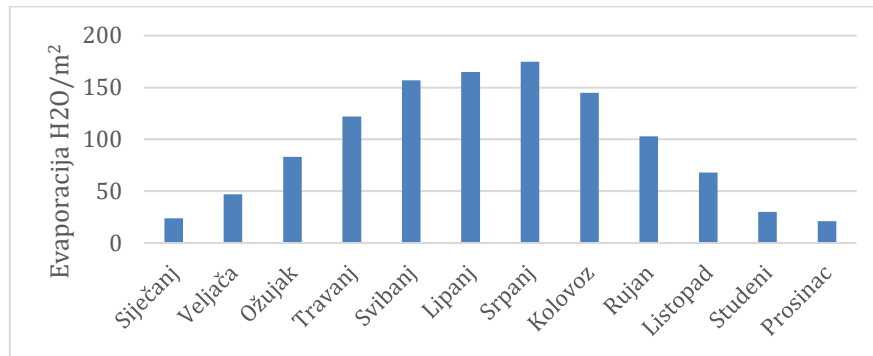
Ravnomjerna mjesečna distribucija ulaznog mulja je poželjna, jer omogućuje efikasnije sušenje, što je ključno za kasniji rad i održavanje postrojenja.

Tablica 4. Količina mulja i njegov sadržaj za grad od 60000 stanovnika

							SUHA TVAR		MULJ	
Mjesec / godina	Q (m ³ /d) ulaz	KPK (mg/l)	ES KPK	BPK5 (mg/l)	ES BPK5	BPK5 (kg/d)	ULAZ U DEHIDRACIJU (g/l)	EHIDRIRANI MULJ (%)	EHIDRIRANO (t/mj)	DEHIDRIRANO SS (t/mj)
10.2015	22.718	125,00	23.386	61,25	23.191	1.391	40,60	27,06	70,21	19,00
11.2015	20.094	226,90	37.167	113,45	35.994	2.280	42,30	27,10	79,70	21,60
12.2015	17.495	279,10	40.974	133,97	39.063	2.344	43,55	26,00	84,62	22,00
01.2016	18.584	204,403	32.101	98,11	30.389	1.823	47,60	25,50	120,35	45,20
02.2016	19.584	205,40	33.199	98,59	32.180	1.931	35,00	24,20	219,01	68,50
03.2016	22.747	198,10	36.967	95,09	36.049	2.163	31,21	24,35	136,96	33,35
04.2016	18.385	362,30	54.931	177,53	54.397	3.264	28,95	25,45	304,79	77,57
05.2016	22.145	209,80	38.319	104,90	38.717	2.323	27,95	27,00	186,33	50,31
06.2016	18.816	275,50	44.522	135,00	42.334	2.540	31,06	26,39	245,13	64,69
07.2016	16.804	351,51	50.303	172,24	48.239	2.894	30,52	26,45	215,39	56,97
08.2016	16.862	276,60	38.503	135,53	38.090	2.285	31,43	26,69	142,75	38,10
09.2016	18.569	255,60	40.664	122,69	37.970	2.278	33,01	26,64	167,68	44,67
									1972,9	546,96

4.3. Dimenzije postrojenja za solarno sušenje mulja

Proračun efektivne površine potrebne za solarno sušenje mulja izveden je na temelju prikupljenih ulaznih podataka. Godišnja količina isparavanja (evaporacije) raspoređena po mjesecima prikazana je na slici 20.

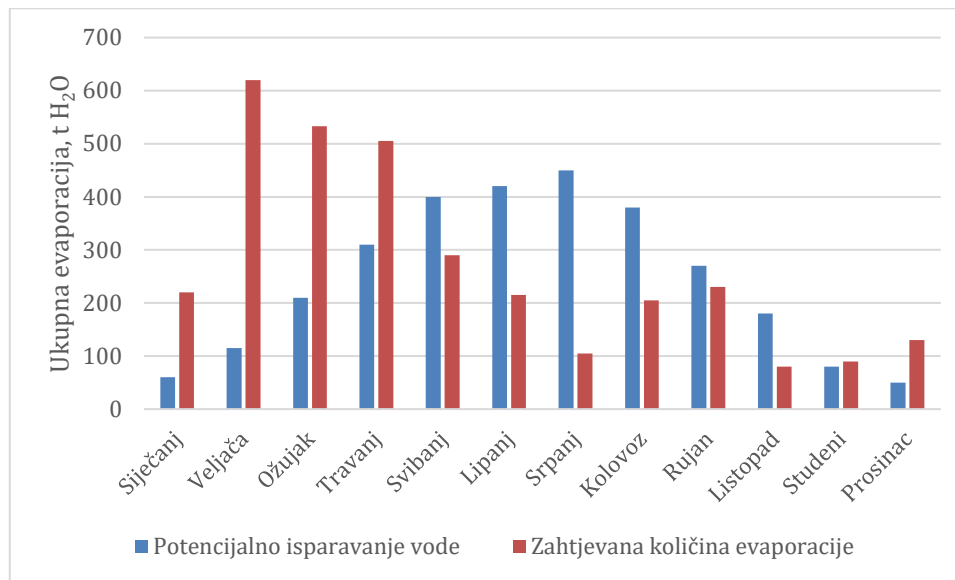


Slika 20. Dijagram predviđene mjesečne vrijednosti evaporacije

Tablica 5. Proizvod (osušeni mulj) po mjesecima [21]

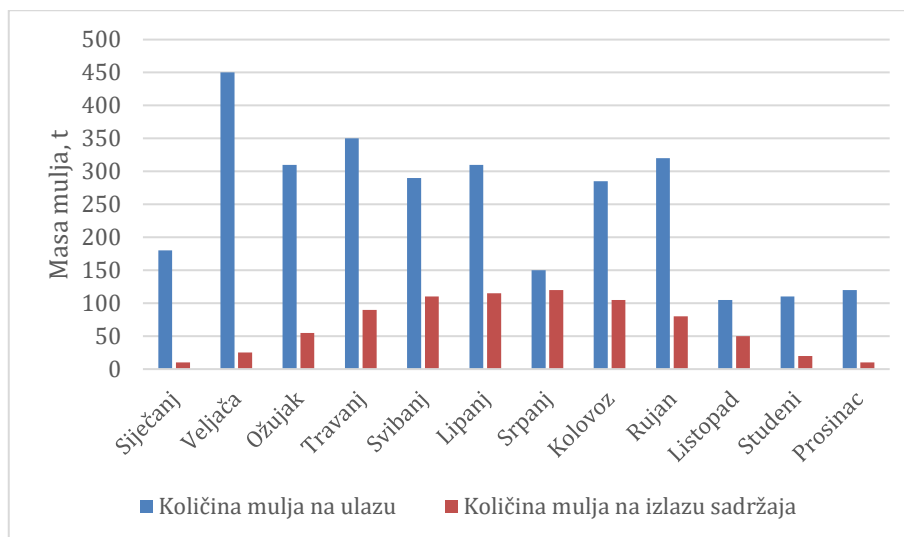
Mjesec	Količina mulja na ulazu (t/mjesec)	Potrebno isparavanje vode za ulaznu količinu mulja (t/mjesec)	Proizvedeni osušeni mulj 90% ST (t/mjesec)
Siječanj	177	128	19
Veljača	448	324	34
Ožujak	310	224	61
Travanj	349	252	89
Svibanj	296	214	114
Lipanj	316	228	121
Srpanj	148	107	127
Kolovoz	286	207	106
Rujan	324	234	76
Listopad	104	75	49
Studeni	118	85	23
Prosinac	125	90	15
Ukupno (t/god)	3000	2167	833

Ukupna količina isparene vode i proizvodnja suhog mulja izračunate su na osnovu prethodno prikazanog dijagrama, kao i količine i kvaliteta ulaznog dehidriranog mulja. Mjesečne vrijednosti prikazane su u Tablici 4. U nastavku su predstavljeni dijagrami koji prikazuju količine isparavanja vode te ulazne i izlazne količine mulja iz postrojenja (slika 23).



Slika 21. Potencijalna i potrebna količina isparavanja

Iz dijagrama se može zaključiti da je u zimskim mjesecima neophodno duže zadržavanje mulja u postrojenju ako se koristi samo solarna energija. U prva četiri mjeseca, bez dodatnog grijanja, nije moguće prikupiti dovoljnu količinu energije potrebnu za postizanje željenog nivoa suhe tvari.



Slika 22. Količine mulja koje ulaze i izlaze iz postrojenja

Izračunom je utvrđena ukupna efektivna površina postrojenja od 2600 m². Ova površina izračunata je uz pretpostavku da se iskoristi 75 % ukupne energije sunčevog zračenja.

Prema proračunu, planirane su dvije hale dimenzija 120 m u duljinu i 12 m u širinu. Detaljni nacrti hala i njihov položaj na parceli prikazani su u grafičkim priložima na slici 23.

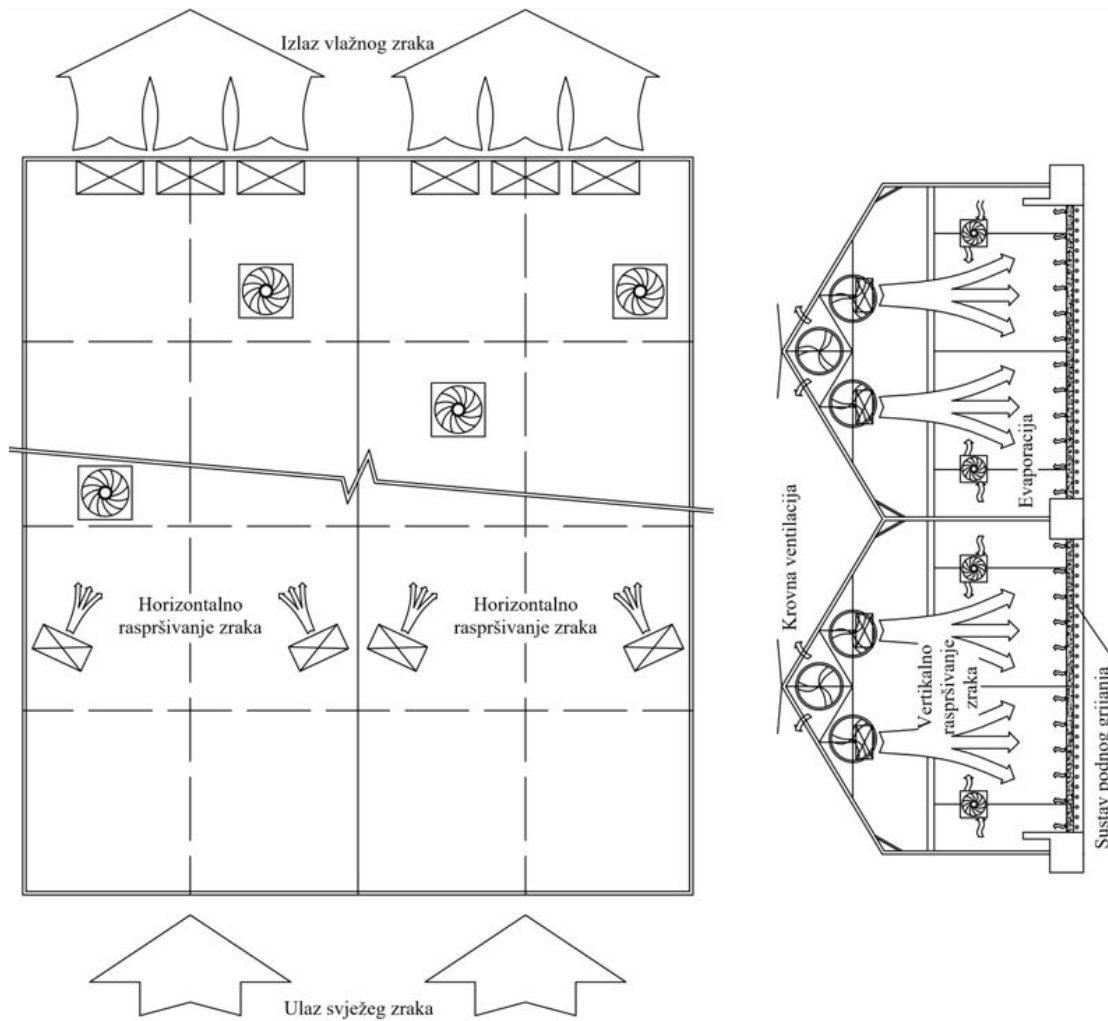
4.4. Sustav grijanja i ventilacije za isušivanje proizvoda

Sustav ventilacije poboljšava proces sušenja koristeći prisilnu konvekciju za miješanje zraka koji je zasićen vodom oslobođenom iz mulja tijekom isparavanja, uz uvjete koji vladaju u sušari. Ovaj sustav uključuje različite vrste aksijalnih ventilatora koji usmjeravaju zrak od ulaznog područja, preko površinskog sloja mulja, do usisnih ventilatora na stražnjoj strani sušare, ispuštajući zasićeni zrak u okolni zrak. Horizontalno kretanje zraka unutar sušare omogućeno je unutarnjim, zakrenutim ventilatorima te ispušnim ventilatorima na stražnjoj strani sušare. Za upravljanje vertikalnim strujanjem zraka i razbijanje glavnog pravca strujanja koriste se vertikalno usmjereni ventilatori. Svi ventilacijski uređaji za prisilnu ventilaciju montirani su na čeličnu konstrukciju sušare. Snaga manjih ventilatora je 1 kW, dok je za veće ventilatore potrebna snaga od 2 kW.

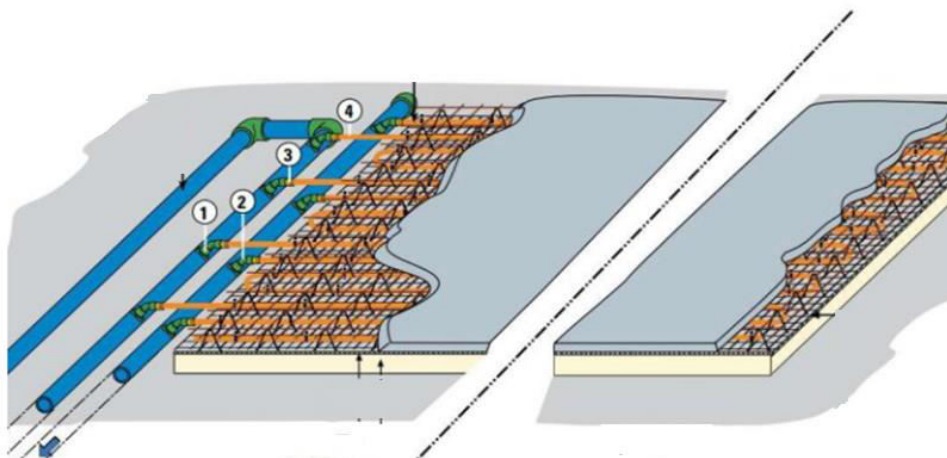
Osim što se ventilacija odvija prisilnim putem, omogućena je i kroz otvore na krovnoj površini sušare. Kada se temperatura poveća zbog zagrijavanja površine mulja, u suhim periodima moguće je smanjiti potrošnju električne energije za rad ventilatora zahvaljujući uzgonskom efektu. U slučaju kiše, automatski sustav regulacije zatvara krovne ventilacijske otvore.

Proces kondenzacije na hladnoj površini staklenog pokrova ne može se potpuno izbjeći. Kondenzat će se prikupljati žlijebovima smještenim uz uzdužne rubove čelične konstrukcije te će slobodnim padom prolaziti kroz interni sustav kanala do retencijskih bazena. Tamo će se obrađivati prije nego što se ispravno ispusti u okoliš.

Na slici 25. vidimo tlocrtni prikaz dva postrojenja, smještena paralelno jedan do drugog jer je tako praktičnije zbog infrastrukture i postavljanja zahtijevajuće opreme i priključaka.



Slika 23. Prikaz postrojenja za solarno sušenje mulja



Slika 24. Prikaz industrijskog podnog grijanja u pogonu za isušivanje mulja

Sustav grijanja bit će nisko temperaturno podno grijanje koje će biti ugrađeno u betonsko dno sušare. Priprema tople vode osigurat će se pomoću plinskih apsorpcijskih dizalica topline i plinskih kondenzacijskih grijača. Ovaj sustav bit će povezan s internim plinovodom postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda. Prednost ovog sustava u odnosu na klasičnu plinsku kotlovnice je ta što se može instalirati na otvorenom prostoru, ne zahtijeva dimnjak i nije podložan regulativama koje se odnose na plinske kotlovnice, kao što su plinodjave, vanjski zidovi, poprečna ventilacija i slično.

Plinsko postrojenje namijenjeno je za vanjsku instalaciju i dizajnirano je da bude zaštićeno i otporno na sve atmosferske uvjete. Grijači su povezani u kaskadi, svaki s snagom od 35 kW te su povezani hidraulički i električki na čeličnom postolju. Uz dizalice topline i plinske grijače, na postolju su također instalirani pumpna stanica i toplinski spremnik zapremine 2 m³ s ekspanzijskim modulom.

Smještaj toplinskih pomoćnih pumpi prikazuje slika 28., a presjek jedne takve pumpe vidimo na slici 29.

Upravljanje sustavom bit će omogućeno na licu mjesta kao i putem SCADA sustava u operativnoj prostoriji postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda. Ukupna instalirana snaga sustava za pripremu tople vode iznosi 525 kW.

4.5. Dimenzioniranje i izbor pumpe za prepumpavanje mulja

Prema podacima u tablici 3. moguće je uočiti da je najveći evidentirani protok mulja Q u mjesecu ožujku iznosio 22747 m³/dan što dovodi do sljedećih potrebnih koraka.

Prema tablici 3. od sveukupne količine zaprimljenog mulja taloži se tek četvrtina ukupnog volumena na dnu sedimentacijskih bazena, što dovodi do količine od 5686.75 m³ po danu.

Kako je riječ o najvećem iznosu koji je izmjeren pri izboru pumpe za mulj potrebno je navoditi se dobivenim informacijama. Prema izvornom idejnom projektu za solarno isušivanje mulja koji je obrađen u ovom poglavlju, predviđeno je da postoje dva bazena za solarno isušivanje što navodi na potrebu za dvije potopne muljne pumpe. Riječ je o pumpama koje su direktno uronjene u sedimentacijske bazene i njihov zadatak je izvlačenje vlažnog mulja s dna istih bazena.

Potrebno je izabrati dvije pumpe koje su u stanju dnevno prepumpati 5686.75 m^3 mulja, odnosno svaka 2843.38 m^3 po danu ili $18,5 \text{ m}^3$ po satu svaka pumpa.

Izračun potrebnog promjera cijevi za predviđenu količinu mulja:

- preporučena brzina mulja u cijevi $v = 1,5 \text{ [m/s]}$
- protok kroz cijev prema podacima iznosi $Q = 118,5 \text{ [m}^3\text{/h]} = 0,0329 \text{ [m}^3\text{/s]}$
- visina dobave $H = 9 \text{ [m]}$ Potrebna površina poprečnog presjeka cijevi:

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{0,0329}{1,5} = 0,0219 \text{ [m}^2\text{]} \quad (7)$$

Promjer cijevi:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0219}{\pi}} = 165,3 \text{ [mm]} \quad (8)$$

Odabrana je cijev s unutarnjim promjerom $d = 165 \text{ [mm]}$

Za odabrani promjer cijevi i preporučenu brzinu mulja izračunamo protok:

$$A = r^2 \cdot \pi = 0,085^2 \cdot \pi = 0,0214 \text{ [m}^2\text{]} \quad (9)$$

$$Q = A \cdot v \cdot 1000 = 0,0214 \cdot 1,5 \cdot 1000 = 32,07 \text{ [l/s]} \quad (10)$$

S tim poznatim informacijama i izvršenom dimenzioniranju cijevi, potrebno je izabrati kvalitetnu pumpu za mulj iz kataloga, odnosno pumpu koja će zadovoljavati izračunate kriterije.

Odabrana je muljna pumpa proizvođača Deponpump koja zadovoljava tražene kriterije.



Slika 25. Centrifugalna muljna pumpa proizvođača Deponpump

Njene radne karakteristike su:

- Tip pumpe: Potopna muljna pumpa
- Kapacitet: $33 \text{ l/s} = 0,033 \text{ m}^3/\text{s}$ (q)
- Visina dizanja: 11,5 m
- Tip radnog kola: Vortex
- Hlađenje: Pumpanim medijem
- Broj okretaja: 1460 min^{-1}
- Nazivna snaga EM: 4,0 kW

- Napajanje: 3x400V, 50 Hz
- IP zaštita: IP68 Duljina kabela : 10 m
- Masa pumpe: 135 kg
- Termička zaštita motora: Termo prekidač

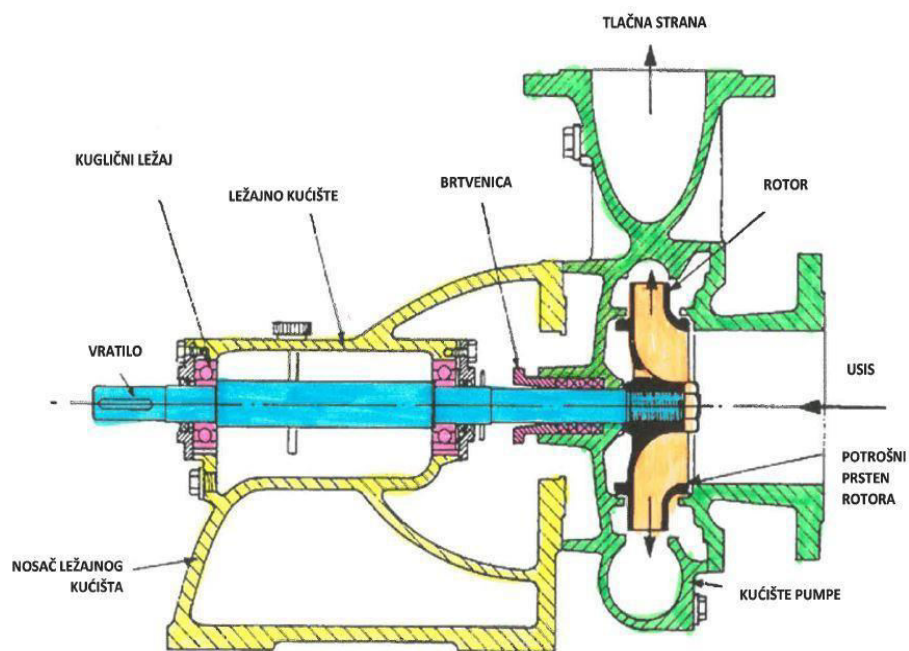
Kako bi smo potvrdili da nam izabrana pumpa odgovara, napravimo kontrolni proračun:

$$Q_{pumpe} = q \cdot 24h \cdot 3600s \quad (11)$$

$$Q_{pumpe} = 0.033 \frac{m^3}{s} \cdot 24 \cdot 3600s \quad (12)$$

$$Q_{pumpe} = 2851.2 \frac{m^3}{dan} \quad (13)$$

Slika 26. prikazuje poprečni presjek pumpe u horizontalnom položaju, a ista pumpa za naše potrebe stoji u vertikalnom položaju.



Slika 26. Horizontalno orijentirana centrifugalna muljna pumpa

5. Analiza rezultata

Da bi bilo moguće dimenzionirati postrojenje za solarno sušenje mulja bilo je potrebno napraviti proračune u kojima se prikazuje međuovisnost broja stanovnika, podneblja i količina otpadnih voda koje će završiti u pročištaču te ostataka suhe i vlažne tvari koja će biti izdvojena iz njih.

Ovisno o sastavu i količini obrađivanog mulja, kao i o klimatskim uvjetima lokacije, konačni proizvod može biti osušen od 60 do 90 % suhe tvari, pri čemu se masa ulaznog mulja smanjuje za 50 do 75 %.

Mulj koji dolazi u postrojenje za solarno sušenje već je dehidriran na 25 % koncentracije suhe tvari. Investitor planira konačno zbrinjavanje mulja u najbližim cementarama, koje zahtijevaju sadržaj suhe tvari od 90 %. Stoga je potrebno dodatno toplinski obraditi mulj kako bi ispunio zahtjeve cementara i smanjio masu radi smanjenja troškova transporta.

Komora za solarno sušenje mulja ima uređenu podlogu širine 12 metara i duljine 120 metara na koju se ravnomjerno rasprostire dehidrirani mulj. Na ovu podlogu postavljeni su prozirni zidovi i krov izrađeni od materijala s visokim faktorom transmisije, što omogućuje bolji prolaz Sunčevog zračenja. Zidovi i krov čine stakleničku komoru u kojoj se mulj polaže u sloju debljine od 10 do 50 cm.

Kako je predviđeno sušenje u količini od 2000 tona godišnje, tada je predviđeni godišnji broj ciklusa sušenja 15, no povećanjem debljine sloja mulja taj broj ciklusa se može smanjiti, posebice uz povećanje trajanja vremena sušenja istog.

Ovisno o sastavu i količini mulja koji se obrađuje te klimatskim uvjetima lokacije, konačni proizvod može biti osušen od 60 do 90 % suhe tvari, uz smanjenje mase ulaznog mulja za od 50 do 75 %.

Konačni proizvod nakon solarnog sušenja imat će koncentraciju suhe tvari od 90 %, a njegova masa će biti 3 do 4 puta manja u odnosu na početno stanje prije sušenja. Kako je navedeno u Tablici 3., godišnja količina dehidriranog mulja iznosi približno 2000 tona. Projekcijom je planirana proizvodnja od 3000 tona dehidriranog mulja godišnje, što odgovara kapacitetu postrojenja od 40.000 ES. Ta je količina ravnomjerno raspoređena po mjesecima i u tom je slučaju predviđeno 12 ciklusa sušenja.

Konačni proizvod nakon završetka procesa solarnog sušenja ima udio suhe tvari od 90 %, uz znatno smanjenu masu (833 t/god) kako je i prikazano u Tablici 3. uz grafički prikaz korelacija između ulaznog i izlaznog sadržaja suhe tvari u mulju.

6. ZAKLJUČAK

Proces obrade otpadnih voda je izuzetno kompleksan proces koji se je razvijao stoljećima, ali tek sa povećanjem populacije, veće naseljenosti, razvoja znanosti i svijesti o okolišu u kojem živimo postajemo sve svjesniji koliko je važno i njegovo održanje.

Jedan od najvažnijih aspekata svijeta u kojem živimo i o kojem ovisimo je pitka voda koju koristimo za nužne biološke funkcije, proizvodnju, agronomiju, ali s tim korištenjem dolazi do izražaja nikada veća razina odgovornosti koja donedavno nije bila prisutna.

Od onih koji samo uzimaju postali smo oni koji moraju i čuvati ono što imaju, kako za sebe, tako i za sve buduće generacije koje dolaze i sve što ih okružuje.

Iz tog razloga moraju se obrazovati ljudi koji će moći definirati probleme, interdisciplinarnim metodama pronaći optimalna i zadovoljavajuća konstrukcijska rješenja koja će osiguravati naše kontinuirano postojanje i stabilnost u ovom krhkom svijetu koji ovisi o vodi.

Prema najvećem evidentiranom protoku mulja Q za mjesec ožujak koji iznosi 22747 m³/dan, izvršen je odabir crpke i napravljen je kontrolni proračun i isti je pokazao da crpke svojim kapacitetom zadovoljavaju.

LITERATURA

- [1] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723038081?via%3>
Dihub, pristupljeno 01.08.2024
- [2] Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse
<https://essd.copernicus.org/articles/13/237/2021/>, pristupljeno 02.08.2024
- [3] Obrada otpadne vode <https://hydrotech.com.hr/primjene/obrada-otpadne-vode/>, pristupljeno 02.08.2024
- [4] Povećanje sigurnih sanitarnih uvjeta u zemljama u razvoju
<https://www.pumpsandsystems.com/increasing-safe-sanitation-developing-countries>, pristupljeno 03.08.2024
- [5] Kanalizacijski tretmani https://en.wikipedia.org/wiki/Sewage_treatment, pristupljeno 04.08.2024
- [6] <https://www.thearchaeologist.org/blog/sanitation-of-the-indus-valley-civilisation>, pristupljeno 05.08.2024
- [7] Kanalizacijski sustavi antiknog Rima
<https://omrania.com/inspiration/urban-water-systems-the-great-sewer-of-ancient-rome/>, pristupljeno 06.08.2024
- [8] Presjek rimskog kanalizacijskog sustava:
https://www.researchgate.net/figure/Roman-Sewage-System-Source-Link_fig1_361869445, pristupljeno 06.08.2024
- [9] Thames Water's planned sewerage repairs in the Upper Lambourn Valley, October and November 2021
<https://pennypost.org.uk/2021/08/thames-waters-planned-sewerage-repairs-in-the-upper-lambourn-valley/>, pristupljeno 10.08.2024
- [10] Controlling Hydrogen Sulfide Corrosion in Sewer Pipelines

- <https://trenchlesspedia.com/controlling-hydrogen-sulfide-corrosion-in-sewer-pipelines/2/4599>, pristupljeno 10.08.2024
- [11] Glavni načini popravljavanja kanalizacije
<https://ihouse.decorexpro.com/hr/kanalizaciya/remont-kanalizacii/>,
pristupljeno 07.08.2024
- [12] Wastewater characteristics, treatment and disposal
<https://www.iwapublishing.com/sites/default/files/ebooks/9781780402086.pdf>,
pristupljeno 07.08.2024
Marcos von Sperling: Wastewater Characteristic, treatment and Disposal,
Volume one, Biological Wastewater Treatment Series, 3, 9, 28, 77, 165, 178-
180, 180-200 , 215-230, 242-276
- [13] Using Methane from Sewage Plants for Decentralized Electric Power
Production
<https://www.mwm.net/en/mwm-competencies/gas-solutions/sewage-gas/> ,
pristupljeno 07.08.2024
- [14] https://www.researchgate.net/figure/Harvesting-of-sludge-from-drying-bed-for-use-in-agriculture-Dakar-Senegal-photo-Linda_fig2_275329922, pristupljeno
23.09.2024
- [15] What is Sedimentation in Wastewater Treatment?
<https://www.etch2o.com/what-is-sedimentation-in-wastewater-treatment/>,
pristupljeno 25.08.2024
- [16] Introduction to wastewater treatment
<https://www.csun.edu/~vchsc006/356b/b08.html>, pristupljeno 25.08.2024
- [17] <https://izvor.ploce.hr/sustav-prociscivanja/>
- [18] <https://www.pipelife.hr/projekti/susenje-mulja-karlovac.html>, pristupljeno
20.09.2024

- [19] Pipelife d.o.o., dostupno na:
<https://www.pipelife.hr/projekti/susenje-mulja-karlovac.html>, pristupljeno
20.09.2024
- [20] <https://solargis.info/>, pristupljeno 15.09.2024
- [21] Vodovodi i kanalizacija d.o.o., podatci na direktni upit, 19.09.2024
- [22] <https://hr.dpwaterpump.com/slurry-pump/submersible-slurry-pump/submersible-sludge-pump-centrifugal-slurry.html> ,
pristupljeno 20.09.2024
- [23] <https://strojarskaradionica.wordpress.com/2018/04/20/dijelovi-pumpe-za-laike/> , pristupljeno 20.09.2024
- [24] <https://eur-lex.europa.eu/HR/legal-content/summary/using-sewage-sludge-in-farming.html?fromSummary=03>, Europska direktiva za mulj,
- [25] <https://voda.hr/hr/novost/direktiva-o-prociscavanju-komunalnih-otpadnih-voda-preinaka-20243019>, EU direktiva za otpadne vode
- [26] <https://www.zakon.hr/cms.htm?id=13181>, Pravilnik o gospodarenju muljem iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda kada se mulj koristi u poljoprivredne svrhe
- [27] https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2010_03_32_745.html, Pravilnik o zaštiti poljoprivrednog zemljišta od onečišćenja