

Mikoremedijacija policikličkih aromatskih ugljikovodika saprotrofnim i ektomikoriznim gljivama

Širić, Ivan; Kos, Ivica; Bedeković, Dalibor; Kiš, Goran; Mioč, Boro; Držaić, Valentino; Knezović, Petar

Source / Izvornik: **Zbornik radova 57. hrvatskog i 17. međunarodnog simpozija agronoma, 2022, 105 - 110**

Conference paper / Rad u zborniku

Publication status / Verzija rada: **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:204:342818>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-02**



Repository / Repozitorij:

[Repository Faculty of Agriculture University of Zagreb](#)



Mikoremedijacija policikličkih aromatskih ugljikovodika saprotrofnim i ektomikoriznim gljivama

Ivan Širić, Ivica Kos, Dalibor Bedeković, Goran Kiš, Boro Mioč, Valentino Držaić, Petar Knezović

*Agronomski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Svetošimunska cesta 25, Zagreb, Hrvatska
(isiric@agr.hr)*

Sažetak

Među različitim dostupnim tehnologijama sanacije onečišćenja ekosustava poznato je da su metode bioremedijacije pomoću mikroorganizama prepoznate kao isplative i ekološki prihvatljivije. U postupku primjene gljiva u sanaciji onečišćenja koriste se dvije ekološke skupine, saprotrofne i ektomikorizne bazidiomicete. Vrlo dobar kapacitet za razgradnju kontaminanata, kao što su policiklički aromatski ugljikovodici (PAH), postojana organska zagađivala (POPs), halogenirani ugljikovodici, fenoli, eksplozivni i bojila utvrđen je za mnoge vrste bazidiomiceta. Međutim, potrebno je provoditi daljnja istraživanja o praktičnoj primjeni saprotrofnih i ektomikoriznih bazidiomiceta u procesu mikoremedijaciji.

Ključne riječi: bioremedijacija, saprotrofi, ektomikoriza, održivo gospodarstvo

Uvod

Porast broja stanovnika, intenzivna industrijalizacija i urbanizacija uvjetovali su onečišćenje životne sredine, prije svega tla i vode. Sve veća prisutnost štetnih supstanci u okolišu (policiklički aromatski ugljikovodici, teški metali, bojila...) postao je nezaobilazni problem današnjice. Rast proizvodnje i rafiniranja nafte popraćen je povećanjem razmjera onečišćenja naftom, što dovodi do narušavanja ekosustava, bioraznolikosti, smanjenje površine poljoprivrednog zemljišta, smanjenje plodnosti tla, ali može imati negativne učinke na zdravlje ljudi. U kontaminiranim ekosustavima procesi sanacije mogu se odvijati od nekoliko mjeseci do nekoliko desetljeća ovisno o stupnju onečišćenja, karakteristikama tla, klimatskim uvjetima i nizu drugih čimbenika. U Europi 2,5 milijuna mjesta sa onečišćenjem tla svjedoči o naslijeđu duge industrijalizacije, kako u prošlosti tako i sadašnjosti, a oko 340.000 lokacija zahtijeva žurnu sanaciju (Van Liedekerke i sur., 2014.). Većina razvijenih zemalja ima ekološke propise kojima se utvrđuju mogućnosti i načine sanacije kontaminiranih ekosustava. Konvencionalna sanacija često uključuje uklanjanje onečišćenog tla i njegovo skladištenje na odlagalištu, zatvaranje zagađenih mjesta zemljom ili drugim materijalom, nakon čega slijede mjere revegetacije, ako je navedeno moguće provesti, a što se pokazalo kao jako skupa metoda (Rowland i sur., 2009.). Zbog značajnih nedostataka, kao što su visoki troškovi i dodatni negativni učinci na ekosustave, korištenje mehaničkih, toplinskih i fizikalno-kemijskih metoda sanacije onečišćenih ekosustava doseglo je granice (Cunningham i sur., 2021.). Tehnologije biološke remedijacije onečišćenih tala i voda postaju sve važnije i široko rasprostranjene, jer su ekološki prihvatljivije i učinkovite te su ekonomski isplativije (Cunningham i sur., 2020.). Bioremedijacija se sve više smatra održivom metodom i predstavlja „zeleni“ biotehnoški alat za sanaciju kontaminiranih tala i vode te može biti konkurentna konvencionalnim nerijetko skupim metodama sanacije (Cunningham i sur., 2021.). Bioremedijacija predstavlja mogućnosti korištenja organizama (bakterije, gljive, biljke, alge i dr) za čišćenje kontaminiranih ekosustava. Navedeni organizmi imaju mogućnost razgradnje, akumulacije ili imobilizacije raznih organskih i anorganskih toksičnih tvari, a što rezultira u značajnom

smanjenju razine onečišćujućih tvari u ekosustavu (Alexander, 1999.). Dodavanje korisnih organizama na onečišćena mjesta naziva se bioaugmentacija, dok se biostimulacija odnosi na dodavanje hranjivih tvari s ciljem poboljšanja rasta i konkurentnosti autohtone mikroflore na onečišćenju lokaciji (Kumar i sur., 2011.). Na mjestima s onečišćenim tlom, bioremedijacija može rezultirati smanjenjem razine onečišćujućih tvari ili može dovesti do djelomičnog smanjenja toksičnosti što dopušta dodatne mjere kao što je revegetacija koja će s vremenom rezultirati daljnjim smanjenjem razine toksičnosti (Alexander, 1999.). Policiklički aromatski ugljikovodici i njihovi derivati predstavljaju jednu od najvećih klasa organskih molekula. Građeni su od većeg broja spojenih aromatskih prstena, a najjednostavniji predstavnik je naftalin, sačinjen od dva prstena (Loick i sur., 2009.). Najčešće su mutageni, kancerogeni, toksični i u prirodi teško razgradivi spojevi koji nastaju nepotpunim izgaranjem fosilnih goriva i drugih organskih tvari. Iako ovi spojevi nastaju i u prirodnim uvjetima npr. u šumskim požarima njihova je prisutnost u okolišu većinom uzrokovana antropogenom aktivnošću. Kada dospiju u okoliš policiklički aromatski ugljikovodici se vežu na čestice tla i postaju slabo dostupni brojnim organizmima koji bi ih mogli razgraditi. Jedno od rješenja je mikoremedijacija odnosno korištenja gljiva u sanaciji raznih kontaminanata koji su teško dostupni drugim organizmima. U ovu svrhu najčešće se upotrebljavaju bazidiomicete, ektomikorizne i saprotrofne gljive. Stoga, cilj ovoga rada je dati pregledan prikaz uloge gljiva u remedijaciji onečišćenih ekosustava te prikazati vrste bazidiomiceta koje imaju mogućnost korištenja u procesu mikoremedijacije.

Bioremedijacija policikličkih aromatskih ugljikovodika

Policiklički aromatski ugljikovodici (PAH) su velika skupina organskih spojeva s dva ili više spojenih aromatskih prstena (benzenski prsten) na linearnom ili kutnom rasporedu (Loick i sur., 2009.). Oni su relativno neutralni do stabilni s niskom topljivošću u vodi. Kemijska svojstva pojedinačnih policikličkih aromatskih ugljikovodika dijelom ovise o njihovoj molekularnoj veličini (tj. broju aromatskih prstenova) kao i o njihovoj molekularnoj topologiji (tj. njihovom obrascu aromatskog povezivanja). Povećanje veličine i kuta molekule policikličkih aromatskih ugljikovodika općenito rezultira povezanim povećanjem njihove hidrofobnosti i elektrokemijske stabilnosti, što pridonosi njenoj postojanosti (Loick i sur., 2009.). Policiklički aromatski ugljikovodici se ispuštaju tako da pokazuju toksične učinke ili posjeduju mutagena, teratogena ili kancerogena svojstva, a kao posljedica toga, neke su klasificirane kao prioritetne onečišćujuće tvari (USEPA, 2021.). Policiklički aromatski ugljikovodici nastaju i unose se u okoliš prirodno ili antropogeno. Uglavnom nastaju kao rezultat pirolitičkog procesa, posebno nepotpunog izgaranja organskih materijala tijekom različitih ljudskih aktivnosti, kao što su prerada ugljena i sirove nafte, izgaranje prirodnog plina, šumski požari, izgaranje otpada, promet vozila. Znatno manje nastaju u prirodnim procesima kao što su karbonizacija i vulkansko ispuštanje (WHO, 2000.). Antropogeni izvori policikličkih aromatskih ugljikovodika imaju značajno povećanje u svjetskim industrijama, posebice tijekom 20. stoljeća. S obzirom da predstavljaju jako velike zagađivače u ekosustavu, u tablici 1. prikazano je 16 prioritetnih zagađivača policikličkih aromatskih ugljikovodika.

Tablica 1. Odabrana svojstva 16 prioritetnih zagađivača policikličkih aromatskih ugljikovodika (Mackay i sur., 1992.)

PAH	Broj prstena	Molekularna težina	Topljivost u vodi (mg L ⁻¹)
Naftalin	2	128	31
Acenaftalin	3	152	16
Acenaften	3	154	3,8

Fluoren	3	166	1,9
Fenantren	3	178	1,1
Antracen	3	178	0,045
Piren	4	202	0,13
Fluoranten	4	202	0,26
Benzo (a) antracene	4	228	0,011
Krizen	4	228	0,006
Benzo (b) fluoranten	5	252	0,0015
Benzo (k) fluoranten	5	252	0,0008
Benzo (a) piren	5	252	0,0038
Dibezno (a, h)antracen	5	278	0,0006
Indeno (1, 2, 3-cd) piren	6	276	0,00019
Benzo (ghi) perilen	6	276	0,00026

Uloga gljiva u remedijaciji

Gljive koriste različite metode za dekontaminiranje zagađenih ekosustava. Metode dekontaminacije zagađenih prostora u prirodi, mikoremedijacijom, uključuju biorazgradnju, biosorpciju i biokonverziju. Biorazgradnja podrazumijeva potpunu degradaciju kemijskog spoja do njegovih najosnovnijih mineralnih komponenti, poput CO₂, H₂O, NO₃ i drugih. Za biorazgradnju su bitni ekstracelularni enzimi koje gljive proizvode kao što su peroksidaza, ligninaza, celulaza, pektinaza, oksidaza i ksilanaza (Nyanhongo i sur., 2007.). Navedeni enzimi su pokazali sposobnost razgradnje širokog spektra polutanata uključujući policikličke aromatske ugljikovodike (Johannes i sur., 1996.). Biosorpcija je proces primanja metalnih iona, polutanata i ksenobiotika, živom ili neživom biomasom (Gavrilescu, 2004.). Prianje polutanata može biti aktivno, odnosno ovisno o funkcionalnom metabolizmu ili pasivno bez uloge metabolizma navesti literaturni navod. Biokonverzija je proces pretvaranja otpada u proizvod, a u slučaju korištenja gljiva to je plodno tijelo. Navesti literaturni navod Za proces biokonverzije se koristi poljoprivredni i neke vrste industrijalnog otpada (Kulshreshtha i sur., 2013.). Budući da je krajnji proizvod odnosno mesnatoto tijelo gljive namijenjeno ljudskoj prehrani, mnoge vrste otpada na kojima bi gljive mogle rasti i dati plod nisu prikladne za biokonverziju. Međutim, posljednjih godina, potencijal gljiva za bioremedijaciju odnosno mikoremedijaciju sve se više prepoznaje (Gadd, 2001.). Nekoliko je razloga zašto su gljive pogodni organizmi za mikoremedijaciju i zbog čega mogu biti superiorniji od bakterija ili biljaka u različitim uvjetima rasta i razvoja. Njihova mreža micelija jako je pogodna za prodiranje u tlo i pristupanje svim porama tla. Višestanični micelij gljiva za razliku od jednostaničnih bakterija mogu djelovati u više pravaca (Dix i Webster, 1995.) pojasniti detaljnije Za razliku od ostalih eukariota, stanice hifa gljiva pokazuju neograničen rast, stoga nema ograničenja staničnih dioba u hifama micelija sve dok su resursi dostupni u supstratu. Osim toga, gljivični micelij mnogih vrsta može se formirati i rasti kroz neadekvatne okolišne uvjete te kolonizirati područja daleko od izvora micelija. U usporedbi s bakterijama, gljive su također otpornije na visoke koncentracije toksina (Treu i Falandysz, 2017.). Hife gljiva imaju veliku površinu i biomasu, a iste u nekim tlima mogu doseći duljinu od 1 km g⁻¹ tla (Osono i sur., 2003.). Osim toga, gljive proizvode mnoge bioaktivne spojeve, a u svrhu bioremedijacije enzimi gljiva su jako bitni, jer mnogima od njih nedostaje specifičnosti supstrata te se otpuštaju u supstrat kao egzoenzimi. Budući da gljive općenito ovise o ekstracelularnoj razgradnji makromolekula, stvara se velika količina enzima i izlučuje se u supstrat (Harms i sur., 2011.). Sanacija ugljikovodika općenito se temelji na biorazgradnji i stoga uključuje djelomičnu ili potpunu razgradnju odgovarajućih onečišćujućih tvari (Alexander, 1999.). Ovaj mehanizam se bitno razlikuje od bioakumulacije, koja opisuje sposobnost nekih gljiva da akumuliraju ili hiperakumuliraju različite toksične spojeve iz tla.

Pokazalo se da brojni rodovi bazidiomiceta razgrađuju ugljikovodike, a glavni tipovi onečišćujućih tvari uključuju policikličke aromatske ugljikovodike, aromatske ugljikovodike, fenole, halogenirane ugljikovodike, boje i dr. (Treu i Falandysz, 2017.). Policiklički aromatski ugljikovodici su onečišćujuće tvari jako velikih kancerogenih i mutagenih svojstava (Collins i sur., 1998.). Novija istraživanja o bioremedijaciji bazidiomiceta prikazuju korištenje brojnih vrsta gljiva u sanacijama onečišćenja policikličkim aromatskim ugljikovodicima, poljoprivrednom proizvodnjom i sl. (Tran i sur., 2021.). Navedeno može biti rezultat lake dostupnosti polutanata vrstama za koje se prethodno utvrdilo da uspješno razgrađuju iste. Međutim, s druge strane, može značiti da postoje i brojne druge vrste gljiva za koje još uvijek nije utvrđen bioremedijacijski potencijal (Tran i sur., 2021.)

Saprotrofne i mikorizne bazidiomicete

Bazidiomicete, odnosno gljive općenito, dijele se na tri skupine s obzirom na način ishrane: saprotrofne, simbiotske i parazitske gljive (Dix i Webster, 1995.), a prve dvije skupine su pogodne za bioremedijaciju. Saprotrofne bazidiomicete koriste mrtve organske tvari kao izvor ugljika, a uključuju gljive bijele truleži koje razgrađuju lignocelulozu i gljive koje razgrađuju celulozu tj. gljive smeđe truleži. Simbiotske bazidiomicete primaju ugljik od mutualističkog biljnog partnera, a ova skupina uključuje mikorizne gljive (Treu i Falandysz, 2017.). U tablici 2. prikazan su vrste saprotrofnih i simbiotskih (ektomikoriznih) bazidiomiceta pogodne za postupak mikoremedijacije.

Tablica 2. Popis saprotrofnih i ektomikoriznih vrsta gljiva pogodnih za mikoremedijaciju (Treu and Falandysz, 2017.)

Saprotrofne vrste gljiva	Simbiotske vrste gljiva
<i>Agrocybe perfecta</i> (Rick.) Singer	<i>Suillus bovinus</i> (L.) Roussel
<i>Xerotus discolor</i> Mont.	<i>Suillus luteus</i> (L.) Roussel
<i>Bjerkandera adusta</i> (Willd.) P. Karst.	<i>Suillus tomentosus</i> (Kauffman) Singer
<i>Coprinopsis cinerea</i> (Schaeff.) Redhead, Vilgalys & Moncalvo	<i>Hebeloma crustuliniforme</i> (Bull) Quel.
<i>Ganoderma lucidum</i> P. Karst.	<i>Gomphidius viscidus</i> (L.)
<i>Irpex lacteus</i> (Fr.) Fr.	<i>Boletus edulis</i> Bull.
<i>Phanerochaete chrysosporium</i> Burds.	<i>Laccaria bicolor</i> (Marie)
<i>Phanerochaete sordida</i> (P. Karst.)	<i>Leccinum scabrum</i> (Bull.) Gray
<i>Peniophora cinerea</i> (Pers.) Cooke	<i>Pisolithus tinctorius</i> (Pers.) Coker & Couch
<i>Pleurotus ostreatus</i> (Jacq.) P. Kumm.	
<i>Schizophyllum commune</i> Fr.	
<i>Stropharia coronilla</i> (Bull.) Quel.	
<i>Trametes versicolor</i> (L.) Lloyd	
<i>Trametes coccinea</i> (Fries)	
<i>Phellinus</i> sp.	

Temeljem ranije navedenog može se reći da postoji nekoliko razloga zašto mikoremedijacija sa saprotrofnim i ektomikoriznim gljivama može biti pogodna metoda izbora za sanaciju brojnih zagađenih ekosustava. Korištenjem gljiva mogu se uspješno razgraditi razne onečišćujuće tvari na kontaminiranom mjestu. Sinergijski učinak, nekoliko povezanih organizama rizosfere također može doprinijeti razgradnji onečišćujućih tvari ili degradirati neke od primarnih i sekundarnih proizvoda razgradnje. Pored toga, korištenjem mikoriznih gljiva, ugljik nije potencijalno ograničavajući čimbenik, budući da mikorizni sustav uključuje izvor ugljika preko biljaka.

Zaključak

Na temelju pregledane literature može se zaključiti da bazidiomicete posjeduju enzime što ih čini pogodnim organizmima za sanaciju onečišćenih ekosustava sa sposobnošću razgradnje raznih ugljikovodika. Za uspješnu sanaciju onečišćenja potrebno je osigurati izvor ugljika za saprotrofne gljive, dok je kod mikoriznih gljiva pridružena biljna vrsta izvor ugljika. Vrste gljiva koje se koriste za mikoremedijaciju moraju biti pažljivo odabrane i njihov potencijal potrebno je procijeniti interakcijom s drugim organizmima u tlu. Također, autohtone vrste gljiva koje su prilagođene lokalnoj klimi mogu biti pogodnije za sanaciju ekosustava, iako postoji potreba za više studija bioremedijacije u lokalnim terenskim uvjetima s autohtonim vrstama.

Literatura

- Collins J.F., Brown J.P., Alexeeff G.V., Salmon A.G. (1998). Potency equivalency factors for some polycyclic aromatic hydrocarbons and polycyclic aromatic hydrocarbon derivatives. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 28: 45–54.
- Cunningham C.J., Kuyukina M.S., Ivshina I.B., Konev A., Peshuv T.A., Knapp C.W. (2020). Potential risks of antibiotic resistance genes and bacteria in bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soils. *Environmental Science: Processes & Impacts*. 22: 1110–1124.
- Cunningham C.J., Peshkura T.A., Kuyukina M.S., Ivshina I.B. (2021). Sustainable Bioremediation of Hydrocarbon Contaminated Soils: Opportunities for Symbiosis with Organic Waste Management? *Russian Journal of Ecology*. 52 (6): 463-469.
- Dix N. J., Webster J. (1995). *Fungal Ecology*. Chapman and Hall: London, UK.
- Gadd G.M. (2001). *Fungi in Bioremediation*. Cambridge University Press: Cambridge, UK, str. 481.
- Gavrilescu M. (2004). Removal of heavy metals from the environment by biosorption. *Engineering in Life Science*. 4: 219–232.
- Ghosal D., Ghosh S., Dutta T.K., Ahn Y. (2016). Current state of knowledge in microbial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): a review. *Frontiers in Microbiology*. 7: 1369.
- Harms H., Schlosser D., Wick L.Y. (2011). Untapped potential: exploiting fungi in bioremediation of hazardous chemicals. *Nature Reviews Microbiology* 9: 177–192.
- Johannes C., Majcherzyk A., Hüttermann A. (1996). Degradation of anthracene by laccase of *Trametes versicolor* in the presence of different mediator compounds. *Applied in Microbiology and Biotechnology*. 46: 313–317.
- Kulshreshtha S., Mathur N., Bhatnagar P., Kulshreshtha S. (2013). Cultivation of *Pleurotus citrinopileatus* on handmade paper and cardboard industrial wastes. *Industrial Crops and Products*. 41: 340–346.
- Kumar A., Bisht B. S., Joshi V.D., Dhewa T. (2011). Review on bioremediation of polluted environment: a management tool. *International Journal of Environmental Science*. 6: 1079–1093.
- Loick N., Hobbs P.J., Hale M.D.C., Jones D.L. (2009). Bioremediation of Poly-Aromatic Hydrocarbon (PHA) Contaminated Soil by Composting. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 39: 271-332.
- Mackay D., Shiu W.Y., Ma K.C. (1992). *Illustrated handbook of physical-chemical properties and environmental fate for organic chemicals, Vol II*. Lewis Publishers, Michigan, USA.

- Nyanhongo G.S., Gübitz G., Sukyai P., Leitner C., Haltrich D., Ludwig R. (2007). Oxidoreductases from *Trametes* spp. in biotechnology: A wealth of catalytic activity. *Food Technology and Biotechnology*. 45: 250–268.
- Osono T., Ono Y., Takeda H. (2003). Fungal ingrowth on forest floor and decomposing needle litter of *Chamaecyparis obtusa* in relation to resource availability and moisture condition. *Soil Biology and Biochemistry*. 35: 1423–1431.
- Rowland S.M., Prescott C.E., Grayston S.J., Quideau S.A., Bradfield G.E. (2009). Recreating a functioning forest soil in reclaimed oil sands in northern Alberta: an approach for measuring success in ecological restoration. *Journal of Environmental Quality*. 38(4):1580-1590.
- Shah A.A., Hasan F., Hameed A., Ahmed S. (2008). Biological degradation of plastics: a comprehensive review. *Biotechnology Advances*. 26: 246–265.
- Tran H.T., Lin C., Bui X.T., Ngo H.H., Kiportich Cheruiyot N., Hoang H.G., Vu C.T. (2021). Aerobic composting remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil: Current and future perspectives. *Science of Total Environment*. 753: 142250.
- Treu R., Falandysz J. (2017). Myco remediation of hydrocarbons with basidiomycetes - a review. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*. 52 (3): 148-155.
- USEPA (2021). United States Environmental Protection Agency.
- WHO (2000). World Health Organization.
- Van Liedekerke M., Prokop G., Rabl-Berger S., Kibblewhite M., Louwagie G. (2014). Progress in the Management of Contaminated Sites in Europe. Report EUR 26376; European Union, Luxembourg 1–68.

Microremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons by saprotrophic and ectomycorrhizal fungi

Abstarct

Among the various technologies available for remediation of ecosystem pollution, it is well-known that bioremediation methods using microorganisms (fungi) are recognized as cost-effective and environmental-friendly methods. Two ecological groups of fungi are used in the application of fungi for pollution remediation: saprotrophic and ectomycorrhizal basidiomycetes. Many species of basidiomycetes have been found to have a very good ability to degrade pollutants such as polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), persistent organic pollutants (POPs), halogenated hydrocarbons, phenols, explosives and dyes. However, further research is needed on the practical application of saprotrophic and ectomycorrhizal basidiomycetes in microremediation.

Key word: bioremediation, saprotrophs, ectomycorrhiza, sustainable management