

PRIMJENA UGLJENA U TIJELU BILJNOG UREĐAJA – POTENCIJALI I IZAZOVI

HANA POSAVČIĆ¹, DORIA BALETIĆ¹, KATARINA LICHT¹, TIN KULIĆ²

¹ Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Hrvatska

² Hidrokonzalt projektiranje d.o.o. Zagreb, Hrvatska

Sažetak

Biljni uređaji su sustavi za pročišćavanje otpadnih voda u kojima kombinacijom kemijskih, bioloških i fizikalnih procesa dolazi do značajnog smanjenja onečišćenja. U razvoju biljnih uređaja sve više se pristupa istraživanju i djelovanju alternativnih supstrata, stoga je u ovom radu dan pregled dosadašnje primjene ugljena kao zamjenskog supstrata u tijelu biljnog uređaja. Opisana su njegova svojstva, način integracije i utjecaj na uklanjanje različitih vrsta onečišćavala kao što su organske i hranjive tvari, teški metali i mikroonečišćavala. Pokazalo se da ugljen poboljšava adsorpciju te je utvrđeno da dodatak ugljena, ovisno o vrsti onečišćivala, pospješuje njihovu učinkovitost uklanjanja za više od 80 %.

Ključne riječi

adsorpcija, biljni uređaj, onečišćavala, supstrat, ugljen

1 Uvod

Biljni uređaji su umjetno konstruirane močvare koje predstavljaju održive sustave za pročišćavanje otpadnih voda u kojima kombinacijom kemijskih, bioloških i fizikalnih procesa dolazi do značajnog smanjenja onečišćenja (Karungamye, 2024, Malus i Vouk, 2012).

Izgledom su građeni kao plitki bazeni, ispunjeni poroznim supstratima poput kamena, šljunka i pijeska odgovarajuće granulacije, obloženi vodonepropusnim (geomembrana) i zaštitnim slojem (geotekstil). Proces pročišćavanja otpadne vode temelji se na procesima filtracije, sorpcije i biološke razgradnje (Bai i dr., 2016, Malus i Vouk, 2012, Wang i dr., 2018).

Ključnu ulogu u cijelom sustavu ima supstrat, odnosno materijal kojim je ispunjeno tijelo uređaja. Pravilnim odabirom supstrata, osigurava se mehanička filtracija, adsorpcija i uklanjanje otpadnih tvari (Bai i dr., 2016, Wang i dr., 2016). Supstrat također predstavlja područje za rast biljaka, čije korijenje ima dvostruku ulogu, povećava stabilnost sustava te omogućuje prijenos i opskrbu tijela kisikom i drugim plinovima kao što su ugljikov dioksid i dušik (Zamora i dr., 2019). U konačnici, supstrat predstavlja površinu za razvoj mikrobioloških zajednica koje razgrađuju različita onečišćivala kao što su organske tvari i sl. (Delgado i dr., 2016, Zhou i dr., 2025).

Kao materijal za supstrat tradicionalno se koriste kamen, šljunak i pijesak različitih granulacija, prvenstveno zbog svoje dostupnosti, cijene i hidrauličke stabilnosti koju osiguravaju. Glavni nedostatak navedenih materijala je njihova ograničena adsorpcijska sposobnost, odnosno manja učinkovitost u uklanjanju složenijih onečišćivala poput pesticida i farmaceutika (Delgado i dr., 2016).

U ispitivanjima i razvoju biljnih uređaja, sve više se pristupa istraživanju i djelovanju alternativnih supstrata poput ugljena, zeolita, troske te crvenog mulja (Zhao i dr., 2025, Zhang i dr., 2022). Posebno područje interesa predstavlja ugljen zbog visoke specifične površine i poroznosti, čime se značajno povećava ukupna

učinkovitost uklanjanja onečišćivala iz otpadnih voda. Dosadašnja istraživanja su pokazala da ugljen može učinkovito ukloniti širok raspon onečišćivala uključujući organske spojeve, teške metale, farmaceutike i hranjive tvari. Stoga će se u ovom radu prikazati pregled dosadašnje primjene ugljena kao zamjenskog supstrata u tijelu biljnog uređaja (Delgado i dr., 2016, Karungamye, 2024, Zamora i dr., 2019, Zhang i dr., 2022).

2 O ugljenu – svojstva i značajke

Ugljen se tradicionalno koristio u metalurgiji i kao gorivo, ali je zbog svoje porozne strukture i kemijske stabilnosti pronašao primjenu u području zaštite okoliša, posebice u pročišćavanju vode i zraka (Karungamye, 2024). Radi se o čvrstom materijalu, sastavljenom od atoma ugljika koji je nastao procesom karbonizacije biljne i životinjske mase ili dugotrajnim geološkim procesima (Zamora i dr., 2019, Wang i dr., 2018, Karungamye, 2024). Podjela ugljena i njihova svojstva prikazana su u tablici 1.

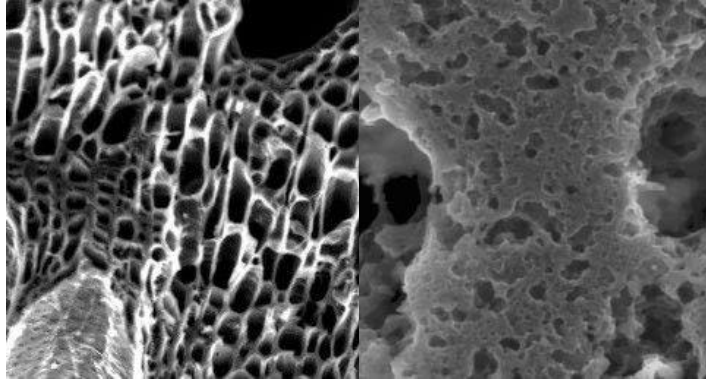
Tablica 1. Vrste i svojstva ugljena

Vrsta ugljena	Svojstva ugljena	Literatura
Kameni ugljen	- nastao dugotrajnim geološkim procesima, - organski oblik ugljika, - sadrži sumpor i određene nečiste minerale (ograničena mogućnost uporabe u biljnim uređajima), - antracit se povremeno koristi kao filter materijal zbog veće tvrdoće i stabilnosti.	Wang i dr., 2018, Zhang i dr., 2022, Karungamye, 2024
Drveni ugljen	- nastao karbonizacijom drva u uvjetima ograničenog pristupa kisiku, - makroporoznost i relativno niska specifična površina, - jeftin i lokalno dostupan supstrat, - smanjena mogućnost uklanjanja mikroonečišćivala.	Zamora i dr., 2019, El Barkaoui i dr., 2023, Panghal i dr., 2024)
Biougljen	- piroliza biomase (npr. drvni otpad, poljoprivredni ostaci), - struktura i kemijska svojstva ovise o vrsti sirovine i uvjetima pirolize, - ima povećani adsorpcijski kapacitet.	Ofiera i dr., 2025, Xing i dr., 2021, Panghal i dr., 2024
Aktivni ugljen	- proizvod kemijske ili fizičke aktivacije drvenog ili kamenog ugljena, - veća specifična površina - povećava se učinkovitost u uklanjanju mikroonečišćivala.	Delgado i dr., 2016, Zhang i dr., 2018, Wang i dr., 2018

2.1 Svojstva ugljena relevantna za biljne uređaje

Iako ugljen ima mnogo fizikalnih i kemijskih svojstava, najznačajnije i najzanimljivije su adsorpcija, poroznost i hrapavost.

Poroznost predstavlja koliko unutarnjih šupljina i kanalića ima u materijalu, te je zbog toga jedno od najvažnijih svojstava ugljena koje se proučava. Poroznost određuje sposobnost zadržavanja vode, adsorpcije otopljenih tvari i stvaranja staništa za mikroorganizme. Ugljen posjeduje mrežu mikropora (< 2 nm), mezopora (2 - 50 nm) te makropora (> 50 nm) koje omogućuju visok stupanj prozračnosti i propusnosti materijala (Zamora i dr., 2019). Ugljen je izrazito porozan te zbog toga ima veliku specifičnu površinu (površina dostupna unutar malog volumena), slika 1. (Wang i dr., 2018; Zamora i dr., 2019).



Slika 1. Mikroskopski prikaz poroznosti ugljena (ACES, 2025)

U kontekstu biljnih uređaja, porozna mreža omogućuje ravnomjernu distribuciju protoka i sprječava lom unutarnje strukture, što je česta pojava kod finijih minerala. Dodatno, povećanjem kontakta između vode i biofilma se poboljšava biološka razgradnja organske tvari. Kod biougljena, kontrolom temperature i vrste sirovine se regulira razina poroznosti (Wang i dr., 2018).

Adsorpcija je temeljni proces u kojem se molekule plinova, tekućina ili otopljenih tvari vežu na površinu ugljena. Površina ugljena privlači i zadržava organske i anorganske molekule putem fizičke i kemijske adsorpcije (Van der Waalove sile i ionske interakcije) (Delgado i dr., 2016, Wang i dr., 2018, Panghal i dr., 2024).

U biljnom uređaju ovaj proces doprinosi uklanjanju farmaceutika, pesticida, teških metala i amonijaka. Potom adsorbirani spojevi postaju izvor hrane za mikroorganizme čime se doprinosi boljoj biološkoj razgradnji, a adsorpcijski proces djeluje u kombinaciji s mikrobiološkim aktivnostima (Panghal i dr., 2024).

Hrapavost se odnosi na grubu, nepravilnu površinu ugljena bilo na vanjskoj ili unutarnjoj površini pora. Na taj način se povećava mikoreljef dostupnih mjesta za prijanjanje mikroorganizama i korijena biljaka. Takvom teksturom se osigurava ispiranje mikroorganizama te se povećava otpornost sustava na promjene protoka (Zamora i dr., 2019).

Kemijski sastav ugljena ovisi o vrsti sirovine od koje nastaje, a najčešće sadrži 70 - 90% ugljika, uz dodatne udjele kisika, vodika i dušika. Kombinacijom elemenata određuje se površinska skupina tj. prisutnost funkcionalnih skupina koji omogućuju adsorpciju (Delgado i dr., 2016).

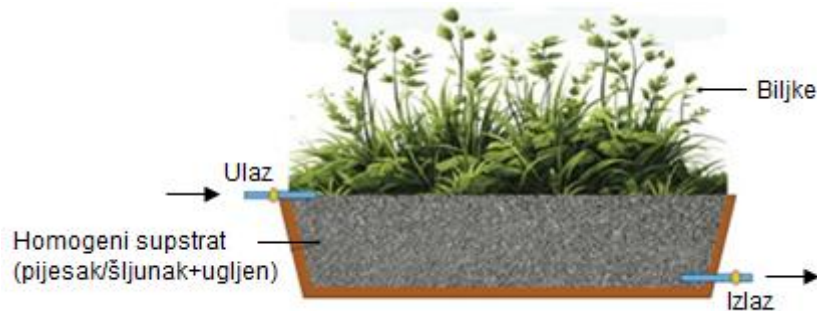
Kemijski gledano, ugljen je relativno inertan materijal koji ne otpušta značajne količine štetnih tvari u vodu. Ova stabilnost ga čini pogodnim za dugotrajniju upotrebu bez potrebe za čestom zamjenom (Wang i dr., 2018). Površina ugljena je pogodna za kolonizaciju mikroorganizama koja tako sudjeluje u pojačanoj biološkoj razgradnji organske tvari. Odabirom vrste ugljena, može se mijenjati mikrokoliš u supstratu i to putem regulacije pH, povećanja prozračnosti i zadržavanja vlage, čime se pospješuje proces razvoja bakterija i mikroorganizama zaduženih za proces denitrifikacije. Na taj način, ugljen djeluje i kao pasivni filter i kao aktivni nositelj bioloških procesa (Delgado i dr., 2016).

3 Integracija ugljena u biljni uređaj

Način ugradnje ugljena u tijelo biljnog uređaja uvelike utječe na učinkovitost. Odabir sustava ovisi o namjeni, vrsti onečišćivala te konstrukcijskim zahtjevima. Različite integracije rezultiraju različitim mehanizmima pročišćavanja pa je potrebno prilagoditi način ugradnje očekivanoj vrsti onečišćivala i hidrauličkim uvjetima sustava. Glavni cilj je povećati adsorpcijski kapacitet i biološku aktivnost supstrata uz zadržavanje stabilnih hidrauličkih uvjeta (El Barkaoui i dr., 2023).

3.1 Homogeno miješanje s postojećim supstratima

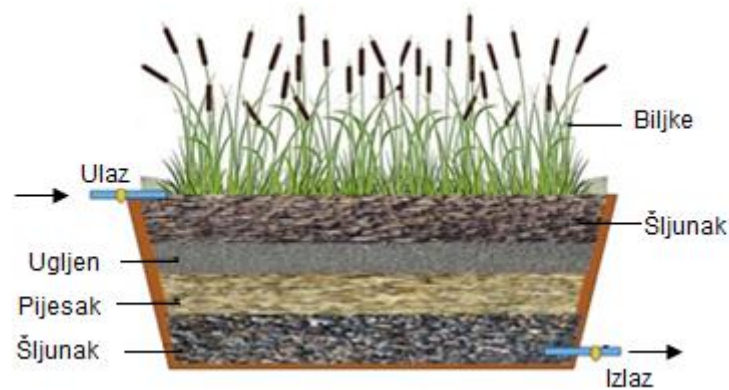
U ovom sustavu dolazi do ravnomjernog miješanja ugljena s tradicionalnim supstratima poput šljunka i pijeska, prikazano na slici 2. Takvom mješavinom povećava se ukupna poroznost i adsorpcijska površina, uz osiguranje zadržavanja stalne hidrauličke propusnosti. Osigurava se kombinacija mehaničke filtracije i adsorpcije te se omogućuje ravnomjerna raspodjela aktivnih površina unutar cijelog profila. Prednost metode je jednostavna ugradnja i mogućnost povećanja količine ugljena prema potrebama sustava. Nedostatak je zasićenje adsorpcijskog kapaciteta s vremenom upotrebe (Zamora i dr., 2019). Pritom je potrebno obratiti pozornost na odabir granulacije i gustoće ugljena kako ne bi došlo do smanjenja propusnosti ili nemogućnosti ostvarenja kontaktne površine.



Slika 2. Prikaz sustava biljnog uređaja s homogenim miješanjem ugljena s postojećim supstratom (Karungamye i dr., 2024)

3.2 Umetanje zasebnog sloja supstrata

Ugljen se može postaviti kao zasebni horizontalni ili vertikalni sloj supstrata unutar biljnog uređaja, slika 3. Najčešće se postavlja kao izlazni sloj za uklanjanje preostalog otopljenog onečišćivala nakon razgradnje nutrijenata i organske tvari jer se tako cilja na uklanjanje mikroonečišćivala poput farmaceutika, pesticida i teških metala. Prednosti su bolje kontrole uklanjanja onečišćivala, ali je otežana zamjena ili regeneracija sloja tijekom rada sustava. Posebna pozornost se treba posvetiti kontroli hidrauličkog opterećenja kako bi se osiguralo dovoljno vrijeme zadržavanja, stabilan protok, učinkovita adsorpcija i dugotrajan rad sloja ugljena bez začepljenja ili gubitka funkcionalnosti (Bai i dr., 2016).



Slika 3. Prikaz sustava biljnog uređaja s umetanjem zasebnog sloja ugljena (Karungamye, 2024)

3.3 Višekomponentni sloj supstrata

Vrsta biljnog uređaja koji kao dodatak koristi kombinaciju više supstrata, npr. šljunak + ugljen + mineralni dodaci, slika 4. Svaki od nabrojanih elemenata ima svoju specifičnu ulogu od filtracije krutih čestica do adsorpcije metala i mikroonečišćivala. Sinergijsko djelovanje se očituje na način da mineralne komponente uklanjaju amonijak i fosfate, a ugljen adsorbira organske spojeve i metale (Zhang i dr., 2022). Različiti materijali unutar slojeva stvaraju mikrozone s različitim uvjetima (aerobni, anaerobni) što dovodi do uklanjanja dušika i fosfora većeg od 80 % (El Barkaoui i dr., 2023). Ovakvi sustavi su kompleksniji za izgradnju, ali u isto vrijeme pokazuju veću učinkovitost od klasičnih uređaja izrađenih od jedne vrste materijala (supstrata) (Panghal i dr., 2024).



Slika 4. Prikaz sustava biljnog uređaja s višekomponentnim slojem (Karungamye, 2024)

3.4 Zonski raspored supstrata

Zonska integracija, temelji se na konceptu funkcionalnih zona unutar biljnog uređaja, gdje se svaka zona specijalizira za određeni proces pročišćavanja. U tom pristupu, ugljen se ne raspoređuje ravnomjerno, nego se postavlja u zone gdje se odvijaju najvažnije reakcije. Stoga ovakvi biljni uređaji izgledom nalikuju na uređaje s višekomponentnim slojem ugljena (slika 4.). Postavljanjem ugljena u ulaznu zonu, dolazi do adsorpcije organske tvari i suspendiranih čestica. U sredini uređaja, odvijaju se denitrifikacijski procesi, pa se dodavanjem ugljena osigurava dodatna specifična površina. Dodavanjem u izlaznu zonu biljnog uređaja uklanjaju se mikroonečišćivala i teški metali (Ofiera i dr., 2025). Stoga zonski raspored omogućuje optimizaciju korištenja ugljena u cijelom profilu, čime se smanjuju troškovi. Odabirom zonskog rasporeda olakšava se ciljano održavanje, odnosno moguće je zamijeniti ili regenerirati samo određeni sloj biljnog uređaja (Ofiera i dr., 2025).

3.5 Mobilne jedinice

Uz klasične, stacionarne biljne uređaje, sve više se razvijaju mobilne jedinice, slika 5. (Phillips, 2019). Radi se o sustavima koji su smješteni u manjim bazenima koji se mogu premještati i instalirati prema potrebi na željenim lokacijama. Odlikuje ih fleksibilnost promjene odnosno moguće ih je koristiti kao privremena rješenja ili kao pilot projekt vezan za pojedine vrste onečišćenja. S manjim dimenzijama uređaja, moguće je kontrolirati parametar hidrauličkog zadržavanja (Zamora i dr., 2019). Kod ovakvih sustava slojeve supstrata je moguće jednostavno zamijeniti u slučaju kada isti ne odgovaraju vrsti onečišćivala ili zbog istrošenosti sustava. Iako su dimenzijom manji, nekada su dostatni kao trajna rješenja za manja naselja (El Barkaoui i dr., 2023).



Slika 5. Prikaz mobilne jedinice biljnog uređaja (izvor: Bauer Resources GmbH—<https://www.bauer.de/bre>)

4 Utjecaj hidrauličkih uvjeta

Uz supstrat, najvažniji utjecaj na učinkovitost biljnog uređaja imaju hidraulički uvjeti tj. vrijeme zadržavanja otpadne vode (engl. *Hydraulic Retention Time*, skr. HRT) te hidrauličko opterećenje.

Predugo vrijeme zadržavanja otpadne vode dovodi do anaerobnih uvjeta što se očituje u smanjenju učinkovitosti uklanjanja onečišćivala. Ukoliko je vrijeme prekratko, dolazi do smanjenog doticaja otpadne vode s površinom supstrata što u konačnici rezultira nedovoljnom adsorpcijom i smanjenom biološkom razgradnjom (Xing i dr., 2021).

Hidrauličko opterećenje i prekoračenje mogućnosti ispitivanog supstrata dovodi do začepjenja pora i smanjenja protočnosti. Iako poroznost ugljena uvelike doprinosi većoj koncentraciji pora, potrebno je pažljivo dimenzionirati sustav (Wang i dr., 2018).

Odabir vrste biljnog uređaja (horizontalni i vertikalni) ima utjecaj na HRT. U vertikalnim sustavima, otpadna voda prolazi kroz cijeli sustav i sloj supstrata te je potrebno pripaziti da samo protjecanje kroz slojeve ne bude prebrzo. U horizontalnim sustavima je potrebno pratiti da proces ne bude prespor kako ne bi došlo do začepjenja pora.

Temperaturne i atmosferske utjecaje na rad biljnog uređaja potrebno je pratiti i kontrolirati te po potrebi korigirati. U hladnijim vremenima, HRT bi trebao biti duži, zbog poboljšanja bioloških procesa, dok ljeti treba skratiti proces kako ne bi došlo do razvijanja anaerobnih uvjeta i razlaganja supstrata i biljaka (Karungamye, 2024).

5 Dosadašnja primjena i rezultati

Osim njegove integracije u tijelo biljnog uređaja, istraživao se i utjecaj ugljena na uklanjanje različitih vrsta

onečišćivala kao što su organska tvar, hranjive tvari, teški metali te mikroonečišćivala kao što su farmaceutici i pesticidi.

5.1 Organske i hranjive tvari

Ugljen poboljšava uklanjanje BPK, KPK i hranjivih tvari (dušik, fosfor), zbog povećane površine za razvoj biljnog svijeta te adsorpcijskih svojstava.

U ispitivanjima utjecaja zadržavanja otpadne vode, Panghal i dr. (2024), zaključili su da biljni uređaji s dodatkom biougljena postižu veće razine uklanjanja KPK, a Xing i dr. (2021) smatraju da optimalno zadržavanje vode na biljnim uređajima za pročišćavanje voda punih amonijaka i dušika iznosi 36 i 48 sati. Ispitivanjem se utvrdilo da biougljen samostalno ima ograničavajuće sposobnosti kemijske adsorpcije fosfora, ali uz dodatak mineralnih komponenti, kao što su čelična troska, zeolit ili kalcijevi spojevi, može povećati uklanjanje fosfora za oko 80 % (Zhang i dr., 2022). Prema Ofieri i dr. (2025), dodavanje biougljena obogaćenog željezom poboljšava adsorpciju fosfora uz formiranje Fe-P kompleksa bez umanjujućih sposobnosti za uklanjanje organskih tvari.

5.2 Farmaceutici i pesticidi

Farmaceutici i pesticidi predstavljaju izazov zbog svoje postojanosti u okolišu. Granulirani ugljen pokazuje veliku učinkovitost u adsorpciji farmaceutika i proizvoda za osobnu njegu. Delgado i dr. (2016) navode da dodavanje ugljena pospješuje pročišćavanje otpadnih voda od lijekova i kozmetičkih proizvoda u odnosu na supstrat od konvencionalnih materijala. Analizom sastava otpadne vode nakon prolaska kroz biljni uređaj s dodatkom biougljena, McCalla i dr. (2022.), uočili su 90 % niže koncentracije pesticida. Karungamye (2024) ističe da se kombinacijom bioloških procesa u korijenskoj zoni i adsorpcije na površini ugljena postižu učinkovitosti od 80% za većinu mikroonečišćivala. Istraživanja su pokazala da pri duljem hidrauličkom zadržavanju (HRT do 7 dana), uređaji s biougljenom postižu više od 90% uklanjanja ibuprofena, što ukazuje na povezanost između vremena zadržavanja i adsorpcijskog kapaciteta (Wu i dr., 2022).

5.3 Endokrini disruptori

Endokrini disruptori (kemijski spojevi koji oponašaju, blokiraju ili ometaju tjelesne hormone koji su dijelom endokrinog sustava) kao što su BPA, BPF i BPS, na preliminarnim ispitivanjima u klasičnim biljnim uređajima pokazali su tešku mogućnost uklanjanja. Dodavanjem sloja ugljena u gornji sloj uređaja, Zhang i dr. (2018) su pokazali mogućnost uklanjanja oko 90% navedenih spojeva. Wirasnita i dr. (2018) su ustanovili da se dodavanjem troske bogate željezom u sloj ugljena, povećava sposobnost oksidacije i adsorpcije organskih molekula.

5.4 Teški metali

Teški metali (Cd, Pb, Zn, Cu, Ni, Cr) spadaju u najstabilnija i najtoksičnija onečišćivala u vodi. U biljnim uređajima uklanjanje se temelji na kombinaciji adsorpcije, ionske izmjene i kompleksacije (vezivanje metalnog iona na molekulu ili površinski funkcionalnu skupinu, stvarajući stabilni kompleks) te mikrobiološke imobilizacije u korijenskoj zoni (Phanghal i dr., 2024, Zhang i dr., 2022).

Ugljen i biougljen imaju visoki kapacitet za vezivanje metalnih kationa zbog porozne strukture i prisutnosti funkcionalnih skupina (-OH, -COOH, -C=O). U vertikalnim uređajima, s dodatkom 25 % biougljena, zabilježeno je uklanjanje kadmijevih iona do 99 %, dok su olovo i cink uklonjeni za oko 90 % (Wang i dr., 2023, Long i dr., 2024).

Uklanjanje metala također ovisi i o pH i redoks uvjetima. Najbolja adsorpcija, postiže se kod pH vrijednosti

6.5 - 8.0 zbog formiranja stabilnih metalnih hidroksida, a Karungamye (2024) potvrđuje da korijenske izlučevine biljaka poboljšavaju imobilizaciju metala promjenom lokalne kemije supstrata. Prednost korištenja biougljena je dugotrajna stabilnost tj. adsorbirani metali ostaju vezani u strukturi i pri promjenama okolišnih uvjeta, čime se smanjuje rizik sekundarnog onečišćenja.

6 Zaključak

Analizom dosadašnjih istraživanja o zamjeni konvencionalnog supstrata ugljenom u tijelu biljnog uređaja utvrđeno je da dodatak ugljena pospješuje učinkovitost uklanjanja različitih onečišćivala, uključujući organske i hranjive tvari, teške metale te farmaceutike za više od 80 %.

Glavni izazovi korištenja ugljena ostaju ekonomska isplativost dugoročne primjene, mogućnost regeneracije ili zamjene supstrata nakon zasićenja i dugotrajnog korištenja, dimenzioniranje sustava na način da zadovoljava potrebe bez predimenzioniranosti, prilagodba hidrauličkih uvjeta vrstama onečišćenja i vremenskih utjecaja na djelovanje sustava.

Daljnja istraživanja su nužna kako bi se unaprijedilo projektiranje i optimizacija biljnih uređaja s integriranim ugljenom. Posebno je važno provesti sveobuhvatna ispitivanja kojima bi se odredilo optimalno hidrauličko i organsko opterećenje, istražio utjecaj granulacije i količine ugljena na učinkovitost pročišćavanja te provelo dugoročno praćenje performansi sustava i analiza troškova, a sve na različitim tipovima onečišćivala. Također, potrebno je sistematski ispitati utjecaj različitih tipova integracija ugljena u tijelo biljnog uređaja pri istim procesnim parametrima.

Zahvala

Ovo istraživanje provedeno je u okviru Institucionalnog istraživačkog projekta za jačanje konkurentnosti mladih znanstvenika na Sveučilištu u Zagrebu Građevinskom fakultetu – “Mali biljni uređaji: Poboljšanje učinkovitosti primjenom ugljena” (akronim: maliBU), a koji je sufinanciran sredstvima iz Nacionalnog plana oporavka i otpornosti 2021. – 2026. Financira Europska unija – NextGenerationEU. Izneseni stavovi i mišljenja samo su autorova i ne odražavaju nužno službena stajališta Europske unije ili Europske komisije. Ni Europska unija ni Europska komisija ne mogu se smatrati odgovornima za njih.

Literatura

- ACES, Activated carbon environmental solutions, About activated carbon, Dostupno na: https://www.sorbotech.uk/58,about_activated_carbon (Preuzeto: 3. prosinac 2025.)
- Bai, S., Lv, T., Ding, Y., Li, X., You, S., Xie, Q. and Brix, H. (2016) Multilayer substrate configuration enhances removal efficiency of pollutants in constructed wetlands. *Water*, 8 (12), 556.
- Delgado, N.Y., Capparelli, A.L., Marino, D.J., Navarro, A.F., Penuela, G.A. and Ronco, A.E. (2016) Adsorption of pharmaceuticals and personal care products on granular activated carbon. *J. Surf. Eng Mater. Adv. Technol.*, 06 (04), pp 183-200.
- El Barkaoui, S. (2023) A critical review on using biochar as constructed wetland substrate: Characteristics, feedstock, design and pollutants removal mechanisms, *Ecological Engineering*, 190, 106927
- Karungamye, P. (2024) The incorporation of activated carbon as a substrate in a constructed wetland. A review, *Cleaner Water*, 2, 100053, pp 1-9.
- Long, Y., Yu, G., Wang, J. and Zheng, D. (2024) Cadmium removal by constructed wetlands containing different substrates: performance, microorganisms and mechanisms. *Bioresource Technology*, 413.

- Malus, D., Vouk, D. (2012) Priručnik za učinkovitu primjenu biljnih uređaja za pročišćavanje sanitarnih otpadnih voda, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet.
- McCalla, L., Phillips, B., Anderson, B., Voorhees, J., Siegler, K., Faulkenberry, K., Goodman, M., Deng, X. and Tjeerdema, R. (2022), Effectiveness of constructed wetland with carbon filtration in reducing pesticides associated with agricultural runoff, *Archives of environmental contamination and toxicology*, 82, pp 317-329
- Ofiera, L., Wintgens, T. and Kazner, C. (2025) Adsorbent modified constructed wetlands for advanced removal of bulk organics and heavy metals from municipal wastewater effluent. *Environmental Science: water research & Technology*, 11, pp 2248-2264
- Phanghal, V., Singh, A., Arora, D. and Kumar, S. (2024) Biochar-modified constructed wetlands using *Eclipta alba* as a plant for sustainable rural wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, pp 17299-17310.
- Wang, H., Xu, J., Sheng, L. and Liu, X. (2018) A review of research on substrate materials for constructed wetlands a review of research on substrate materials for constructed wetlands. *Mater Sci Forum*, 913 (February), pp 917–929.
- Wang, G., Yu, G., Chi, T., Li, Y., Zhang, Y., Wang, J., Li, P., Liu, J., Yu, Z., Wang, Q., Wang, M. and Sun, S. (2023) Insights into the enhanced effect of biochar on cadmium removal in vertical flow constructed wetlands. *J Hazard Mater*, 443 (Pt A):130148.
- Wirasnita, R., Mori, K. and Toyama, T. (2018) Effect of activated carbon on removal of four phenolic endocrine - disrupting compounds, bisphenol A, bisphenol F, bisphenol S and 4-tert-butylphenol in constructed wetlands, *Chemosphere*, 210, pp 717-725.
- Wu, B., Xu, D., Wang, H., Xu, R., Qin, R. and Han, J. (2022) Wetland plant - derived biochar enhances the diclofenac treatment performance in vertical subsurface flow constructed wetlands, *Environmental Research*, 215, 1, 114326
- Xing, C., Xu, X., Xu, Z., Wang, R. and Xu, L. (2021) Study on the decontamination effect of biochar-constructed wetland under different hydraulic conditions. *Water*, 13 (7), 893.
- Zamora, S., Marín-Muniz, J.L., Nakase-Rodríguez, C., Fernandez-Lambert, G. and Sandoval, L. (2019) Wastewater treatment by constructed wetland eco-technology: influence of mineral and plastic materials as filter media and tropical ornamental plants. *Water*, 11 (11), 2344.
- Zhang, J., Zou, Y., Yu, X., Ding, S., Yan, J. and Min, Y. (2022) Vegetated Steel slag substrate constructed wetlands can achieve high efficiency simultaneous nitrogen and phosphorus removal. *Front. Environ. Sci.*, 10.
- Zhao, X., Yang, J., Han, R., Luo, H., Chen, L., Liu, M. and He, B. (2025) Modular Constructed Wetlands for Treatment of Rural Domestic Wastewater: Laboratory Performance and Field Application. *Sustainability* 2025, 17, 4427.