

# PREČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA U BILJNIM UREĐAJIMA

Jasmina Ibrahimpašić<sup>1</sup>, Merima Toromanović

<sup>1</sup>*Univerzitet u Bihaću, Biotehnički fakultet  
Luke Marjanovića bb, 77 000 Bihać*

*jasmina.ipasic@gmail.com  
toromanovic\_merima@hotmail.com*

## SAŽETAK

Prikupljanje i prečišćavanje otpadnih voda predstavlja prioritetni izazov u zaštiti okoliša. Biljni uređaji su umjetno oblikovane močvare sa ciljem stvaranja uvjeta kojima se pospješuje prečišćavanje otpadnih voda koje kroz njih protječu. Koriste se za obradu komunalnih otpadnih voda manjih naselja i malih industrijskih pogona, kao i drugih vrsta otpadnih voda.

U radu je opisana primjena biljnih uređaja kao biološkog načina prečišćavanja otpadnih voda, te odabir adekvatne močvarne vegetacije, supstrata i drugih bitnih parametara u svrhu povećanja efikasnosti prečišćavanja otpadnih voda. Cilj rada je da se ukaže na efikasnost primjene biljnih uređaja, kao i na ekonomičnost procesa, koji je jedan od glavnih ograničavajućih faktora kod prečišćavanja otpadnih voda.

Ključne riječi: biljni uređaji, efikasnost prečišćavanja, ekonomska opravdanost, otpadne vode

## UVOD

Otpadne vode jesu vode kojima je promijenjen sastav utjecajem ljudskog djelovanja, odnosno unošenjem, ispuštanjem ili odlaganjem u vode hranjivih i drugih tvari, toplinske energije te drugih uzročnika onečišćenja u količini kojom se mijenjaju svojstva vode u odnosu na njihovu ekološku funkciju i namjensku upotrebu (Ružinski i Anić Vučinić, 2010). U procesu prečišćavanja voda važno je osigurati da su ispunjeni odgovarajući standardi za obradu otpadnih voda u skladu sa važećim zakonskim propisima.

Biljni uređaji su kompleksni biološki sistemi koji su projektirani i izgrađeni na način da se iskoriste prirodni procesi koji se dešavaju u močvarnom bilju i tlu, uključujući i mikroorganizme koji učestvuju u prečišćavanju vode. Oni su dizajnirani tako da oponašaju procese koji se dešavaju u prirodnim močvarama, ali pod kontrolisanim uvjetima (Vymazal, 2010; Nadilo, 2013). Ovi sistemi se uglavnom sastoje od određene vegetacije, supstrata, tla, mikroorganizma i vode, koristeći kompleksne postupke koji uključuju fizikalne, hemijske i biološke mehanizme za uklanjanje raznih polutanata ili za poboljšanje kvaliteta vode (Wu et al, 2014). Jednostavan rad, visoka efikasnost prečišćavanja i relativno niski troškovi izgradnje pogona i održavanja, u odnosu na konvencionalne tehnologije prečišćavanja, karakteriziraju biljne uređaje (BU) kao kvalitetna i prihvatljiva rješenja prečišćavanja otpadnih voda. Njihovoj atraktivnosti dodatno pridonose estetske i ekološke vrijednosti (biološke raznolikosti močvarnih staništa). BU koriste se prvenstveno za prečišćavanje kućanskih (sanitarnih) otpadnih voda manjih naselja udaljenih od urbanih sredina. Uspješno se primjenjuju i na obradu industrijskih otpadnih voda sa farmi, klaonica, procjednih voda iz rasadnika i oborinskih dotoka s cesta. U biljnim uređajima od vodenih makrofita najviše se koriste vodene biljke koje prirodno rastu u obalnim područjima jezera i močvara-*helofiti*. U tu skupinu pripadaju *Phragmites australis* i vrste rodova *Carex*, *Scirpus* i *Typha*. Glavnu ulogu u prečišćavanju imaju mikroorganizmi koji su nastanjeni na biljkama kod kojih su listovi, stabla i korijenje ispunjeni zračnim šupljinama pomoću kojih se zrak dovodi iz atmosfere do korijena i u okolno zemljište. Razgrađene organske tvari biljke ugrade u svoje tkivo i time prečiste otpadne vode (Malus i sar., 2012). Specifičnost biljnih uređaja jest ta što ne postoji univerzalno rješenje za njihovu izgradnju i održavanje. Svako mjesto gdje se grade ima svoje geomorfološke, hidrološke, klimatske i biološke karakteristike, a i otpadne vode koje se žele prečistiti nemaju isti sastav.

Cilj rada je da se ukaže na efikasnost primjene biljnih uređaja, kao i na ekonomičnost procesa, koji je jedan od glavnih ograničavajućih faktora kod prečišćavanja otpadnih voda. Briga za okoliš, viši zahtjevi za kвалitetom efluenta, visoke cijene konvencionalnih uređaja za obradu otpadnih voda i povećanje cijene energije potrebne za njihov rad, usmjerile su istraživače na sveobuhvatnija istraživanja mogućnosti upotrebe biljnih uređaja u tehnologiji obrade otpadnih voda.

## BILJNI UREĐAJI – UMJETNI MOČVARNI EKOSISTEMI

Sastav otpadnih voda je promjenjiv i odraz je načina života i industrije društva koje stvara otpadne tvari prisutne u vodi (Gray, 1989). Najučestaliji kontaminanti u vodama za piće su: koliformne bakterije, nitrati, pesticidi i njihove residue, te teški metali, od kojih svi imaju štetan uticaj na ljudsko zdravlje (Bruggen et al, 2001; Pintar et al, 2001; Cheng et al, 2002; Pintar, 2003; Aslan and Turkman, 2005). Sastav industrijskih otpadnih voda zavisi o proizvodnom procesu i one mogu sadržavati nerazgrađive, kao i biorazgrađive sastojke. Industrijske vode mogu sadržavati teške metale, kiseline, baze, anorganske soli, biocide, mineralna ulja i masti, ugljikovodike, fenole, aromatske spojeve, radioaktivne tvari i slično (Templeton and Butler, 2011).

Biljni uređaji za prečišćavanje otpadne vode u literaturi su još poznati i pod nazivom umjetne ili sanitarne močvare. Biljnim uređajem smatra se uređaj koji je projektiran i izveden prema načelima prirodnog močvarnog ekosistema (biljke, vodeni medij i supstrat) izvan prirodne lokacije, a radi kontroliranoga prečišćavanja otpadne vode koja prolazi kroz sistem. Ovi sistemi se uglavnom sastoje

od određene vegetacije, supstrata, tla, mikroorganizma i vode, koristeći kompleksne postupke koji uključuju fizikalne, hemijske i biološke mehanizme za uklanjanje raznih polutanata ili za poboljšanje kvaliteta vode (Wu et al, 2014).

U većini zapadnoeuropskih zemalja biljni uređaji su priznata tehnologija koja se uglavnom provodi za prečišćavanje otpadnih voda malih naselja i pojedinih kuća, no u istočnoeuropskim zemljama njihovo prihvatanje kao isplative tehnologije još uvijek se treba utvrditi. Uspješno se primjenjuju i za obradu industrijskih otpadnih voda sa farmi, klaonica, procjednih voda sa odlagališta otpada i oborinskih dotoka s prometnica (Malus i sar., 2012). Iz otpadnih voda se primjenom biljnih uređaja u vrlo visokom postotku odstranjuju organske i mineralne tvari, otrovne tvari i bakterije fekalnog i drugog porijekla (Vymazal, 2010). Obojene vode se potpuno izbistre. Prečišćena voda iz uređaja može se pustiti u potoke, rijeke, jezera i more, ili zadržati u lokvama i umjetnim akumulacijama i upotrijebiti za navodnjavanje (hortikulture), za uzgoj vodenih kultura, riba, za gašenje požara... .

### Vrste biljnih uređaja

Dva su osnovna tipa biljnih uređaja koja se razlikuju u odnosu na tip tečenja otpadne vode kroz njih (Tanveer Saeed and Sun,2012) :

- biljni uređaji sa slobodnim vodnim licem,
- biljni uređaji s podpovršinskim tokom.

#### Biljni uređaji sa slobodnim vodnim licem

Sastoje se od relativno plitkih močvarnih bazena ili kanala kroz koje otpadna voda slobodnim tokom teče prema ispustu, a površina vode direktno je izložena uticaju atmosfere. Izgledom nalikuju prirodnim močvarama.

#### Biljni uređaji sa podpovršinskim tokom

Biljni uređaji sa podpovršinskim tokom (BUPT) su plitki kanali ili bazeni, obloženi vodonepropusnim materijalom i ispunjeni poroznom ispunom (supstratom). Različiti materijali mogu se koristiti kao supstrat, iako se najčešće primjenjuju pijesak, šljunak i kamen odgovarajuće granulacije. Tečenjem otpadne vode kroz supstrat dolazi do uklanjanja otpadne tvari procesima filtracije, sorpcije, taloženja i biološke razgradnje organske tvari.

BUPT se u odnosu na smjer toka otpadne vode kroz supstrat može podijeliti na:

- biljni uređaj s vertikalnim podpovršinskim tokom,
- biljni uređaj s horizontalnim podpovršinskim tokom.

Prema tome, oblikom i načinom rada BUPT djeluju kao horizontalni ili vertikalni prokapanici s mikroorganizmima pričvršćenima na supstrat.

### Vodene i močvarne biljke i supstrat

Najvažnija funkcija biljaka u obradi otpadnih voda jest fizički učinak. Biljke svojim korijenjem stabiliziraju površinu biljnog uređaja, osiguravaju dobre uvjete za fizičku filtraciju, štite od smrzavanja tokom zime te omogućuju stvaranje velike površine za rast mikroorganizama. Biljke koje se najčešće sade i siju u sklopu močvarnih sistema za prečišćavanje otpadnih voda su trska (*Phragmites australis*), rogoz (*Typha latifolia*), uspravni ježinac (*Sparganium erectum*), obični oblič (*Scirpus lacustris*), žuta perunika (*Iris pseudacorus*), šaševi (*Carex sp.*) itd. Glavne su karakteristike navedenoga bilja njihova široka rasprostranjenost i prilagođenost različitim uvjetima, uključujući i relativno niske temperature (ispod 0°C). Kad god je to moguće, preporučuje se odabir autohtone močvarne vegetacije.

Uloga močvarne vegetacije je višestruka (Brix, 1994):

- sistem korijenja sa stabljikom povećava površinu raspoloživu za razvoj mikroorganizama,
- ove biljke su ukorijenjene u supstrat i u podzemnim organima imaju tkivo za prozračivanje, parenhim, što omogućava prenos kiselika u zonu podzemnih organa,
- vegetacija na sebe veže i dio tvari iz otpadne vode (višak dušika i fosfora), pridonoseći visokoj efikasnosti prečišćavanja otpadnih voda,
- stabljike se pod uticajem vjetra njišu i na taj način rahle supstrat održavajući hidrauličku provodljivost. Time se ujedno sprječava mogućnost začepjenja tijela ispune, a dodatno se osigurava i prijenos kisika unutar ispune otapanjem iz atmosfere,
- uginula vegetacija osigurava hranjivo za rast i razvoj mikroorganizama koji sudjeluju u prečišćavanju otpadne vode.

Listovi, stabla i korjenje biljaka ispunjeni su sistemom zračnih šupljina, kojima se zrak iz atmosfere provodi do korijenja i u okolno zemljište. Dio zemljišta ostaje bez kisika što omogućuje da u procesu razgradnje sudjeluju i anaerobni mikroorganizmi. Razgrađene organske tvari biljke ugrade u svoje tkivo i time prečišćavaju otpadne vode. Ukoliko biljni materijal ne sadrži toksične materije, može se dalje koristiti za kompostiranje, proizvodnju energije ili u hortikulturne svrhe. Ukoliko biljke akumuliraju i otrovne tvari, kao što su teški metali, fenoli, pesticidi, formaldehidi, itd. i ako je koncentracija tih tvari preko dozvoljenih granica, biljke se smještaju na deponij.

Mikroorganizmi su glavni faktori u prečišćavanju otpadne vode jer koriste organsku tvar kao hranjivo i izvor energije, a pri tome je transformiraju u biomasu i energiju. Većina tih mikroorganizama nalazi se na površini korijenja ili supstrata (Ružinski i Anić Vučinić, 2010). Uloga biljaka u biljnom uređaju ograničena je, ali prijeko potrebna. Prisutnost biljaka osnova je za uspostavu heterogenog okoliša koji hemijskim ili fotohemijskim procesima čini sistem efikasnim. Pri uklanjanju ukupnoga dušika biljke imaju više fizikalnu nego biološku ulogu zbog toga što mikroorganizmi nastanjeni na korijenju biljaka više pridonose uklanjanju dušika nego procesi asimilacije dušika biljkama. Močvarne biljke mogu pretrpjeti "okolišni stres" kada se u biljnom uređaju koriste za uklanjanje različitih polutanata. Okolišni stres može dovesti do direktnog oštećenja biljke, pa tako npr. eutrofikacija može inhibirati rast biljke ili čak dovesti do njenog nestajanja (Xu et al, 2010).

Sastav supstrata u biljnom uređaju pažljivo se bira i zavisi od specifičnih uvjeta (biljne vrste, veličina uređaja i sl.). Načinjen je od pijeska, šljunka i zemlje u različitim omjerima. Pravilno izabranim omjerom između površine i dubine bazena postiže se najpogodnije vrijeme zadržavanja vode u sistemu. Biljni uređaj je potrebno u potpunosti obložiti vodonepropusnim materijalom, koji se preporučuje dodatno zaštititi geotekstilom kada se primjenjuju sintetske obloge (Korkusuz Asuman, 2004). Na tu podlogu stavlja se supstrat u koji se sadi močvarno bilje i bilje vlažnog zemljišta. Glavnu ulogu u prečišćavanju imaju isti mikroorganizmi kao i u konvencionalnim uređajima, samo što u biljnom uređaju (BU) ne plivaju u vodi, već su naseljeni na korijenju biljaka i u supstratu. Biljke im služe kao stanište i izvor kisika.



Slika 1. Biljni uređaj (Malus i sar., 2012)



Slika 2 i 3. Pilot biljni uređaj izgrađen na Biotehničkom fakultetu Univerziteta u Bihaću

### Ekonomska opravdanost

U nastavku su prikazani financijski aspekti BUPOV od 550 ES (ekvivalent stanovnika). Financijski aspekti varijantnih rješenja razmatrani su kroz investicijske troškove i troškove pogona i održavanja. Projektni period u kojem se promatraju troškovi je 30 godina. Za izračun NPV (neto sadašnja vrijednost) troškova korištena je diskontna stopa od 4%. Amortizacija je računata na sljedeći način:

- Građevinski radovi            50 godina
- Elektrostrojarska oprema    15 godina
- Ugradnja supstrata            10 godina (potrebna je zamjena supstrata u prvom polju svakih 10 godina)

U tabeli ispod prikazani su ekonomski aspekti varijantnih rješenja.

Tabela 1: Ekonomski aspekti pojedinih varijantnih rješenja

	<b>Varijanta 1</b> Produljeno prozračivanje	<b>Varijanta 2</b> Imhoffov spremnik + faza denitrifikacije aktivnog mulja + prokapnik za nitrifikaciju, 'hladna' digestija svog mulja u Imhoffovom spremniku	<b>Varijanta 3</b> Biljni uređaj
INVESTICIJSKI TROŠKOVI (EUR)	460.400	542.900	363.525
TROŠKOVI POGONA I ODRŽAVANJA (EUR/god)	22.350	22.380	1.661
NPV INVESTICIJSKIH TROŠKOVA	425.666	501.942	336.099
NPV OPERATIVNIH TROŠKOVA I ZAMJENE OPREME	845.263	900.562	149.411
NPV OSTATAK VRIJEDNOSTI	89.432	123.450	89.432
NPV UKUPNO	-1.005.929	-1.102.833	-394.527

Iz gornje tabele je evidentno da je biljni uređaj (Varijanta 3) finansijski najisplativija varijanta, te također Varijanta 3 ima najmanje troškove pogona i održavanja na godišnjoj razini (cca 25 puta manji nego troškovi pogona i održavanja ostalih varijantnih rješenja).

## DISKUSIJA

U većini zapadnoeuropskih zemalja biljni uređaji su priznata tehnologija koja se uglavnom provodi za prečišćavanje otpadnih voda malih naselja i pojedinih kuća, no u istočnoeuropskim zemljama njihovo prihvatanje kao isplative tehnologije još uvijek se treba utvrditi.

Unatoč velikoj bioraznolikosti vodene i močvarne flore i vegetacije, u Bosni i Hercegovini se koristi vrlo malo biljnih vrsta u biljnim uređajima za prečišćavanje otpadnih voda. Jedan od razloga zasigurno je nedovoljna povezanost fundamentalnih istraživanja iz botanike i ekologije, te s druge strane primjena tih znanja u inženjerstvu okoliša. Povećanjem broja vrsta moguće je poboljšati efikasnost uređaja i smanjiti opterećenje na okoliš. Biljni uređaji mogu biti izvedeni na različite načine. Analiza visine vodenih biljaka (ili biljaka koje rastu u vodi) i analiza močvarnih biljaka (ili biljaka čiji dijelovi se nalaze iznad razine površine vode) daje mogućnost odabira većeg broja biljnih vrsta različitih visina rasta. Takvi podaci mogu pridonijeti funkcionalnosti uređaja i estetskom izgledu. Isto tako na biljnom uređaju nema otvorenih vodnih površina pa se u njemu ne mogu razmnožavati insekti koji su povezani sa čistoćom sistema, što je opet povezano sa širenjem neugodnih mirisa. Efikasnost procjeđivanja otpadnih voda kroz uređaj uvjetovana je korijenom, njegovom dubinom i razgranatošću. Također, korijen stabilizira površinu biljnog uređaja i omogućuje stvaranje površine za rast mikroorganizama koji imaju ključnu ulogu u prečišćavanju otpadnih voda. Biljni uređaj u potpunosti prečisti fekalne bakterije i streptokoke, masnoće, kationske i anionske deterdžente, uspješno uklanja mutnoću, dok ostali elementi se također prečiste, ali ne u tolikoj mjeri.

U Bosni i Hercegovini tek su se u proteklih nekoliko godina intenzivnije počeli realizirati projekti uređaja za obradu otpadnih voda različitih vrsta. Biljni uređaji, unatoč relativno velikoj primjeni u Europi, u Bosni i Hercegovini još uvijek se malo primjenjuju.

## ZAKLJUČAK

Postupci prečišćavanja kojima će se podvrgnuti otpadna voda prije nego što se ispusti u prirodnu vodnu sredinu ovisi prvenstveno o količini i sastavu otpadne vode, ali isto tako i o zahtijevanoj kvaliteti vode na mjestu ispuštanja.

Briga za okoliš, viši zahtjevi za kvalitetom efluenta, visoke cijene konvencionalnih uređaja za obradu otpadnih voda i povećanje cijene energije potrebne za njihov rad, usmjerile su istraživače na sveobuhvatnija istraživanja mogućnosti upotrebe biljnih uređaja u tehnologiji obrade otpadnih voda. Specifičnost biljnih uređaja jest ta što ne postoji univerzalno rješenje za njihovu izgradnju i održavanje. Svako mjesto gdje se grade ima svoje geomorfološke, hidrološke, klimatske i biološke karakteristike, a i otpadne vode koje se žele prečistiti nemaju isti sastav. Prednosti prečišćavanja otpadnih voda biljnim uređajima su: relativno niska cijena izgradnje sistema u odnosu na troškove izgradnje konvencionalnih uređaja, visoki stepen prečišćavanja, održavanje uređaja je jednostavno i jeftino, za njihov rad nisu potrebni niti energija niti strojarska oprema, korištenje prirodnih materijala i autohtonog bilja, uređaj se idealno uklapa u okoliš, nema neugodnih mirisa niti insekata i prečišćena voda se može ponovno upotrijebiti.

Problem je nedovoljna informiranost javnosti o prednostima i nedostacima biljnih uređaja za prečišćavanje otpadnih voda, te o primjerima njihova korištenja u Bosni i Hercegovini, a i u svijetu. Također, ističe se velika potreba za saradnjom sa vlastima kako bi se korištenje biljnih uređaja u BiH intenziviralo.

## LITERATURA

1. Aslan S., Turkman A., Combined biological removal of nitrate and pesticides using wheat straw as substrates, *Process Biochem* (2005).
2. Brix, H., Functions of macrophytes in constructed wetlands, *Water Sci Technol*, (1994), Volume 29, Number 4, pp. 71 – 78.
3. Bruggen B., Van der, Everaert K., Wilms D., Vandecasteele C., Application of nanofiltration for removal of pesticides, nitrate and hardness from ground water: rejection properties and economic evaluation (2001).
4. Cheng S., Grosse W., Karrenbrock F., Thoennessen M., Efficiency of constructed wetlands in decontamination of water polluted by heavy metals. *Ecol. Eng.* (2002).
5. Gray N.F., *Biology of Wastewater Treatment* Oxford Univ. Press: Oxford (1989).
6. Korkusuz, Asuman, E., Domestic wastewater treatment in pilot-scale constructed wetlands implemented in the Middle East Technical University, Doctoral thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of the Middle East Technical University, (2004), p.p. 13-22.
7. Malus i sar., Priručnik za učinkovitu primjenu uređaja, Pročišćavanje sintetskih otpadnih voda CEE-PROJECT, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski Fakultet Zagreb (2012).
8. Nadilo, B., Biljni uređaj za pročišćavanje otpadnih voda u Vrlici, *Građevinar*, 10 (2013), str. 931 – 941.
9. Pintar A., Batista J., Levec J., Catalytic denitrification: direct and indirect removal of nitrates from potable water. *Catal.* (2001).
10. Pintar A., Catalytic processes for the purification of drinking water and industrial effluents. *Catal* (2003).
11. Ružinski, N., Anić Vučinić, A., *Obrada otpadnih voda biljnim uređajima*, Hrvatska sveučilišna naklada, Zagreb (2010).
12. Tanveer Saeed, T., Sun, G., A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media, *Journal of Environmental Management* 112 (2012), p.p. 429 – 448.
13. Templeton M. R., Butler D., *Introduction to Wastewater Treatment*, Ventus Publishing ApS, ISBN: 978-87-7681-843-2 (2011).

14. Vymazal, J., Constructed Wetlands for Wastewater Treatment, *Water Research*, 2 (2010), p.p. 530 – 549.
15. Wu, S., Kuschik, P., Brix, H., Vymazal, J., Dong, R., Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: A nitrogen and organic matter targeted review, *Water research* 57 (2014) p.p. 40 – 55.
16. Wu, S., Kuschik, P., Brix, H., Vymazal, J., Dong, R., Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: A nitrogen and organic matter targeted review, *Water research* 57 (2014) p.p. 40 – 55.
17. Xu, J., Zhang, J., Xie, H., Li, C., Bao, N., Zhang, C., Shi, Q., Physiological responses of *Phragmites australis* to wastewater with different chemical oxygen demands, *Ecol. Eng.* 36, (2010), p.p. 1341–1347.