

MOGUĆNOST KORIŠTENJA BILJNIH UREĐAJA U PROČIŠĆAVANJU OTPADNIH VODA

Đuranec, Antonija

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:128:191916>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-10-09**



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 REPOZITORIJ

Veleučilište u Karlovcu
Odjel Sigurnosti i zaštite
Stručni studij sigurnosti i zaštite

Antonija Đuranec

MOGUĆNOSTI KORIŠTENJA BILJNIH UREĐAJA U PROČIŠĆAVANJU OTPADNIH VODA

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2022.

Veleučilište u Karlovcu
Odjel Sigurnosti i zaštite
Stručni studij sigurnosti i zaštite

Antonija Đuranec

MOGUĆNOSTI KORIŠTENJA BILJNIH UREĐAJA U PROČIŠĆAVANJU OTPADNIH VODA

ZAVRŠNI RAD

Mentor: dr.sc. Ines Cindrić

Karlovac, 2022.

Karlovac University of Applied Sciences
Safety and Protection Department
Professional undergraduate study of Safety and Protection

Antonija Đuranec

THE POSSIBILITY OF USING CONSTRUCTED WETLANDS IN WASTEWATER TREATMENT

FINAL PAPER

Mentor: dr.sc. Ines Cindrić

Karlovac, 2022.



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Stručni studij: Sigurnost i zaštita

Usmjerenje: Zaštita na radu

Karlovac, 2022.

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: Antonija Đuranec

Matični broj: 0415619040

Naslov: **MOGUĆNOSTI KORIŠTENJA BILJNIH UREĐAJA U PROČIŠĆAVANJU
OTPADNIH VODA**

Opis zadatka: U završnom radu pod nazivom *Mogućnosti korištenja biljnih uređaja u pročišćavanju otpadnih voda* objasniti sam pojam otpadnih voda, njihovu podjelu, onečišćivače otpadnih voda, a u glavnom dijelu objasniti metode obrade otpadnih voda biljnim uređajima. Također, definirati što su biljni uređaji, opisati pripremne aktivnosti za izgradnju i održavanje biljnih uređaja, napisati prednosti i nedostatke istih. Za pisanje završnog rada ću prikupiti i proučiti stručnu literaturu. Završni rad ću uskladiti s Pravilnikom o pisanju Završnih i Diplomskih radova veleučilišta u Karlovcu.

Zadatak zadan

Rok predaje rada

Predviđeni datum obrane

19.11.2021.

Mentor: dr.sc. Ines Cindrić Predsjednik ispitnog povjerenstva: dr.sc.Jasna Halambek

PREDGOVOR

Zahvaljujem se mentorici Ines Cindrić na stručnom vodstvu, pomoći, strpljenju i razumijevanju prilikom pisanja završnog rada.

Hvala svim profesorima Veleučilišta u Karlovcu na stečenom znanju tijekom mog trogodišnjeg studiranja.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima koji su mi bili podrška tijekom studiranja.

SAŽETAK

Voda je najvažniji kemijski spoj bez kojega ne bi bilo života na Zemlji. Povećanjem broja stanovništva dolazi do onečišćenja okoliša, a time i vode. Svaka voda koja je jednom korištena u neku svrhu, postaje otpadna voda. Kako bi pročišćavanje otpadnih voda bilo što učinkovitije, potrebno je poznavati sustav otpadnih voda, izvore onečišćenja voda, utjecaj voda na ekosustav i metode pročišćavanja.

Prvi dio rada opisuje pojam otpadnih voda, vrste otpadnih voda prema izvoru nastanka te njihove osnovne karakteristike.

Drugi dio rada odnosi se na podjelu biljnih uređaja, opisuje parametre potrebne za rad uređaja te se navode prednosti i nedostatci biljnih uređaja.

Glavni dio završnog rada daje uvid u pripremu, izgradnju i održavanje biljnih uređaja. Naglasak ovog rada je na nastajanju otpadnih voda te mogućnostima njihovog pročišćavanja pomoću biljnih uređaja.

Ključne riječi: biljni uređaji, otpadne vode.

ABSTRACT

Water is the most important chemical compound without there would be no life on Earth. The increase in the number of the population leads to pollution of the environment, and thus of water. Any water that has once been used for some purpose becomes waste water. In order for wastewater treatment to be more effective, it is necessary to know the wastewater system, sources of water pollution, the impact of water on the ecosystem and purification methods.

The first part of the paper describes the concept of waste water, the types of waste water according to the source and their basic characteristics.

The second part of the paper refers to the division of plant devices, describes the parameters necessary for the operation of the device, and lists the advantages and disadvantages of plant devices.

The main part of the final thesis gives an insight into the preparation, construction and maintenance of plant devices. The emphasis of this work is on the generation of wastewater and the possibilities of its purification using plant devices.

Keywords: plant devices, Waste water.

SADRŽAJ

| | |
|---|-----------|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. OTPADNE VODE..... | 2 |
| 2.1. Onečišćivači u otpadnoj vodi..... | 6 |
| 2.2. Obrada otpadnih voda..... | 7 |
| 3. BILJNI UREĐAJI..... | 8 |
| 3.1. Parametri koji utječu na rad biljnog uređaja..... | 11 |
| 3.1.1. Makrofiti i supstrat..... | 11 |
| 3.1.2. Kisik u biljnom uređaju..... | 12 |
| 3.1.3. Temperatura i pH otpadne vode u biljnom uređaju..... | 12 |
| 3.2. Vrste biljnih uređaja..... | 13 |
| 3.3. Močvarni sustavi..... | 17 |
| 4. OBRADA OTPADNE VODE U BILJNOM UREĐAJU..... | 19 |
| 4.1. Uklanjanje suspendiranih tvari..... | 19 |
| 4.2. Uklanjanje organskih tvari..... | 19 |
| 4.3. Uklanjanje dušičnih spojeva u otpadnoj vodi..... | 20 |
| 4.3.1. Amonifikacija..... | 21 |
| 4.3.2. Nitrifikacija..... | 21 |
| 4.3.3. Denitrifikacija..... | 22 |
| 4.4. Uklanjanje fosfora..... | 22 |
| 4.5. Uklanjanje mikroorganizama..... | 23 |
| 5. PRIPREMA, IZGRADNJA I ODRŽAVANJE BILJNOG UREĐAJA..... | 24 |
| 5.1. Pripremne aktivnosti za izgradnju biljnog uređaja..... | 24 |
| 5.2. Dimenzioniranje biljnog uređaja..... | 25 |
| 5.2.1. Pročišćavanje potpovršinskim biljnim uređajem..... | 25 |
| 5.3. Izgradnja biljnog uređaja..... | 26 |
| 5.4. Održavanje biljnog uređaja..... | 27 |

| | |
|---|-----------|
| 6. PREDNOSTI I NEDOSTATCI BILJNIH UREĐAJA..... | 28 |
| 7. ZAKLJUČAK..... | 31 |
| 8. LITERATURA..... | 32 |
| 9. PRILOZI..... | 34 |
| 9.1. Popis slika..... | 34 |
| 9.2. Popis tablica..... | 34 |

1. UVOD

Voda je izvor života i nezamjenjivo prirodno bogatstvo. Jedna je od najvažnijih spojeva u prirodi. Bez vode ne bi bilo moguće održavati biljni, životinjski i ljudski život. Povoljan je energent te je jedna od najbitnijih industrijskih sirovina u tehnološkim procesima [1]. Sve veća tehnološka razvijenost društva rezultirala je značajnim onečišćenjem okoliša čija je glavna karakteristika kontinuirano povećanje vrste i količine zagađivala s posebnim naglaskom na nova zagađivala i njihove razgradne produkte. S obzirom da voda obuhvaća najveći dio Zemljine površine, te je ključni spoj za sav živi svijet na našem planetu, zaštita njezine kvalitete je od posebnog interesa. O važnosti pitke vode govori i Europska povelja o vodi koja je sastavljena 1969. godine u Strasbourgu. U njoj se spominje kako bez vode nema života, slatkovodni resursi vode nisu neiscrpni i neophodno ih je sačuvati. Ako se mijenja kakvoća vode, govorimo o ugrožavanju života i ostalih živih bića. Ukoliko se voda po upotrebi vraća u prirodnu sredinu, to ne smije biti na štetu drugih korisnika, a kao posljednje se navodi da vodeni resursi moraju biti predmet inventure [2]. Kako bi se otpadna voda mogla vratiti u prirodnu sredinu potrebno ju je prethodno obraditi, a kao prioriteti obrade otpadnih voda navode se učinkovitost, niski pogonski troškovi, sigurnost i efikasnost prilikom načina rada [3]. Dodatna vrijednost metode očituje se u sposobnosti opetovanog korištenja pročišćene otpadne vode u svim sferama društva. Posebno atraktivno rješenje obrade otpadnih voda pripada biljnim uređajima.

Cilj ovog rada je istražiti dostupnu literaturu koja obrađuje tematiku korištenja biljnih uređaja u pročišćavanju otpadnih voda.

2. OTPADNE VODE

Otpadne vode su vode koje su korištene u nekom procesu uslijed čega je došlo degradiranja njihove kvalitete te se radi toga ne mogu ispustiti u okoliš [3]. Najčešća podjela otpadnih voda odnosi se na izvor njezina nastanka te se najčešće dijeli na komunalne i industrijske otpadne vode. Uz navedenu podjelu, u literaturi se često posebno ističu poljoprivredne/stočarske, oborinske te otpadne vode s odlagališta otpada (vidi tablicu 1) [3].

TABLICA 1. Vrste otpadnih voda prema izvoru njihova nastanka i njihovi najkarakterističniji onečišćivači [3].

| Vrste otpadnih voda | Izvor | Opis |
|---------------------------------------|--|---|
| Komunalna otpadna voda | Primarno stambeni i poslovni objekti | Razrijeđena do koncentrirana mješavina urina, fekalija, papira, deterdženata, masnoća i kemikalija iz domaćinstava |
| Industrijska otpadna voda | Primarno industrijski procesi i procjeđivanje | Razrijeđena do koncentrirana mješavina emulzija koja se sastoji od male ili velike količine biorazgradivih i/ili nerazgradivih kemikalija |
| Poljoprivredna/stočarska otpadna voda | Intenzivne poljoprivredne aktivnosti, primjerice mljekarstvo ili stočarstvo i klaonice | Razrijeđene do koncentrirane otopine biorazgradivih tvari |
| Oborinska voda | Slivne vode s gradskih, prigradskih i seoskih površina | Tipično razrijeđena mješavina mineralnih i organskih krutina i otopljenih soli, nutrienata i tvari u tragovima |
| Otpadne vode s odlagališta otpada | Vode nastale otjecanjem kroz nenatkriveni otpad | Mješavina različitih topljivih organskih i anorganskih tvari |

Komunalne otpadne vode su otpadne vode nastale u kućanstvima, uredima, javnim prostorima, a manje iz tržišnih aktivnosti i neproizvodnih djelatnosti. Njihovo temeljno svojstvo je biološka razgradivost, što znači da sadrže visoke udjele organskih tvari

koje su radi svoje visoke energetske vrijednosti podložne djelovanju saprofitnih mikroorganizama. Protok komunalne otpadne vode uglavnom je stalan, uz satne, dnevne i sezonske oscilacije [3,4]. Način života, vremenske prilike, količine iskorištene vode, uređenost vodoopskrbnog sustava, ali i ostali čimbenici, određuju sastav i koncentraciju otpadnih tvari u vodi [5]. S obzirom da su komunalne otpadne vode podložne mikrobiološkoj razgradnji, odnosno truljenju mogu se podijeliti prema stupnju biološke razgradnje, odnosno na osnovu tereta zagađenja. Prema stupnju biološke razgradnje dijele se na:

- svježa voda – otpadna voda u kojoj nije došlo do napredovanja biorazgradnje. Koncentracija otopljenog kisika je slična koncentraciji u vodovodnoj vodi, samo nešto manja.
- odstajala voda – voda u kojoj zbog biološke razgradnje nema kisika.
- trula voda (septička) – voda u kojoj je došlo do napredovanja biorazgradnje, ali bez prisustva kisika, odnosno na anaeroban način.

Na osnovu tereta zagađenja razlikujemo dvije vrste kućanskih otpadnih voda:

- sive otpadne vode - predstavljaju otpadne vode iz kupaonica, tuševa, praonica i bazena, itd. i ne sadrže mnogo krutih tvari
- crne otpadne vode - to su otpadne vode iz kuhinja i sanitarnih čvorova [4].

Upotreba tople vode u kupaonicama i kuhinjama producira otpadne vode čiji je prosjek temperature povišen od ostalih otpadnih voda te iznosi od 11,6 °C do 20,5 °C [5]. Povišenje temperature dovodi do ubrzavanja bioloških procesa razgradnje, što rezultira bržim trošenjem otopljenog kisika i dovodi do opasnosti od truljenja vode u kanalskoj mreži [5].

Radom u postrojenjima ili korištenjem raznih procesa nastaju **industrijske otpadne vode**. Način i vrsta tehnološkog procesa određuju količinu, sastav i protok industrijske otpadne vode, stoga su vode iz ovog izvora međusobno neusporedive [3]. Način njihove obrade prije svega ovisi o njihovoj biorazgradivosti:

- **Biološki razgradive** otpadne vode. To su otpadne vode u kojima su prisutni biološki lako razgradljivi sastojci.

- **Biološki nerazgradive** otpadne vode. To su one otpadne vode u kojima su prisutni biološki teško razgradivi sastojci [5].

Biološka razgradivost je prirodan proces u kojem neku organsku tvar, jednostavnu ili složenu, mikroorganizmi poput bakterija, gljivica ili algi, koriste kao izvor hrane kako bi dobili energiju potrebnu za svoje životne procese. Razlikuju se dva tipa biorazgradnje, aerobna i anaerobna razgradnja. U prisutnosti kisika odvija se aerobna biorazgradnja pri čemu se stvara ugljikov dioksid. U slučajevima odvijanja procesa bez prisustva kisika govori se o anaerobnoj biorazgradnji tijekom koje uz ugljikov dioksid nastaju metan ili sumporovodik. Proces biorazgradnje prolazi kroz tri stupnja. Prvo predmet prolazi kroz biodeterioraciju, što je mehaničko slabljenje njegove strukture, zatim slijedi biofragmentacija, što je razgradnja materijala pomoću mikroorganizama i konačno asimilacija, koja predstavlja ugradnju starog materijala u nove stanice. Niz čimbenika određuje brzinu kojom se odvija ta razgradnja organskih spojeva. Čimbenici uključuju svjetlost, vodu, kisik i temperaturu. Brzina razgradnje mnogih organskih spojeva ograničena je njihovom bioraspoloživošću, što je brzina kojom se tvar apsorbira u sustav ili čini dostupnom na mjestu fiziološke aktivnosti, jer spojevi moraju biti otpušteni u otopinu prije nego što ih organizmi mogu razgraditi.

Procjedne vode s odlagališta otpada su vode koje nastaju u odloženom otpadu i vode koje prolaze kroz odloženi otpad, a koje sadrže otopljene tvari iz otpada. Nastaju onečišćenjem padalina ili podzemnih voda koje se cijede preko odlagališta čvrstog otpadnog materijala (deponije) različitog podrijetla. Procjedne otpadne vode sadrže visoke koncentracije različitih, vrlo teško biorazgradivih sastojaka, a nastaju na odlagalištima gradskog i industrijskog čvrstog otpada. Ove vode nastaju kad je otpad otkriven, a kišnica se slijeva niz taj otpad. Karakteristike procjedne vode ovise o vrsti otpada od kojeg nastaju [3].

Poljoprivredne otpadne vode su podrijetlom s farmi svinja, goveda, peradi i drugih životinja. Nastaju intenzivnim poljoprivrednim aktivnostima vezanim uz mljekarstvo, tovilišta, svinjogojske farme i ribarstvo. Oborine ili sustavi za navodnjavanje poljoprivrednog zemljišta ne mogu dovesti točnu količinu vode potrebnu za pojedine agrokulture na pojedinim poljoprivrednim zemljištima. Sva dovedena voda se ne može apsorbirati ili ispariti/ishlapiti s mjesta dovođenja nego će se određeni “višak” vode procijediti u dubinu do podzemnih voda ili otjecati do obližnjih površinskih voda.

Taj tzv. višak vode predstavlja poljoprivredne otpadne vode. Poljoprivredne otpadne vode potrebno je odvesti s mjesta nastajanja, dodatno obraditi i što je više moguće ponovo iskoristiti u sljedećem ciklusu navodnjavanja zemljišta [3]. Na sastav poljoprivrednih otpadnih voda može utjecati primjena gnojiva, hranjivih tvari, primjena herbicida, biocida, fungicida, ali ovisi i o poljoprivrednim kulturama koje se uzgajaju na zemljištu. Zbog visokih koncentracija spojeva dušika i fosfora dolazi do otežanog pročišćavanja zato što su oni glavni činitelji rasta vodenog bilja u vodotocima, morima i jezerima te se propisima uvode ograničenja ispuštanja. Visoku pročišćenost vode omogućuje primjena nekoliko bioloških postupaka ili kombinacija bioloških postupaka s fizikalno – kemijskim postupcima obrade.

Oborinske otpadne vode su vode koje nastaju ispiranjem oborinama s površina prometnica, parkirališta ili drugih manipulativnih površina, postupno otapajući onečišćenja na navedenim površinama te otječu u sustave javne odvodnje ili izravno u površinske vode. Razlikuju se po sastavu, ovisno o mjestu nastanka, te je zbog toga oborinske vode potrebno obraditi, pogotovo vode skupljene s prometnih površina [3]. Oborinske vode se ne mogu smatrati čistim vodama zato što svojim prolaskom ispiru i otapaju atmosferu. Jedna od posljedice oborinskih voda su pojave poput kisele kiše, crvene ili žute kiše. Kisela kiša je posljedica zagađenja zraka koja nastaje uslijed izgaranja ugljena, nafte i benzina pri čemu se oslobađa dim koji sadrži plinove sumporov dioksid i dušikov dioksid. Ti se plinovi dižu u atmosferu gdje se otapaju u kapljicama vode i stvaraju razrijeđene kiseline. Te kiseline potom na zemlju padaju zajedno s kišom. Kisela kiša štetno djeluje na biljke, životinje i građevine. Njezini su učinci pogubniji u blizini gradova i industrijskih područja zato što višak protona u kišnici prouzrokuje pojačano raspadanje kamenja, što znači da se ubrzava trošnost. Na taj način se mnogobrojni kulturni spomenici i stare crkve nepovratno uništavaju. Rješenje za ove otpadne vode je kontrola ispuštanja zagađivača u atmosferu [5]. Otjecanje onečišćenih oborinskih voda s gradskog područja u kanalizaciju ovisi o određenim čimbenicima poput površinskog pokrova, intenzitetu i vrsti prometa, utjecaju industrije, trajanju kiša i jakosti padanja, onečišćenosti zračnog bazena, sušnim razdobljima, itd. Trajanje oborina u procesu otjecanja mijenja koncentraciju onečišćenja u oborinskoj vodi. Dokazano je da je koncentracija suspendirane tvari do 10 puta veća u prvom dotoku oborinske vode naspram završetka otjecanja. Kod dugih kišnih razdoblja ta razlika se povećava za

više od 20 puta. Biokemijska potrošnja kisika (BPK) dokazuje da je prvi dotok kisika od 2 do 5 puta opterećeniji od završnog [5]. Topljenjem snijega nastaju prilično onečišćene vode koje se također ubrajaju u grupu oborinskih voda. Najveća zagađenja nastaju kod naglog zatopljivanja u fazama potpunog topljenja snijega zato što ta pojava uzrokuje nakupljanje svih nečistoća, nastalih u hladnim vremenima, u kanalizacijama [5].

2.1. Onečišćivači u otpadnoj vodi

U komunalnim, industrijskim, poljoprivrednim i oborinskim vodama se nalaze tvari koje su potencijalno štetne za okoliš u većoj ili manjoj mjeri (Tablica 2). Prije nego dođe do ispuštanja tih voda u prirodu ili do njihovog ponovnog korištenja, potrebno je smanjiti koncentraciju štetnih tvari ili ih po mogućnosti u potpunosti ukloniti metodama fizikalnih, kemijskih ili bioloških procesa obrade otpadnih voda [3]. Odgovarajuće pročišćavanje znači obradu otpadnih voda bilo kojim postupkom i/ili načinom ispuštanja, uključujući i podmorske ispuste, koje omogućava da prijamnik zadovoljava ciljeve zaštite okoliša. Razina obrade otpadnih voda kod odgovarajućeg pročišćavanja može biti niža od prvog stupnja (I) pročišćavanja, uz obveznu primjenu postupaka kojima se iz otpadne vode uklanjaju krupnije raspršene tvari i plutajuće tvari, uključujući teško hlapljive lipofilne tvari [6].

TABLICA 2. Onečišćivači u otpadnim vodama [3]

| Onečišćivač | Primjer onečišćivača | Razlog važnosti |
|------------------------------|--|--|
| Suspendirane tvari | Otpuštene čestice mikroplastike, čestice anorganskih tvari (mangan, željezo, nitrati itd.) | Ispuštanje neobrađenih otpadnih voda u okoliš uzrokuje naslage mulja i anaerobnih uvjeta zbog suspendiranih tvari. |
| Biorazgradive organske tvari | Ugljikohidrati, proteini, lipidi, fenoli, pesticidi... | Uzrokuju smanjenje koncentracije otopljenog kisika. |
| Patogeni mikroorganizmi | Virusi, bakterije, plijesni, protozoe | Patogeni organizmi pomažu u prenošenju zaraznih bolesti. |
| Hranjive tvari (nutrienti) | Dušik, fosfor | Zaslužne su za eutrofikaciju i pojavu cvjetanja algi. |
| Ostali onečišćivači | Razne kemikalije, tkanine, plastika | Sumnja se da uzrokuju kancerogenost, mutagenost, teratogenost ili visoku akutnu toksičnost. |

| | | |
|------------------------------|---|---|
| Stabilni organski spojevi | Urea, ulja, masti, ugljikovodici | Djeluju kao otrovi i inhibitori za većinu mikroorganizama u aktivnom mulju ili drugom prirodnom staništu. |
| Teški metali | Arsen, olovo, živa, krom, bakar | Koče rast i aktivnost mikroorganizama. |
| Otopljeni anorganski spojevi | Amonijak, nitrit, nitrooksid – dušični oksidul, elementarni dušik | Talože se na površinu stanica mikroorganizama. |

2.2 Obrada otpadnih voda

Obrada otpadnih voda najčešće se provodi upotrebom konvencionalnih metoda u uređajima za obradu otpadnih voda kod kojih se postiže zadovoljavajuća kvaliteta obrade primjenom kombinacije fizikalnih, kemijskih i bioloških procesa [3]. U fizikalne procese obrade otpadnih voda spadaju miješanje, taloženje, sedimentacija, flotacija, filtracija, otplinjavanje i odmuljivanje. Miješanje, taloženje i sedimentacija se koriste za uklanjanje taloga tvari i smanjivanje količine mulja. Flotacija se upotrebljava za uklanjanje tvari koje imaju manju gustoću od vode [3]. Kemijski procesi obrade otpadne vode usko su povezani s fizikalnim procesima te se najčešće primjenjuju u kombinaciji s fizikalnim procesima. U kemijskim se procesima onečišćivači iz otpadne vode uklanjaju dodatkom kemikalija ili induciranjem kemijskih reakcija. U kemijske metode ubrajaju se precipitacija, adsorpcija, ionska izmjena, oksidacija i redukcija, dezinfekcija [3]. Biološki proces obrade otpadnih voda je razgradnja organskih tvari uz pomoć mikroorganizama. Biološko pročišćavanje je proces koji se odvija i u prirodnom okolišu. Mikroorganizmi, najčešće bakterije, apsorbiraju organsko onečišćenje i hranjive soli koji su raspršeni ili otopljeni u otpadnim vodama. Pri pročišćavanju otpadnih voda najčešće se primjenjuju aerobni procesi pod uvjetom da postoji dovoljna količina kisika. Biološke procese pri pročišćavanju otpadnih voda moguće je primijeniti ondje gdje su njihova onečišćenja biološki razgradiva i ne sadržavaju otrovne tvari u kritičnim količinama. Biološki se procesi primjenjuju zato da se iz otpadnih voda ukloni organski ugljik te smanje fosforni i dušikovi spojevi (procesima nitrifikacije i denitrifikacije) [5].

3. BILJNI UREĐAJI

Biljni uređaj je uređaj koji je projektiran i izveden prema načelima prirodnog močvarnog sustava. Pročišćavanje otpadnih voda uključuje njezin prolaz kroz medij sastavljen od mikroorganizama, biljaka i supstrata kroz kombinaciju fizikalnih, kemijskih i bioloških procesa. Pročišćavanje uključuje prolazak vode kroz medij sastavljen od mikroorganizama, biljaka i supstrata. U procese obrade otpadnih voda u biljnim uređajima ubrajaju se filtracija i slijeganje suspendiranih tvari, biodegradacija, asimilacija hranjivih tvari biljkama i kemijske reakcije [3]. Odvijanje procesa razgradnje otpadnih tvari u biljnim uređajima počiva na procesima koji se odvijaju u prirodi. Tablica 3 prikazuje mehanizme uklanjanja tvari iz otpadne vode [3].

TABLICA 3. Pregled mehanizama uklanjanja tvari iz otpadne vode [3]

| Tvari sadržane u otpadnoj vodi | Mehanizmi uklanjanja |
|--------------------------------------|---|
| Ukupne suspendirane tvari | Sedimentacija i filtracija |
| Organske tvari (mjerene kao BPK) | Biološka degradacija i sedimentacija |
| Organski zagađivači (npr. pesticidi) | Adsorpcija, isparavanje, fotoliza (biološka i nebiološka degradacija) |
| Dušik | Sedimentacija, nitrifikacija/denitrifikacija, mikrobiološka razgradnja |
| Fosfor | Sedimentacija, filtracija, adsorpcija, adsorpcija biljkama i mikroorganizmima |
| Metali | Sedimentacija, adsorpcija biljkama, mikrobiološki oksidacijsko/redukcijski procesi |
| Patogeni | Sedimentacija, filtracija, prirodno odumiranje, UV zračenje, antibiotsko djelovanje iz korijena biljaka |

U biljnim uređajima se većinom koriste biljke koje se prirodno nalaze u obalnim područjima jezera i močvara, a nazivaju se helofiti. U helofite se ubrajaju vrste *Phragmites australis* (trska) i vrste rodova *Carex* (šas), *Scirpus* (šasina), *Typha* (rogoz), *Sparganium erectum* (uspravni ježinac), *Scirpus lacustris* (obični oblič), *Iris pseudacorus* (žuta perunika), *Carex sp.* (šas), *Phalaris arundinacea* (blještac). Fitoremedijacija je proces koji se temelji na sposobnosti zelenih biljaka da izluče i koncentriraju određene elemente u ekosistemu. Ekološki je prihvatljiva tehnologija koja koristi biljke za razgradnju, asimilaciju, metabolizam ili detoksifikaciju različitih onečišćivača okoliša. Koristi se za uklanjanje onečišćivača iz tla, vode i

zraka. Nakon tretiranja, tlo se može ponovno koristiti za proizvodnju hrane. Fitoremedijacija se primjenjuje za uklanjanje alarmantnih vrsta onečišćujućih tvari i njihovih kompleksnih mješavina. To su teški metali, radionuklidi i organski ksenobiotici koji većinom dopijevaju u tlo kao rezultat rutinskih antropogenih aktivnosti u poljoprivrednom sektoru, atmosferskim taloženjem iz zraka i nepravilnim odlaganjem otpada. Učinkovitost fitoremedijacije najviše ovisi o odabiru biljne vrste za sanaciju određenog područja. Pri odabiru najprikladnije biljne vrste ponajprije je potrebno uzeti u obzir tip onečišćenja te svojstva, pokretljivost i dubinsku raspodjelu onečišćujućih tvari, a potom razmotriti ostale faktore poput svojstava tla te okolišnih i klimatskih uvjeta. Neki primjeri biljnih vrsta uspješnih u fitoremedijaciji prikazani su u Tablici 4. Potrebno je izbjegavati primjenu egzotičnih biljnih vrsta, koje nisu karakteristične za konkretno podneblje. Pojedini tipovi egzotične močvarne vegetacije mogu se brzo i invazivno širiti na okolno područje (sjeme nošeno vjetrom, vodom i dr.) te izazvati neželjene posljedice u okolišu, onemogućujući razvoj autohtonoj flori [4].

TABLICA 4. Primjeri biljnih vrsta uspješnih u fitoremedijaciji onečišćujućih tvari [7]

| BILJNA VRSTA | ONEČIŠĆUJUĆE TVARI |
|---|--|
| Suncokret (<i>Helianthus annuus</i>) | Co, Pb |
| Slonova trava(<i>Pennisetum sp.</i>) | Cu, Klorbenzen |
| Vodeni zumbul (<i>Eichhornia crassipes</i>) | Fe, Zn, Cd, Pb, Ag, Ni ³³ |
| Pravi lan (<i>Linum usitatissimum</i>) | Pb, Zn ³⁴ , Cd ³⁵ |
| Uljana repica (<i>Brassica napus L.</i>) | Pb, Zn, Cu ³⁸ |
| Topola (<i>Populus spp.</i>) | Cd, nitrati, TNT, PCB |
| Vrba (<i>Salix spp.</i>) | Cd, Zn, Pb ⁴⁴ , PAH ⁴² |

Neke od prednosti metode fitoremedijacije su:

1. Trošak energije i posljedično ukupni financijski trošak fitoremedijacije je značajno niži od konvencionalnih procesa dekontaminacije.
2. Biljke se mogu jednostavno nadgledati i pratiti promjene koncentracija otrovnih tvari.

3. Postoji mogućnost "*recikliranja*" vrijednih metala iz pepela korištenih biljaka.
4. Ovo je potencijalno najmanje štetna metoda jer koristi žive organizme (prirodu), a ne kemikalije pa ima najmanji utjecaj na okoliš.
5. Biljni materijal koji je upio toksine se može obraditi: sušenjem i paljenjem.
6. Krajnja količina proizvedenog toksičnog otpada nakon tretiranja je samo manji dio količine toksičnog otpada dobivenog korištenjem konvencionalnih metoda.

Neki od nedostataka fitoremedijacije su:

1. Znanstvenici nisu zadovoljni brzinom kojom biljke dekontaminiraju tlo te se vrše veliki naponi u pronalaženju GMO biljaka koje bi radile brže na uklanjanju polutanata iz tla. U nekim se slučajevima geni jetre sisavaca unose u biljke radi ubrzavanja detoksifikacije. Doduše, postavlja se pitanje koliko su ovakva nastojanja etički prihvatljiva.
2. Iako ova metoda generira značajno manje količine toksičnog otpada, još uvijek se lome koplja oko najboljeg načina odlaganja. Postoji nada da će se zelena masa s nakupljenim toksinima moći u budućnosti koristiti kao biogorivo.
3. Uspješnost fitoremedijacije ovisi o dubini na kojoj se korijenje razvija. Što je kontaminant dublje u tlu, duže će trebati korijenu da dopre do njega.
4. Tijekom fitoremedijacije, dolazi do bioakumulacije toksina koji mogu ući u hranidbeni lanac. Na taj način postaje štetna za neke male organizme koji je u prirodi konzumiraju. Ovaj se problem rješava ograđivanjem tretiranih područja. Nisam pronašla podatke o utjecaju akumuliranih teških metala u npr. bagremu na sadržaj bagremovog meda.
5. Kod fitoremedijacije, ponekad problem predstavlja i neprilagođenost biljne vrste na klimatske uvjete područja u kojem je potrebno saditi.
6. Preživljavanje biljaka ovisi o stupnju onečišćenosti tretiranog tla [7].

3.1. Parametri koji utječu na rad biljnog uređaja

Na rad biljnog uređaja utječu određeni parametri, a to su: makrofiti i supstrat, kisik, temperatura i pH otpadne vode. Pročišćavanje otpadnih voda u filtarskom tijelu biljnog uređaja rezultat je složenih interakcija. U biljnom uređaju prisutan je mozaik područja s različitim razinama kisika, što pobuđuje različite procese degradacije i uklanjanja onečišćavajuće tvari. Biološko pročišćavanje u filtarskom tijelu zasniva se na aktivnosti mikroorganizama, poglavito aerobnih i fakultativnih bakterija. Ti mikroorganizmi rastu na površini čestica supstrata i korijenja.

3.1.1. Makrofiti i supstrat

Makrofiti su biljke koje rastu djelomično ili potpuno u vodi. Nalaze se ukorijenjene u plitkim područjima jezera ili rijeka ili slobodno plutaju u vodi ili na njenoj površini. Budući da svaka biljka ima individualne potrebe, različite vrste zemlje, poznate kao i supstrati, sadrže različite kombinacije sastojaka. Supstrati omogućuju biljkama da čvrsto stoje na podlozi te omogućuju dovoljnu količinu hranjivih tvari za biljke. U novije vrijeme, osim šljunka i pijeska, ispituju se i različite vrste šljake, morskih školjaka i drugih filtarskih materijala kao supstrata [3]. Neophodna stavka biljnih uređaja su makrofiti zbog svojih posebnih svojstava. Jedna od važnijih funkcija makrofita je fizički učinak. Oni stabiliziraju površinu biljnog uređaja, osiguravaju fizičku filtraciju, štite od smrzavanja u zimskim mjesecima i stvaraju velike površine za rast mikroorganizama [3]. Glavni čimbenici koji sudjeluju u pročišćavanju otpadnih voda su mikroorganizmi. Mikroorganizmi koriste organske tvari kao hranu i izvor energije, a tijekom tog procesa organsku tvar pretvaraju u biomasu i energiju. Velik dio mikroorganizama smješten je na površini korijenja ili supstrata [3]. Mikroorganizmi (virusi, bakterije, plijesni, kvasci, alge, praživotinje) su jednostanični i višestanični organizmi koji se nalaze u svim otpadnim vodama. Za procese pročišćavanja otpadnih voda od naročitog su značenja sljedeće dvije skupine mikroorganizama. Mikroorganizmi razlagači (saprofagni mikroorganizmi) i mikroorganizmi iz probavnog trakta ljudi i životinja (fekalni mikroorganizmi). Mikroorganizmi razlagači biološki razgrađuju organsku tvar do anorganske, troše otopljeni kisik, pa se može pojaviti neželjeni manjak (deficit) kisika, odnosno anaerobno stanje. Prema optimalnoj temperaturi, za razvoj, saprofagni mikroorganizmi se dijele na krioofilne (psikrofilne) s optimalnom temperaturom od 0 do 5 °C, mezofilne s optimalnom temperaturom od

20 do 40 °C i termofilne s optimalnom temperaturom > 40°C (najbolje 55 do 60 °C). Mikroorganizmi iz probavnog trakta ljudi i životinja su temeljni pokazatelji kućanskih otpadnih voda, ali ih ima i u industrijskim otpadnim vodama. Među ovom skupinom mikroorganizama su posebno značajni patogeni mikroorganizmi koji mogu biti uzročnici oboljenja (tifusa, paratifusa, hepatitisa, poliomijelitisa, kolere, tuberkuloze, dizenterije). Bolesti se mogu prenijeti kupanjem u nečistoj vodi (zbog dodira s kožom ili zbog gutanja vode) i naročito konzumiranjem proizvoda iz vode (npr. školjki koje se jedu sirove). Kao indikator zagađenja ovim mikroorganizmima obično služe bakterije normalne crijevne flore ljudi i životinja – koliformne bakterije, određene kao najvjerojatniji broj bakterija (NBB). Kad fekalni mikroorganizmi dopiju u prijemnik (okoliš) s drugačijim uvjetima za život (temperatura, koncentracija vodikovih iona, ultraljubičasto zračenje) postepeno iščezavaju. Vrijeme iščezavanja nije jednako za sve mikroorganizme, a prvenstveno ovisi o sadržaju otopljenih (hranjivih) soli u vodi [8].

3.1.2. Kisik u biljnom uređaju

Prisutnost kisika u atmosferi iznosi 21% vol., no topljivost kisika, kao produkta fotosinteze, u vodenom mediju je vrlo slaba što je vrlo često ograničavajući faktor rasta biljaka u biljnom uređaju. Močvarne biljke su se prilagodile rastu i razvoju u uvjetima siromašne opskrbljenosti kisikom [3]. Temperatura, otopljene soli i biološka aktivnost, koja se odvija u tom mediju, određuju koncentraciju otopljenog kisika u vodi zato što se povišenjem temperature smanjuje topljivost kisika. Otopljeni kisik u otpadnoj vodi koja nastaje prolaskom kroz biljni uređaj događa se zbog:

- procesa fotosinteze,
- fizikalnog prijenosa kisika iz zraka u vodu
- prijenosa kisika zbog prolaska vode kroz supstrat i
- prijenosa kisika iz biljke u vodu [3].

3.1.3. Temperatura i pH otpadne vode u biljnom uređaju

Temperatura otpadne vode uglavnom je veća od temperature ulazne vode. Ovisi o geografskom smještaju izvora otpadne vode i/ili tehnološkom procesu u kojem nastaje. Njihova je temperatura od 10 °C do 21 °C. Godišnje doba određuje

temperaturu otpadnih voda. Temperatura okoliša i vodenog medija oscilira zbog brojnih čimbenika. Varijacije temperature vodene sredine se dijele na dnevne i sezonske. Solarna oscilacija tj. izmjena dana i noći pripadaju dnevnim oscilacijama. Sukladno s tom činjenicom, temperatura vode prati temperaturne oscilacije atmosfere. Učinak biljnog uređaja ovisi znatno o promjeni godišnjeg doba što je primjer sezonskih temperaturnih oscilacija. Temperatura okoliša i otpadne vode važan je parametar koji je potrebno poznavati pri dizajniranju biljnog uređaja [3,4]. Temperatura određuje brzine kemijskih reakcija u otpadnim vodama. Povećanje temperature zraka, smanjuje topljivost kisika. Idealna temperatura mikrobiološke aktivnosti iznosi između 25 i 35 °C [3]. pH vrijednost otopine utječe na biokemijske procese. Stvaranjem ioniziranih i neioniziranih oblika kiselina i baza kontrolira se topljivost mnogih plinova i krutina. Vodikovi ioni sastavni su dio kationskog sadržaja vodenog medija unutar biljnog uređaja i aktivno sudjeluju u procesu kationske izmjene [3]. Kemijski i biološki procesi koji se odvijaju unutar biljnih uređaja ovise o pH vrijednosti vodenog medija. Optimalno područje pH većine bakterija nalazi se unutar $4,0 < \text{pH} < 9,5$. Denitrificirajuće bakterije aktivne su u pH području $6,5 < \text{pH} < 7,5$, a nitrificirajuće bakterije pri $\text{pH} \geq 7,2$. Isto načelo vrijedi i za druge organizme unutar močvarnog sustava. Vrijednosti pH prirodnih močvarnih sustava kreću se od blago alkalnih (pH 7 - 8) do jako kiselih (pH 3 - 4) [3].

3.2. Vrste biljnih uređaja

Postoje različite vrste biljnih uređaja, a dijele se prema načinu nastanka i prema smještaju biljnih uređaja:

- prirodni biljni uređaji – prirodno nastali močvarni sustavi za obrađivanje otpadnih voda, i
- umjetno izvedeni biljni uređaji – nalaze se na mjestima gdje prirodno ne bi nastali

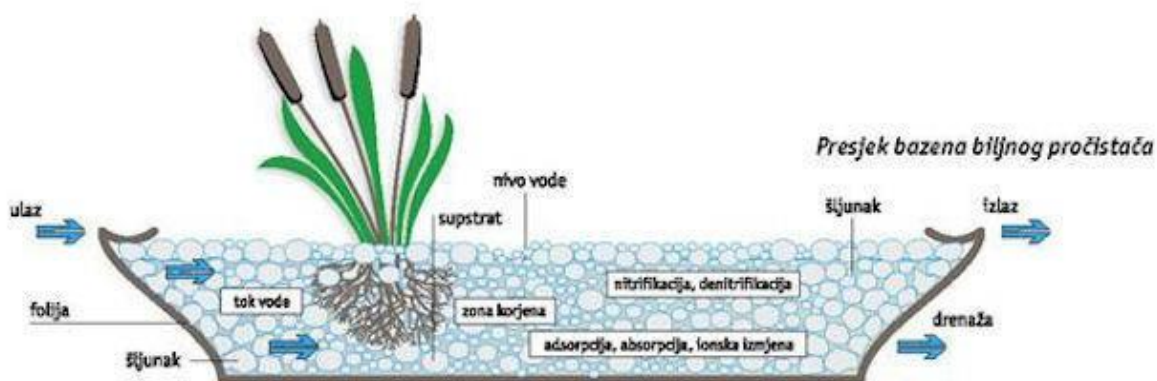
Osnovna podjela umjetno izvedenih biljnih uređaja glasi:

- površinski biljni uređaji (Slika 1)
- potpovršinski biljni uređaji (Slika 5 i 6)

Površinski biljni uređaji su sustavi kod kojih je vodeni medij, koji prolazi kroz sustav, izložen atmosferi, a u njemu se nalaze zasađene različite biljne vrste. Daljnja

podjela površinskih biljnih uređaja može se napraviti na osnovi vrsta biljaka koje su u njima zasađene:

- površinski biljni uređaji kojima se dijelovi biljaka nalaze iznad površine vode,
- površinski biljni uređaji u kojima dijelovi biljaka plutaju po površini vode, i
- površinski biljni uređaji kod kojih su biljke uronjene ispod razine površine vode [3].



SLIKA 1. Površinski biljni uređaj s dijelovima biljaka iznad površine vode [9]

Površinski biljni uređaji kojima se dijelovi biljaka nalaze **iznad površine vode** su najkorišteniji sustavi kod obrađivanja otpadnih voda. Ti uređaji se sastoje od niza međusobno povezanih kanala i/ili bazena (Slika 2). Uređaj se konstruira na način da se na vodonepropusni sloj postavlja sloj zemlje s posađenim biljkama, a zatim se kanal/bazen poplavljuje što dovodi do relativno malog protoka. Površinski biljni uređaji su djelotvorni za uklanjanje ukupnog dušika i fosfora [3,13].



SLIKA 2. Međusobno povezani bazeni kod površinskih biljnih uređaja [10]

U površinskim biljnim uređajima s **plutajućim biljkama na vodenoj površini** (Slika 3) sade se biljke poput lopoča, vodenih leća i njima slične. Sposobnost ovih biljaka je uklanjanje nutrienata (dušika (do 90%), fosfora (80%) i ugljika (do 80%)) i

kontroliranje rasta algi u otpadnim vodama. Plutajuće biljke stvaraju mrežu koja umanjuje prodor svjetlosti u vodu, smanjuje prenošenje biljaka uzrokovano vjetrom i turbulencijom i stvara mogućnost lakog taloženja suspendiranih tvari. Mreža biljaka je često nepravilnog oblika.



SLIKA 3. Površinski biljni uređaj s plutajućim biljkama na površini vode [4]

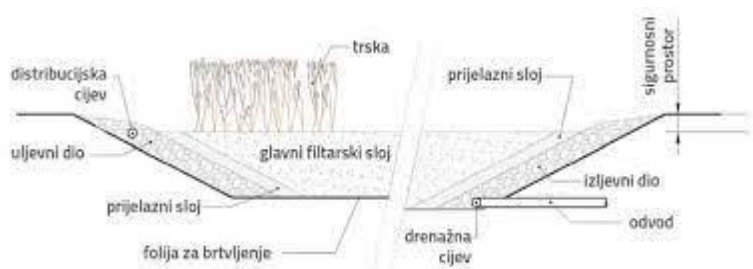
Sustavi površinskih biljnih uređaja s **biljkama ispod razine vode** (Slika 4.) se još uvijek nalaze u procesu istraživanja njihovog rada i učinkovitosti pročišćavanja otpadnih voda. Za rad površinskih biljnih uređaja preporučuje se voda koja je prošla primarnu i sekundarnu obradu [3].



SLIKA 4. Površinski biljni uređaj s biljkama ispod površine vode [11]

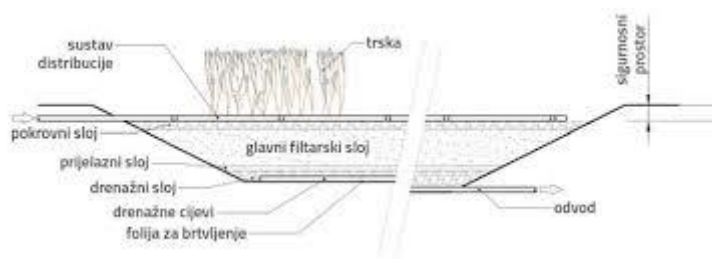
Potpovršinski biljni uređaj sastoji se od jednog ili više bazena napunjenih supstratom različite granulacije, dok se na dnu bazena nalazi nepropusni sloj. Otpadna voda u njih se dovodi na način da prolazi kroz granularni medij (supstrat), bez dodira s atmosferom. Površina bazena može biti suha ili mokra. Na površini se nalaze zasađene biljke čije korijenje prolazi kroz supstrat kao podrška korijenskom

sustavu ili služi kao podloga za razvijanje mikroorganizama. Prema načinu ulaska otpadne vode u sustav, potpovršinski biljni uređaji se dijele na horizontalne i vertikalne [3]. Voda u potpovršinskom biljnom uređaju s horizontalnim protokom (Slika 5) ulazi i teče kroz uređaj horizontalno do izlaza. Kod horizontalnog prolaska vode dolazi do konstantnog zasićenja supstrata, a prenošenje kisika iz atmosfere odvija se pomoću biljaka. Česta upotreba potpovršinskih biljnih uređaja s horizontalnim protokom je kod obrađivanja komunalnih otpadnih voda. Koristi se na područjima gdje ne postoji izgrađena komunalna infrastruktura, a glavni razlog je jednostavnost tehnologije pročišćavanja [3]. Otpadna voda ulazi kroz površine uređaja i procjeđuje se, a sakuplja se na dnu i odvodi perforiranim cijevima do izlaza [12].



SLIKA 5. Prikaz potpovršinskog biljnog uređaja s horizontalnim ulaskom otpadne vode [12]

U potpovršinske biljne uređaje s vertikalnim protokom (**Slika 6.**) otpadna voda ulazi kroz površine uređaja i procjeđuje se, a sakuplja se na dnu i odvodi perforiranim cijevima do izlaza. Takvi sustavi obrade vrlo su često diskontinuirani procesi, njihov supstrat nije uvijek zasićen pa se kisik difuzijom pa dolazi do lakšeg prijenosa iz atmosfere u vodeni medij. U sklopu višestupanjskog sustava biljnog uređaja vertikalni se sustav postavlja prije horizontalanog [12].



SLIKA 6. Prikaz potpovršinskog biljnog uređaja s vertikalnim ulaskom otpadne vode [12]

3.3. Močvarni sustavi

Močvarni sustavi (eng. Wetland Systems) su površine koje su većim dijelom godine naplavljene vodom zbog nepropusnosti ili slabe propusnosti tla na kojem se nalaze. Na takvim površinama rastu različite biljke, ovisno o karakteristikama vode i/ili o njihovu geografskom položaju. Korištenje močvarnih sustava za obradu otpadnih voda je stara ideja. Njihova upotreba seže iz kineske i egipatske kulture. 1950-ih godina su krenula ispitivanja rada i mogućnosti biljnih uređaja, a nastavljaju se i danas. Danska i Velika Britanija predvode u korištenju broja biljnih uređaja. Svaka ima više tisuća uporabnih biljnih uređaja čija je uloga pročišćavanje sanitarnih otpadnih voda. U Republici Hrvatskoj tek su se u proteklih nekoliko godina intenzivnije počeli realizirati projekti uređaja za obradu otpadnih voda različitih vrsta. Nedostatak financijskih sredstava, a i iskustva u uvođenju konvencionalnih sustava, usporava njihovu primjenu. Na našem području postoji nekoliko biljnih uređaja: u autokampu Glavotok na otoku Krku, u autokampu Biljar na otoku Cresu, u Žminju te biljni uređaj u Goričici Sisak (za pročišćavanje procjednih voda odlagališta), ali ne postižu znatne rezultate u obradi otpadnih voda. Najviše je horizontalnih potpovršinskih biljnih uređaja i to uglavnom za sekundarnu obradu komunalne vode. Površine takvih uređaja su 18 - 4500 m². Njihova prosječna učinkovitost BPK₅ (petodnevna biološka potrošnja kisika) iznosi 88%, UST (ukupna suspendirana tvar) iznosi 84,3%, P 51%, N 41,6%. Biljni uređaji mogu se primjenjivati na svim kontinentima, osim na Antarktiku [3]. Uspješno konstruiran biljni uređaj uključuje odgovarajući predtretman i dovoljnu količinu kisika. Iz otpadne se vode moraju izdvojiti suspendirane čestice, ulja i masti jer bi ispuštanje sirove otpadne vode u uređaj, bez prethodnog tretmana, rezultiralo učestalim začepljenjem ispune i smanjenom učinkovitosti pročišćavanja. Biljni uređaji s podpovršinskim tokom je osobito osjetljiv na učinkovitost predtretmana sirove vode, jer je kod njega bazen ispunjen poroznim supstratom čije se pukotine lagano začepe te se time smanji hidraulička provodljivost uređaja. Što je ispuna bazena sitnije granulacije (pijesak) to je bitniji predtretman voda [8]. Povećanje funkcionalnosti rada biljnog uređaja postiže se vanjskim unošenjem enzima. Biljke svojim korijenjem luče aminokiseline, enzime i druge tvari koje potiču razmnožavanje korisnih mikroba [3].

Građene močvare su umjetne močvare za pročišćavanje otpadnih voda, sivih voda, oborinskih voda ili industrijskih otpadnih voda. Izgrađena močvarna područja su

projektirani sustavi koji koriste prirodne funkcije vegetacije, tla i organizama za sekundarno pročišćavanje otpadnih voda. Građene močvare primjenjuju se:

- za pročišćavanje otpadnih voda nastalih u kućanstvima, farmama, hotelima, restoranima, kampovima, objektima seoskog turizma, turističkim i manjim naseljima
- za pročišćavanje otpadnih voda i većih naselja što ovisi o veličini zemljišnog prostora (potrebne su velike površine)
- za pročišćavanje otpadnih voda iz pojedinačnih kućanstava koja nemaju kanalizacijski priključak na mrežu ili je predaleko od kućanstva
- za procjedne vode iz odlagališta čvrstog otpada i druge vode koje sadržavaju teške metale, pesticide, fenole
- za onečišćene oborinske vode koje se slijevaju s autocesta i poljoprivrednih površina
- za pročišćavanje III. stupnja otpadnih voda nakon konvencionalnih postupaka na uređajima za pročišćavanje otpadnih voda
- za manje tvornice koje proizvode organski onečišćenu otpadne vode, kao što su obojene otpadne vode iz prehrambene i tekstilne industrije [5].

Istraživanja su pokazala da se najbolji rezultati pročišćavanja postižu kod otpadnih voda nastalih u kućanstvu [5]. Za većinu mikrobioloških aktivnosti voda je jedan od najvažnijih čimbenika. U močvarnim sustavima biljke su izložene periodičnom naplavlivanju, što znači da su svoj rast i razvoj prilagodile razdobljima s obilnim količinama vode, ali i razdobljima bez njih. Ti sustavi, otpadne vode, obrađuju se pomoću korjenastih biljnih vrsta otpornih na vodu, a koje se nalaze u plitkim naplavljenim ili zasićenim sedimentima te na različite načine omogućuju obradu otpadnih voda. Prema tim svojstvima, močvarni sustavi svrstavaju se u biološki najproduktivnije sustave. Ovi sustavi onečišćivače iz otpadnih voda pretvaraju u bioprodukte koji nisu štetni ili hranjiva koja mikroorganizmima omogućuju rast i razvoj [3,4].

4. OBRADA OTPADNE VODE U BILJNOM UREĐAJU

Proces obrade otpadne vode u biljnom uređaju odvija se uklanjanjem suspendiranih tvari, organskih tvari, dušičnih spojeva, fosfora i mikroorganizama. Uloga vodenih biljnih vrsta se sastoji u sljedećem: služe kao stanište mikroorganizama, izvor su kisika, razgrađenu organsku materiju ugrađuju u svoje tkivo što omogućuje uporabu ovih biljaka za kompostiranje ili proizvodnju energije poslije košnje, akumuliraju i pojedine otrovne tvari poput teških metala ili pesticida (pri koncentracijama tih opasnih tvari iznad dopuštene granice, ove biljke se neće koristiti za košnju nego se odlažu na deponij).

4.1. Uklanjanje suspendiranih tvari

Jedna od osnovnih funkcija koju biljni uređaj obavlja je uklanjanje ukupnih suspendiranih tvari pri prolasku otpadne vode kroz sustav. Gustoća vode zajedno s postojećom vegetacijom i supstratom unutar uređaja omogućava taloženje i filtraciju krutih čestica zbog različitih gustoća. Prijenos suspendiranih tvari iz vodene faze u talog biljnog uređaja znatno utječe na kvalitetu vode, karakteristike uređaja i funkcioniranje ekosustava biljnog uređaja. Mnogi zagađivači blisko su vezani za otpadne vode bogate suspendiranim tvarima koje sadrže veliki udio organskih tvari, a i različit sadržaj metala. Veliki sadržaj ukupnih suspendiranih tvari u otpadnoj vodi pridonosi popunjavanju pora unutar potpovršinskog biljnog uređaja. Kada otpadna voda bogata suspendiranom tvari uđe u biljni uređaj, pridružuje se velikoj količini interno nastalog suspendiranog materijala. Ukupna suspendirana tvar nakon toga se prenosi kroz uređaj. Tijekom njezina prijenosa kroz uređaj odvijaju se sedimentacija, filtracija, resuspenzija i stvaranje nove suspendirane tvari potaknute djelovanjima ispod i iznad površine vode [3,4]. Sezonske oscilacije temperatura utječu na uklanjanje ukupnih suspendiranih tvari u površinskom biljnom uređaju. U potpovršinskom biljnom uređaju taj je utjecaj zanemariv te se pri proračunu za takve uređaje ne uzimaju u obzir korekcije temperaturnih vrijednosti kao pri proračunu za površinske biljne uređaje [3].

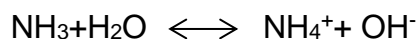
4.2. Uklanjanje organskih tvari

Organska tvar je vrsta tvari koja nastaje od ostataka organizama kao što su biljke, životinje i njihovih otpadnih tvari koje se mogu naći u okolišu. Sustavi s anaerobnim

zonama omogućuju anaerobnu razgradnju organskih tvari. Elementi kao što su sumpor, fosfor i željezo također mogu biti prisutni. U osnovne skupine spojeva, koje čine organske tvari, ubrajaju se proteini, ugljikovodici te ulja i masti. Urea (glavni sastojak urina) pridonosi sadržaju organskih tvari u otpadnim vodama [3]. Tvari koje sadrže ugljik vrlo su često u interakciji s močvarnim ekosustavima. Ciklus kruženja ugljika u močvarnim sustavima je vrlo širok i omogućuje stvaranje ugljikovih spojeva potrebnih za asimilaciju i održavanje sustava. Mnogi unutarnji mikrobiološki procesi odvijaju se uz pomoć ugljika koji ulazi u sustav, kao i ugljika koji nastaje pri procesima razgradnje spojeva koji sadrže ugljik [3,14]. Za rast biljaka potreban je ugljični dioksid koji biljke koriste za fotosintezu. Veliki broj različitih organizama otpušta ugljični dioksid kao produkt metabolizma. Mnogi putovi razgradnje i mikrobne aktivnosti proizvode ugljični dioksid i metan. Oba plina topljiva su u vodi do određenog stupnja pa postoji aktivan prijenos plinova iz atmosfere i u nju [3]. U ciklusu rada odumiranja i razgradnje životnih oblika u biljnim uređajima koristi se atmosferski ugljik, pri čemu nastaju plinovi, otopljeni organski spojevi i krutine. Ta razgradnja uključuje šećere, masti i niskomolekularnu celulozu. Biljni uređaji za obradu otpadnih voda primaju i velike količine iz vanjskih izvora ugljika preko otpadnih voda, uglavnom antropogenog podrijetla [3,4]. Parametar koji se najčešće upotrebljava za određivanje količine potrebnog kisika za biokemijsku oksidaciju organske tvari je petodnevna biokemijska potrošnja kisika (BPK_5). Mikroorganizmi koriste organske tvari kao izvor hrane, pri čemu u metaboličkim procesima troše otopljeni kisik. Potrošnja kisika u procesu mikrobiološke razgradnje organskih tvari mjeri se posredno, preko pada parcijalnog tlaka ili koncentracije kisika u vodi, tj. kao razlika koncentracije kisika na početku i nakon 5 dana inkubacije [3,4].

4.3. Uklanjanje dušičnih spojeva u otpadnoj vodi

Najvažniji anorganski spojevi u močvarnim sustavima su amonijak (NH_4^+), nitrit (NO_3^-), nitrooksid - dušični oksidul (N_2O), otopljeni elementarni dušik i diatomarni dušik u plinskoj fazi N_2 . Dušik je prisutan u mnogim organskim oblicima spojeva, kakvi su urea, aminokiseline, amini, purini i pirimidini [3]. Proces razgradnje dušičnih spojeva je vrlo složen. Intermedijari ciklusa pri eutrofikaciji utječu na sadržaj kisika u vodi, dok pojedini štetno djeluju na živa bića. U vodenim otopinama amonijak se javlja u ioniziranoj i neioniziranoj formi (tri ili četiri vodikova atoma) ovisno o temperaturi vode i pH [3].



Amonijak je vrlo važan u močvarnim sustavima i drugim površinskim vodama zbog tri razloga. Jedan od glavnih izvora dušika za biljne vrste i autotrofne bakterijske vrste koje pretvaraju jednostavne anorganske spojeve u organske. Kemijski lako oksidira što uvjetuje veće trošenje kisika. Niska koncentracija neioniziranog amonijaka (već od 0,2 mg/L) štetno djeluje na mnoge jedinke koje žive u vodi. Amonijak čini jedan od osnovnih oblika dušika. Nalazi se u većini otpadnih voda, osobito komunalnih. Smanjenje koncentracije amonijaka jedan je od primarnih ciljeva prema kojima se vodi proces projektiranja uređaja za obradu otpadnih voda, pa tako i biljnih uređaja, zbog njegove potencijalne mogućnosti degradacije vodenog okoliša u kojem se nađe [3].

4.3.1. Amonifikacija

Amonifikacija je biološka transformacija organskog dušika u amonijak i prvi je korak u mineralizaciji organskog dušika. Amonijak nastaje kao posljedica niza kompleksnih, višestupanjskih biokemijskih procesa razgradnje organskih spojeva koji sadrže dušik. Pri tim procesima oslobađa se energija (hidroliza uree i urične kiseline). U većini slučajeva energija se koristi za rast mikroorganizama (biomasa), a amonijak se ugrađuje u mikrobnu biomasu. Veliki dio organskog dušika u otpadnim vodama već je konvertiran u amonijak pa projektanti pri dimenzioniranju biljnih uređaja u obzir moraju uzeti i dušik koji nastaje amonifikacijom [3].

4.3.2. Nitrifikacija

Nitrifikacija je aerobni dvostupanjski mikrobiološki proces razgradnje amonijaka u kojem nastaje nitrat. Autotrofna nitrifikacija je osnovni transformacijski mehanizam koji smanjuje koncentraciju amonijaka u sustavima za obradu otpadne vode biljnim uređajima. U tom procesu sudjeluje mješovita mikrobna zajednica u kojoj su najzastupljenije bakterije. Da bi se omogućio proces nitrifikacije, moraju postojati bakterije iz porodice *Nitrobacteriaceae*, roda *Nitrosomonas* sp., koje su zaslužne za oksidiranje amonijaka u nitrit, ali i bakterije roda *Nitrobacter* sp, a one omogućuju oksidaciju nitrita u nitrat. Obje reakcije odvijaju se uz prisutnost kisika [3].

4.3.3. Denitrifikacija

Denitrifikacija je proces prevođenja nitrata s pomoću mikroorganizama u plinoviti dušik. U tom procesu nitrat je oksidirajuća tvar u otpadnoj vodi, a za njegovo prevođenje u plinoviti dušik potreban je donor elektrona. Prvi korak denitrifikacije je prevođenje nitrata u nitrit, a zatim slijedi stvaranje dušičnog oksida, dušičnog oksidula te na kraju dušika [3,8]. Proces se odvija u anaerobnim uvjetima (bez zraka), odnosno točnije rečeno u anoksičnim uvjetima (bez kisika). Stalna brzina odvijanja procesa događa se pri temperaturi od 20°C do 40°C, dok do usporavanja procesa dolazi pri temperaturama nižim od 10°C. Najveća brzina denitrifikacije postiže se pri 35 °C. Uz temperaturu, stupanj denitrifikacije ovisi i o izvoru ugljika u otpadnoj vodi. Denitrifikacija se odvija pri pH od 7 do 9, a postupkom denitrifikacije povećava se pH vrijednost otpadne vode [3]. Površinski biljni uređaji pospješuju nitrifikaciju, a nezasađeni potpovršinski biljni uređaji mogu se koristiti kao denitrificirajuće jedinice. Kombinacijom vertikalnog s horizontalnim potpovršinskim biljnim uređajem povećava se učinkovitost uklanjanja svih tvari u otpadnoj vodi u odnosu na korištenje samo horizontalnog sustava [13].

4.4. Uklanjanje fosfora

Fosfor je nutrient potreban za rast bilja, a često je limitirajući čimbenik rasta vegetacije. Odnos tvari u biomasi nekog sustava koji je prijeko potreban za rast mikroorganizama je: C:P:N = 106:16:7 (molarni odnosi) ili 41:7:1 (maseni odnosi) [3]. U biljnom uređaju vladaju uvjeti koji omogućavaju konverziju (izmjenu) različitih oblika fosfornih spojeva i njihovo kruženje. Spojevi s fosforom u biljnim uređajima se uklanjaju fizikalno kemijskim procesima i biološkom transformacijom fosfata [3]. Najbrži način uklanjanja fosfata iz otpadne vode je mikrobiološki. Netopljivi anorganski i organski fosfati obično nisu dostupni biljkama dok se ne transformiraju u otopljeni organski oblik. Te transformacije mogu se odvijati na biofilmu ili u sedimentu s pomoću mikroorganizama [3]. Proces biološkog uklanjanja fosfora iz otpadne vode osniva se na biološkoj aktivnosti mikroorganizama, posebice bakterija koje mogu nakupljati ili otpuštati fosfat, što određuje količina kisika koji se otapa u vodi kao i izvor ugljika u otpadnoj vodi. U uvjetima s prisustvom kisika dolazi do gomilanja fosfata u stanicama (bakterijama), dok u uvjetima bez kisika dolazi do otpuštanja fosfata iz stanica bakterija [3].

4.5. Uklanjanje mikroorganizama

Ljudski patogeni uvijek su prisutni u neobrađenoj komunalnoj otpadnoj vodi. U patogene organizme prisutne u otpadnoj vodi pripadaju grupe virusa, bakterija, plijesni, gljivica i praživotinja. Patogeni organizmi opstaju na račun svog domaćina, i to u većini slučajeva zbog gostoprimljivog okoliša koji pruža prijeko potrebne uvjete za reprodukciju, a takav je okoliš upravo otpadna voda. Čimbenici kao što je prirodno odumiranje, temperatura i ultraljubičasto svjetlo uništavaju mikroorganizme, a grabežljivci i sedimentacija omogućavaju smanjenje populacije patogena [4]. U biljnim uređajima projektiranim za obradu otpadnih voda, sedimentacijom se akumulira znatna koncentracija patogenih mikroorganizama. Uklanjanje patogenih mikroorganizama iz otpadnih voda vrši se taloženjem, koagulacijom i adsorpcijom u tlo. Sedimentacija patogenih organizama povezana je s veličinom čestica koje sedimentiraju. Sediment u biljnom uređaju produžuje opstanak bakterija i virusa, ali ne i parazita [3].

5. PRIPREMA, IZGRADNJA I ODRŽAVANJE BILJNOG UREĐAJA

5.1. Pripremne aktivnosti za izgradnju biljnog uređaja

Nakon donošenja odluke o obradi otpadne vode biljnim uređajem, potrebno je definirati hoće li biljni uređaj sadržavati ispunu ili je neće imati (potpovršinski ili površinski biljni uređaj). Odabirom površinskog biljnog uređaja, mora se odlučiti koje će se biljke koristiti zbog njihovog položaja u biljnom uređaju (ispod površine, na površini ili kombinirano). Ako se odabere potpovršinski biljni uređaj, potrebno je odrediti način dotoka otpadne vode u uređaj (horizontalno ili vertikalno) [3,7]. Pri odabiru lokacije potrebno je poznavati klimatske značajke područja, topografski položaj, sastav tla, eventualno postojanje podzemnih voda i socioekonomske čimbenike. Pri izgradnji biljnog uređaja potrebno je osigurati vodonepropusnost bazena, što je moguće na dva načina: korištenjem vodonepropusnih folija ili izgradnjom uređaja na tlu s vodonepropusnošću (takve karakteristike imaju glinena tla) [3,4]. Pri topografskom odabiru lokacije, ako je moguće biljni uređaj potrebno je smjestiti tako da se osigura gravitacijski proces obrade otpadne vode. Tako se smanjuje ili eliminira potencijalno potrebna energija za rad uređaja. Mikroklimatske karakteristike područja utječu na učinkovitost rada biljnog uređaja, stoga se ti parametri uzimaju u obzir kod dimenzioniranja biljnog uređaja [3]. Svako projektiranje uređaja za obradu otpadnih voda, pa tako i biljnog uređaja, započinje određivanjem količine i kakvoće otpadne vode te se u obzir uzimaju zahtjevi za izlaznom kvalitetom vode. Poznavanje fizikalnih, kemijskih i bioloških karakteristika otpadne vode vrlo je važno za projektiranje, izvedbu i upravljanje sustavom skupljanja, obrade i ispuštanja obrađene otpadne vode u recipijent [3,13]. Važno je znati ulaznu količinu otpadne vode, odnosno protok vode, zbog određivanja volumena biljnog uređaja. Protok otpadne vode mora obuhvaćati sezonske, dnevne i tjedne varijacije te utjecaj oborina na području lokacije zato što biljni uređaj mora funkcionirati u svim uvjetima [3,13]. Drugi, jako važan parametar za dimenzioniranje biljnog uređaja koji mora biti definiran prije početka izvedbe proračuna je kakvoća otpadne vode, odnosno koncentracija onečišćenja koje se mora umanjiti. U obzir se uzimaju sezonske, dnevne i/ili tjedne varijacije. Za komunalne otpadne vode i otpadne vode slične komunalnima ti parametri su uglavnom poznati. Za specifične vrste otpadnih voda, ne postoje podaci praćenja koncentracija polutanata, potrebno ih je izmjeriti [3]. Potrebno je definirati kvalitetu efluenta i recipijent koji će pročišćenu otpadnu vodu

prihvatiti. Da bi se definirali zahtjevi za izlaznom kvalitetom efluenata, potrebno je analizirati postojeću zakonsku regulativu koja će odrediti tražene parametre. Definiranjem kakvoće otpadne vode omogućava će donošenje odluke o potrebi predobrade otpadne vode u kojoj je cilj taloženje ili separacija krupnijih nečistoća [3]. Za planiranje izgradnje potpovršinskog biljnog uređaja, potrebno je odrediti vrstu i veličinu ispune biljnog uređaja kako bi se svojstva ispune mogla koristiti kod izračuna veličine uređaja [3].

5.2. Dimenzioniranje biljnog uređaja

Projektiranje uređaja za obradu otpadnih voda temelji se na protoku, koncentraciji onečišćivala i masenom opterećenju bazne komponente projektiranja. Projektiranje biljnih uređaja ima veliku važnost, a to dokazuje podatak da je za vrijeme 90-ih godina došlo do realizacije velikog broja biljnih uređaja na području Velike Britanije. Velik dio biljnih uređaja je bio projektiran bez stručnog nadzora, a to je dovelo do nedovoljnog pročišćavanja otpadnih voda [3,13].

5.2.1. Pročišćavanje potpovršinskim biljnim uređajem

Odlaganjem komunalnog otpada na uređeno odlagalište, procjedna voda nastala otjecanjem kroz otpad skuplja se na temeljnom brtvenom sloju i drenažnim sustavom odvodi izvan odlagališnog prostora, gdje se skuplja u sabirni bazen [3]. Sustav procjednih voda vrlo je različit i ovisi o vrsti i starosti otpada te o količini oborina. Takve otpadne vode se ne smiju ispuštati u okoliš ako nisu obrađene. Procjeđivanjem oborinskih voda kroz otpad dolazi do onečišćenja različitim topljivim organskim i anorganskim tvarima [3]. Procjedne vode uspješno se mogu pročistiti poznatim tehnološkim procesima koji za svoj rad zahtijevaju energiju. Nerijetko su manja odlagališta odvojena od postojeće infrastrukture te je stoga teško izvediva obrada procjednih otpadnih voda na lokaciji odlagališta uz uporabu energije [3]. Za odlagalište komunalnog otpada koje je u postupku zatvaranja potrebno je dimenzionirati potpovršinski biljni uređaj za obradu procjednih voda za koji su zadani sljedeći parametri kvalitete otpadne vode (BPK_5) i literaturnih podataka za potpovršinske biljne uređaje. Pri izračunu parametara za dimenzioniranje biljnog uređaja uzima se srednja ulazna vrijednost BPK_5 koja iznosi $1200 \text{ mgO}_2/\text{L}$, a minimalna temperatura područja na kojem se na kojem se planira izvesti biljni uređaj 6°C . prema propisima u Republici Hrvatskoj, na zahtjev za kvalitetom efluenata

utječe kategorija prijemnika i veličina uređaja. S obzirom na niske ulazne vrijednosti i tehnologiju obrade otpadne vode s kojom je moguć visok postotak uklanjanja BPK₅, za ciljanu izlaznu vrijednost BPK₅ uzet je kriterij koji iznosi 40 mgO₂/L, što odgovara graničnoj vrijednosti dopuštene koncentracije BPK₅ za ispuštanje otpadne vode u prirodni prijemnik III. kategorije [3].

5.3. Izgradnja biljnog uređaja

Biljni uređaj sastoji se od bazena definiranih dimenzija. Izvođenje građevinskih radova iskopa i pripreme bazena najbolje je započeti tijekom suhog dijela godine. Bazen biljnog uređaja izvodi se s pokosom do 1:3. Prije postavljanja nepropusne folije u bazen potrebno je na dno bazena postaviti sloj sitnog pijeska da bi se spriječio proboj folije. U biljnim uređajima supstrat je uglavnom pijesak ili šljunak različite granulacije, a odabirom supstrata se utječe na učinkovitost eliminiranja otpadnih tvari u biljnom uređaju. Šljunak koji se planira postaviti u potpovršinski biljni uređaj mora se isprati prije njegova postavljanja u bazen da bi se spriječilo začepeljivanje sustava. Krupnija granulacija postavlja se na ulazu i izlazu iz biljnog uređaja, a sitnija se granulacija postavlja u najveći dio tijela bazena [3]. Sustav ulaza otpadne vode vrlo je bitan dio biljnog uređaja. Tim sustavom mora se osigurati ravnomjerna distribucija otpadne vode u biljni uređaj, što se može ostvariti korištenjem perforiranih plastičnih cijevi. U biljnim uređajima u kojima se ne može ostvariti gravitacijski tok otpadne vode instaliraju se na ulazu pumpe dostatnog kapaciteta. Za male sustave mogu se koristiti pumpe s automatskom regulacijom protoka. Da bi se postavile pumpe potrebno je imati elektroenergetsku infrastrukturu u neposrednoj blizini biljnog uređaja. Pumpe su osjetljive u radu pri nižim temperaturama. Prije smrzavanja ih treba ukloniti s lokacije ili adekvatno izolirati. Izlaznim sustavom otpadne vode kontrolira se razina vode u uređaju [3]. Nakon punjenja bazena šljunčanom ispunom potpovršinskog biljnog uređaja sade se biljke gustoće 4-5 sadnica /m² (slika 7). Najpovoljnije razdoblje za sadnju bilja je u proljeće. Biljke svoj puni rast dosežu nakon godinu dana [3].



SLIKA 7. Bazen sa šljunčanom ispunom i biljkama [14]

5.4. Održavanje biljnog uređaja

U početku rada biljnih uređaja (oko mjesec dana) potrebno je raditi s čistom ili minimalno onečišćenom otpadnom vodom. Kasnije se treba postepeno povećavati količina onečišćenja u otpadnim vodama. Uređaji dosežu rad punom snagom u razdoblju od 3 do 4 mjeseca [3]. Prvih 12 mjeseci rada uređaja, barem jedan dan u tjednu, provodi se kontrola razine vode u uređaju, protoka, rada pumpe, ulaznih i izlaznih sustava cijevi. Poslije godinu dana rada uređaja, navedeni parametri se kontroliraju do dva puta u mjesecu. Kada se biljke nalaze u sezoni rasta, košnja se odvija svaka 3 – 4 puta tjedno [3,12].

6. PREDNOSTI I NEDOSTATCI BILJNIH UREĐAJA

Biljni uređaji rade u vrlo različitim vremenskim i sezonskim uvjetima pa karakteristike efluenata ne mogu biti kontinuirane kao što se to može postići u konvencionalnim uređajima za obradu otpadnih voda. To u nekim slučajevima može biti ograničavajući čimbenik. Analize varijanci malih sustava potpovršinskih biljnih uređaja pokazuju da je učinkovitost uklanjanja BPK₅ za 10% manja zimi, a amonijaka 20% manja u jesen u usporedbi s ostalim godišnjim dobima. Učinkovitost uklanjanja fosfora pokazuje velika sezonska odstupanja, manje je učinkovito zimi, a najbolje u jesen [3]. Temperatura otpadne vode kontrolira učinkovitost uklanjanja onečišćivača onim biološkim reakcijama koje su temperaturno ovisne. Potpovršinski biljni uređaji imaju prednost u područjima hladnije klime zato što se svi procesi odvijaju ispod površine, odnosno u supstratu, te su bakterijske populacije manje pod utjecajem vanjske temperature zraka [3]. Biljni uređaji mogu se uspješno koristiti za uklanjanje nutrienata i drugih zagađivala iz otpadne vode na području manjih naselja, tamo gdje izgradnja uređaja za pročišćavanje nije ekonomski isplativa. Njihove su prednosti nad konvencionalnim sustavima pročišćavanja otpadnih voda i u tome što se mogu ugraditi na mjestu izvora onečišćenja, što upravljanje tim sustavima ne zahtijeva dodatnu edukaciju osoblja, a također su i malih energetske zahtjeva [3]. Pri obradi otpadnih voda, koje sadrže pesticide u biljnom uređaju, vrlo važnu ulogu imaju posađene biljne vrste koje mogu asimilirati pesticide u svoju biomasu. Biljni uređaji uspješno uklanjaju i azo-boje iz otpadnih voda tekstilne industrije, a mogu ukloniti i sulfate tamo gdje postoji mogućnost uklanjanja mehanizama precipitacijom s teškim metalima i tamo gdje postoji mogućnost mikrobiološke sulfatne redukcije [3]. Obrada otpadnih voda u biljnim uređajima spada u procese niske potrošnje energije koji zahtijevaju minimalne troškove zbog toga što se uglavnom koristi gravitacija i što treba unijeti vrlo malo dodatnih tvari ili takvih tvari uopće ne treba [3]. Biljni uređaji često se koriste za tercijarnu obradu otpadnih voda tako da bi se nakon obrade, obrađena voda mogla ponovno upotrijebiti za navodnjavanje ili neku drugu svrhu. Dosadašnji rezultati na tom području pokazuju da je jedini limitirajući faktor toga procesa učinkovitost uklanjanja patogenih mikroorganizama [3]. Direktiva o odlagalištima 99/31/EC obvezuje zemlje članice da skupljaju i obrađuju procjedne vode s odlagališta. Tretiranje takvih voda zahtijeva aerobne sustave ili njihov transport do mjesta obrade, što je često vrlo zahtjevno i skupo, pogotovo za

odlagališta koja se zatvaraju. Stoga je potrebno obraditi procjedne vode na mjestu nastanka uz minimalne troškove, a kao rješenje nameću se biljni uređaji. Za postizanje potpune razvijenosti vegetacije u procesima obrade otpadne vode treba proći i nekoliko sezona rasta. Dužina tog razdoblja ovisi o gustoći i sezoni u kojoj je obavljeno sađenje. Prednost biljnih uređaja u odnosu na konvencionalne sustave u obradi komunalnih otpadnih voda je ta što proizvode mulj u manjoj količini te olakšava njegovo tretiranje. Mulj nastaje samo u primarnoj taložnici [3].

TABLICA 5.: Prednosti i nedostaci biljnih uređaja [3]

| BILJNI UREĐAJI | |
|---|--|
| PREDNOSTI | NEDOSTATCI |
| Rad pri različitim klimatskim i sezonskim uvjetima | Relativno spori procesi obrade otpadne vode |
| Mogu pročišćavati vrlo male količine otpadne vode | Potreban je pad terena, a ako ga nema, potrebna je strojarska oprema, crpke za dizanje otpadne vode |
| Visoka učinkovitost obrade procjedne vode s odlagališta | Relativno velika površina biljnih uređaja za obradu otpadne vode |
| Dobro se uklapaju u krajolik i osiguravaju život na staništu, nema neugodnih mirisa uzrokovanih radom uređaja za pročišćavanje | Visoke vrijednosti normalnog zadržavanja otpadne vode |
| Mogućnost uklanjanja sulfata tamo gdje su mogući mehanizmi uklanjanja precipitacijom s teškim metalima te gdje su moguće mikrobiološke sulfatne redukcije | Osjetljivost na anaerobne uvjete. Uklanjanje korova, naročito tijekom sezone rasta, u početku dok se korisne biljne zajednice ne razviju |
| Niski troškovi izgradnje, niski troškovi rada. Obično mogu biti izgrađeni od lokalnih materijala i saditi se autohtonim biljkama | Potrebno je nekoliko sezona rasta da bi se postigla optimalna gustoća vegetacije za procese obrade otpadnih voda. |
| Manja količina proizvedenog mulja te njegovo lakše zbrinjavanje za razliku | |

| | |
|---|--|
| od konvencionalnih sustava u obradi komunalnih otpadnih voda | |
|---|--|

7. ZAKLJUČAK

Biljni se uređaji danas upotrebljavaju u mnogim dijelovima svijeta. Najčešća primjena je u pročišćavanju komunalnih otpadnih voda manjih naselja i pročišćavanju otpadnih voda pojedinih kućanstava. Fitoremedijacijom se uklanjaju organske tvari, teški metali ili njihove kompleksne mješavine. Ona omogućuje jednostavno nadgledanje biljaka i praćenje koncentracije otrovnih tvari u vodi te je potencijalno najmanje štetna metoda jer koristi žive organizme, a ne kemikalije. No, nedovoljna brzina dekontaminacije tla biljkama rezultira traženjem GMO biljaka koje bi brže uklonile polutante iz vode, a ponekad problem predstavlja i neprilagođenost biljne vrste na klimatske uvjete područja u kojem ih je potrebno saditi.

Uspješni primjeri upotrebe biljnih uređaja u Republici Hrvatskoj nalaze se u autokampu Glavotok na otoku Krku, u autokampu Biljar na otoku Cresu, u Žminju te biljni uređaj u Goričici Sisak.

8. LITERATURA

- [1] Korać, V.: Tehnologija vode za potrebe industrije, Stručna biblioteka, Beograd, (1975.)
- [2] Jurac, Z.: Otpadne vode, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, (2009.), ISBN: 978-953-7343-24-8
- [3] Ružinski, N., Anić Vučinić, A.: Obrada otpadnih voda biljnim uređajima, Hrvatska sveučilišna naklada, Zagreb, (2010.), ISBN: 978-953-169-201-4
- [4] Malus, D., Vouk, D., 2012. Priručnik za učinkovitu primjenu biljnih uređaja za pročišćavanje sanitarnih otpadnih voda; Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet. pp 9-17
- [5] Tušar, B.: Pročišćavanje otpadnih voda, Kigen d.o.o. Zagreb, (2009.), ISBN: 978953-6970-65-0
- [6] Pravilnik o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda (66/2019), https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_03_26_622.html -, pristupljeno 21.10.2022.
- [7] N. Milčić, Z. Findrik Blažević, M. Vuković Domanovac - Fitoremedijacija – pregled stanja i perspektiva, <https://hrcak.srce.hr/file/328367>, pristupljeno 22.10.2022.
- [8] Habuda-Stanić M., B. Kalajdžić, M. Nujić, Tehnologija vode i obrada otpadnih voda, interna skripta, PTF, Osijek, 2007.
- [9] Grad Metković – Močvara kao pročišćivač vode, <http://metkovic.hr.cloud.hr/default.asp?izb=novosti/BUPOV071114.asp> - pristupljeno 28.09.2022.
- [10] Dekonta - Prečišćavanje otpadnih voda, <https://dekonta.ba/preciscavanje-otpadnih-voda-industrijski-i-opcinski-sistemi/>, pristupljeno 30.09.2022.
- [11] Priroda Hrvatske – Vodene biljke, <https://priodahrvatske.com/2018/12/10/vodene-biljke/>, pristupljeno 27.09.2022.
- [12] Davor Stanković - Biljni uređaji za pročišćavanje otpadnih voda, <https://hrcak.srce.hr/file/275068> - pristupljeno 28.09.2022.

[13] Vučinić, A.A., Hrenović, J., Tepes, P., 2011. Efficiency of subsurface flow constructed wetland with trickling filter; Environmental Technology

[14] Jasmina Ibrahimpašić, Merima Toromanović - Prečišćavanje otpadnih voda u biljnim uređajima,

<https://www.voda.ba/uimages/Jasmina%20Ibrahimasic,%20Merima%20Toromanovic%20ZR.pdf> - pristupljeno 30.09.2022.

9. PRILOZI

9.1. Popis slika

| | |
|---|----|
| Slika 1. Površinski biljni uređaj s dijelovima biljaka iznad površine vode [9]..... | 15 |
| Slika 2. Međusobno povezani bazeni kod površinskih biljnih uređaja [10]..... | 15 |
| Slika 3. Površinski biljni uređaj s plutajućim biljkama na površini vode [4]..... | 16 |
| Slika 4. Površinski biljni uređaj s biljkama iznad površine vode [11]..... | 16 |
| Slika 5. Prikaz potpovršinskog biljnog uređaja s horizontalnim ulaskom otpadne vode [12]..... | 17 |
| Slika 6. Prikaz potpovršinskog biljnog uređaja s vertikalnim ulaskom otpadne vode [12]..... | 17 |
| Slika 7. Bazen sa šljunčanom ispunom i biljkama [14]..... | 28 |

9.2. Popis tablica

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Vrste otpadnih voda prema izvoru nastanka i njihovi najkarakterističniji onečišćivači [3]..... | 3 |
| Tablica 2. Onečišćivači u otpadnim vodama [3]..... | 7 |
| Tablica 3. Pregled mehanizama uklanjanja tvari iz otpadne vode [3]..... | 9 |
| Tablica 4. Primjeri biljnih vrsta uspješnih u fitoremedijaciji onečišćujućih tvari [7]..... | 10 |
| Tablica 5. Prednosti i nedostaci biljnih uređaja [3]..... | 30 |