

BIOREMEDIJACIJA KAO ENZIMSKI METABOLIZAM MIKROORGANIZAMA U “ZELENOJ HEMIJI”

Akademik prof.dr. Rade Biočanin, email: rbiocanin@np.ac.rs

Kevsera Murić MA

Sabiha Kolašinac MA

Sara Torbić MA

Državni univerzitet u Novom Pazaru, Novi Pazar, Srbija

Sažetak: Bioremedijacija je u suštini proces koji predstavlja sposobnost mikroorganizama da razlažu različite opasne materije, i ima rastuću ključnu ulogu u prečišćavanju zagađenog zemljišta i podzemnih voda. Bioremedijacija je ekonomski isplativa, zelena tehnologija kojom se zagađujuće supstance biološkim putem transformišu u netoksična jedinjenja ili se potpuno razgrađuju do ugljendioksida i vode. Kao biološki agensi se najčešće koriste mikroorganizmi. Ovi procesi dobijaju svoje mesto zahvaljujući kapacitetu enzimskog metabolizma mikroorganizama da transformišu organske zagađivače u polutante i manje opasna jedinjenja. Ali, ne treba zaboraviti da ovu metodu nije moguće primeniti u svakom slučaju. Među raspoloživim opcijama za prečišćavanje zagađenog zemljišta, bioremedijacija je najbolja zato što najmanje remeti životnu sredinu i sa ekonomske tačke gledišta-manje košta. U ovom radu je dat i pregled ex situ bioremedijacionih postupaka na industrijskom nivou korišćenih za tretman kontaminiranog zemljišta. Koautorski rad opisuje primenu bioremedijacije, uslove za njeno odvijanje kao i ograničavajuće faktore.

Ključne reči: zemljište, zagađenje, bioremedijacija, mikroorganizmi, održivo zemljište

BIOREMEDIATION AS AN ENZYME MICROBIAL METABOLISM IN THE "GREEN CHEMISTRY"

Abstract: Bioremediation is basically a process which represents the ability of microorganisms to decompose different dangerous contaminants, and it has an increasingly key role in detoxification of contaminated soil and groundwater. Bioremediation is a cost effective , green technology that pollutants biologically transformed into non-toxic compounds or be completely degraded to carbon dioxide and water. As biological agents are commonly used microorganisms. These processes are getting their place owing to capacity of enzyme metabolism of microorganisms to transform organic contaminants into pollutants and less dangerous compounds. But, we shouldn't forget that this method cannot always be applied. Among the available options for purification of contaminated soils, bioremediation is the best because it is less disturbing to environment and from the economic point of view-it costs less. This paper gives an overview and ex situ bioremediation processes on an industrial scale used for the treatment of contaminated soil. This paper gives an overview and ex situ bioremediation processes on an industrial scale used for the treatment of contaminated soil. Co-author describes the use of bioremediation, conditions for its refusal, as well as limiting factors.

Keywords: land, pollution, bioremediation, microorganisms, sustainable land

Uvod

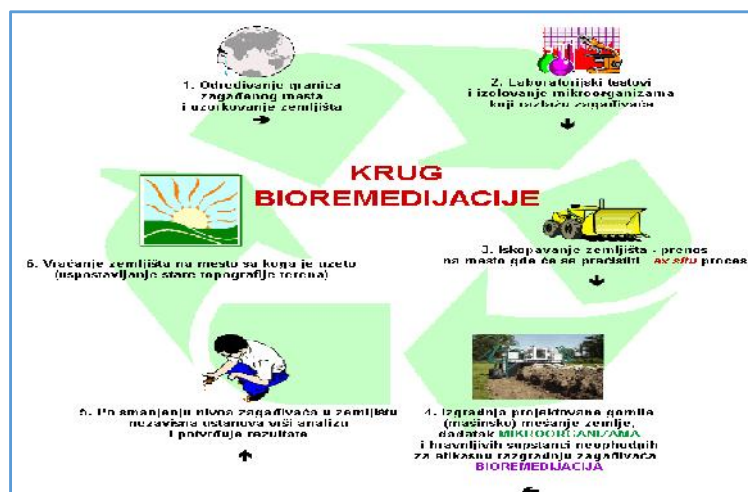
Zelena hemija je naučno polje koje obuhvata hemijska istraživanja i inženjerstvo čiji fokus je na dizajnu proizvoda i procesa koji minimizuju upotrebu i formiranje hazardnih supstanci. Dok se hemija životne sredine bavi prirodnim okruženjem i hemijskim zagađenjem u prirodi, zelena hemija ima za cilj umanjeње i sprečavanje formiranja kontaminacije na njenim izvorima. U vidu hemijske filozofije, zelena hemija je primenljiva na organsku hemiju, neorgansku hemiju, biohemiju, analitičku hemiju, pa čak i fizičku hemiju. Fokus zelene hemije je na industrijskim primenama, nezavisno od tipa. Klik hemija se često navodi kao stil

hemijske sinteze koji je konzistentan sa ciljevima zelene hemije. Bio-remedijaciona tehnologija je selektivna metoda, koja najmanje narušava životnu sredinu, naročito pri primeni *in situ*, a odgovara i strategiji održivog razvoja u sistemu eko-bezbednosti. Uspešnost bioremedijacije zemljišta zavisi od niza parametara: faktora sredine, dodatka i dostupnosti hranljivih supstanci i tehničkih karakteristika postrojenja. No, i pod optimalnim uslovima dekontaminacije, pri procesu ne uklanjaju svi kontaminanti, već efektivnost i ekonomska isplativost bio-procesa zavisi od identifikacije kritičnih faktora i njihove optimizacije.

1. Definicija i način funkcionisanja bioremedijacije

Bioremedijacija je proces u kome se koriste mikroorganizmi za uklanjanje ili degradaciju toksičnih supstanci do manje toksičnih ili netoksičnih supstanci. Pri ovom procesu, mikroorganizmi posredstvom svojih enzima razgrađuju (metabolišu) organske kontaminante iz zemljišta ili voda i transformišu ih u krajnje netoksične proizvode, pre svega do ugljen dioksida i vode. U ovom procesu, dakle, dolazi do interakcije između biljaka i mikroorganizama, a krajnji rezultat je čišćenje i ozdravljenje zemljišta. Bioremedijacija je prirodan proces, koji bi se odvijao u zemljištu i vodi i bez ljudskog uticaja, ali bi trajao daleko duže. Tehnologije bioremedijacije, stvaranjem optimalnih uslova za rast mikroorganizama i uvećavanje brojnosti, potpomažu detoksikaciju kontaminanata.

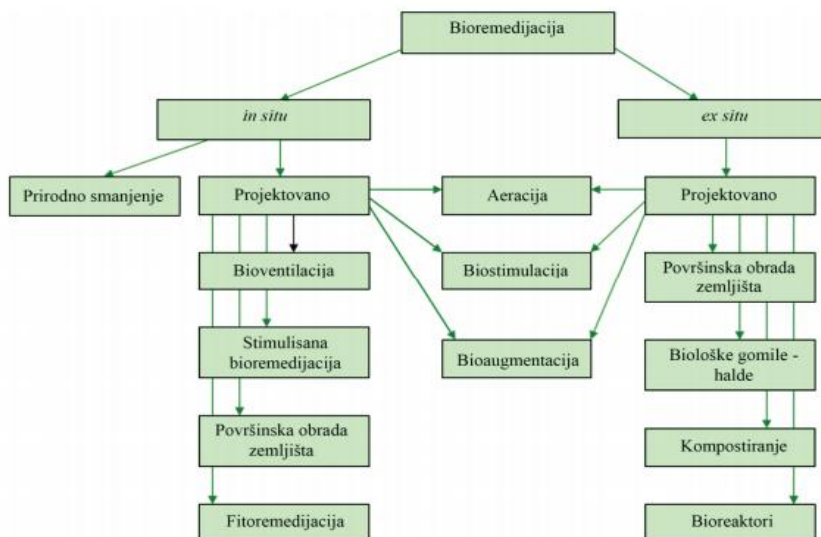
Za uspješnije obavljanje procesa bioremedijacije, potrebno je poznavati karakteristike kontaminanta, lokaliteta i mikroorganizama. Od ovih parametara zavisi i dužina trajanja bioremedijacije, koja često može da dostigne i više godina. Pojedini lako biodegradibilni kontaminanti mogu se razgraditi i za manje od godinu dana, dok se kontaminanti velikih molekulskih težina razgrađuju znatno duže. Najvažnije karakteristike kontaminanta koje je potrebno determinisati su mogućnost biodegradacije, rastvorljivost u vodi, koeficijent absorpcije zemljišta i hemijska reaktivnost.



Slika 1. Mehanizmi i proizvodi razgradnje ugljovodonika

Karakterizacija i opisivanje lokaliteta podrazumevaju determinisanje dubine i površine rasprostranjenja kontaminanta, koncentraciju kontaminanta u lokalitetu, tip zemljišta ili klasavoda sa svojim osobinama (pH, sadržaj organske materije, sadržaj makro- i mikroelemenata itd.), prisustvo ili odsustvo supstanci koje su toksične za mikroorganizme, prisustvo drugih akceptora elektrona itd. Kada su mikroorganizmi u pitanju, potrebno je, pre

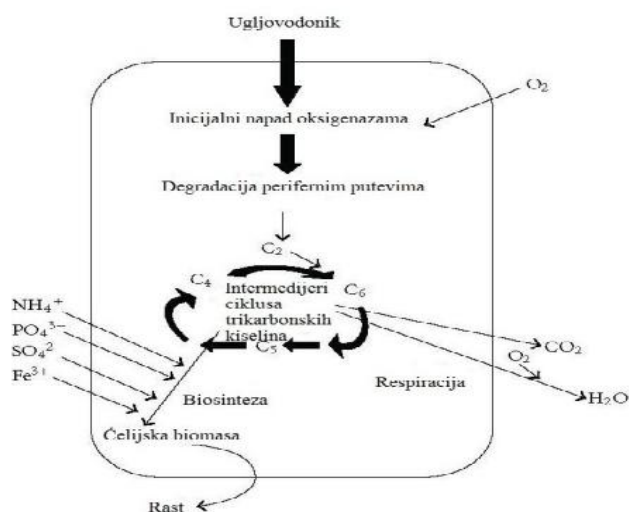
svega, da oni budu aktivni, tj. da imaju sposobnost biodegradacije kontaminanta i da njihova populacija u lokalitetu bude dovoljno velika, kako bi se što efikasnije kontaminant razgradio. Mikroorganizmi koji mogu da razgrađuju različite klase jedinjenja, i pod aerobnim i pod anaerobnim uslovima, bili su prilično dobro ispitani kao i njihova potreba za odgovarajućim pH, nutrijentima, kiseonikom, temperaturom, redoks-potencijalom i vlagom. Zavisno od količine prisutnog kiseonika u zemljištu bioremedijacija se može odvijati pod aerobnim i anaerobnim uslovima.



Slika 2. Bioremedijacione tehnologije kontaminiranog zemljišta

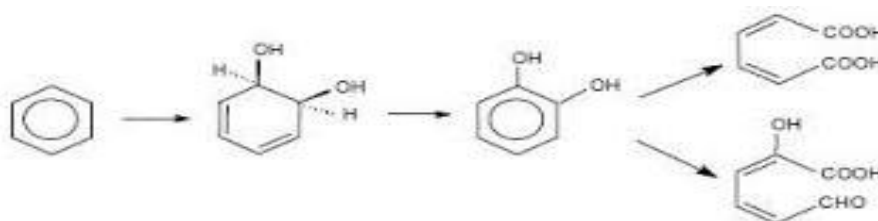
2. Aerobna i anaerobna degradacijazemljišta

Aerobnu razgradnju vrše aerobni mikroorganizmi, i na nju, pored kiseonika, značajan uticaj ima prisustvo mineralnih soli, temperatura i pH. Aerobni mikroorganizmi zahtevaju soli azota, fosfora, kalijuma, magnezijuma, gvožđa, cinka i dr. Najveći rast bakterija i gljivica oksidanasa ugljovodonika zapaža se u temperaturnom intervalu od 25 – 40°C. Međutim mikroorganizmi pokazuju veliku prilagodljivost na uslove rasta, pa i na temperaturu. Optimalni pH za biorazgradnju se kreće između 7 i 8,5.



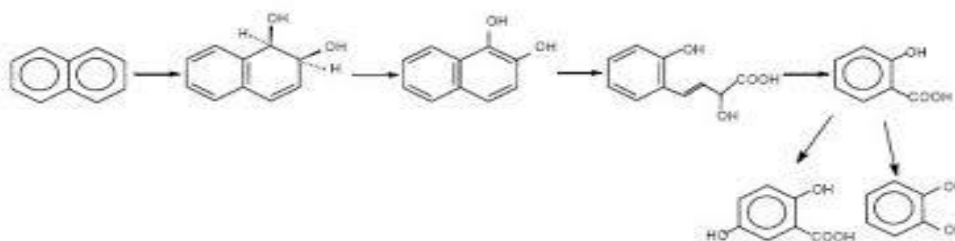
Slika 3. Osnovni princip aerobne degradacije ugljovodonika

Degradacija nafte opada sa povećanjem dubine sedimenta i anaerobije. Metil grupe na krajevima molekula alkana i u aromata (toluen, ksilen) podležu reakcijama oksidacije, gde prvo nastaje alkohol, potom aldehid i na kraju karboksilna kiselina. Mikrobiološkom degradacijom toluena može nastati benzaldehid i benzoeva kiselina. Alkil grupe podležu reakcijama subterminalne oksidacije dajući keton ili hidroksi-derivat. Tako, iz heksana nastaje 2-hidroksiheksan i 2-ketoheksan itd. Alkani podležu i reakcijama dehidrogenacije: iz n-heptana nastaje 1-hepten. Aromatična jedinjenja podležu reakcijama hidroksilacije i građenja ketona. Hidroksilacija je nespecifična i nekad vodi ka građenju ketona ili hinona. Najčešći proizvod je dihidrodiol kad se dve OH grupe uvode na dva susedna C-atoma. Iz benzena može nastati fenol i hidrohinon. Zavisno od supstrata i mikroorganizma mogu nastati različiti proizvodi prilikom otvaranja aromatičnih prstenova. Može se otvoriti samo jedan, nekoliko ili svi prstenovi. U aerobnim uslovima otvaranjem prstena u molekulu se formiraju dve karboksilne ili jedna karboksilna i jedna hidroksilna grupa. Degradacija benzena bakterijama započinje formiranjem cis-dihidrodiola, zatim sledi dehidrogenacija do katehola i potom dolazi do otvaranja prstena.



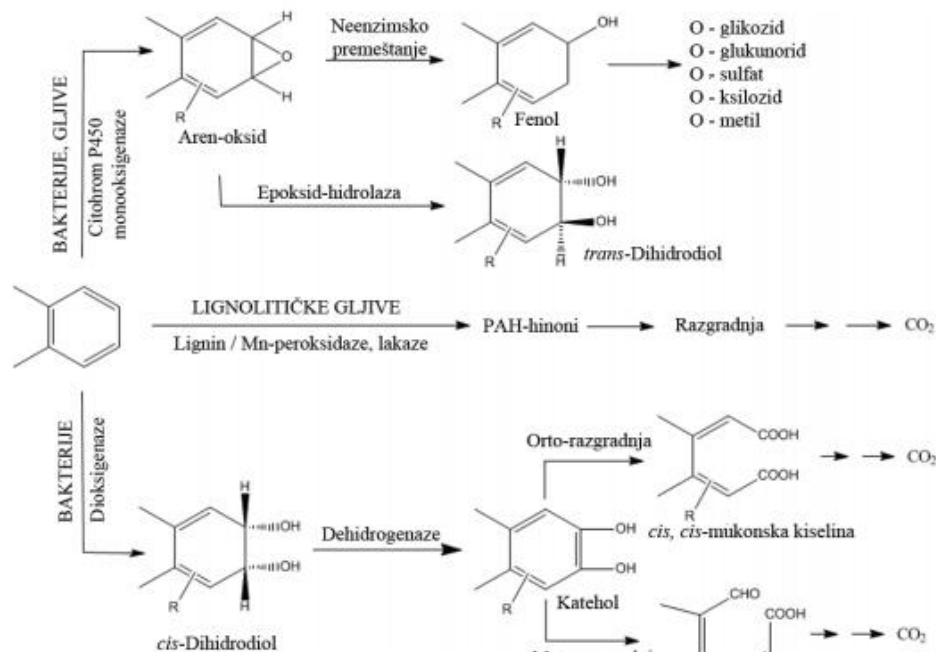
Biodegradacija benzena bakterijama

Bakterijska degradacija naftalena je ista kao kod benzena - prvo dolazi do dioksisenacije (cis-1,2-dihidrodiol (Jerina i dr., 1984)), potom sledi dehidrogenacija (1,2- dihidroksinaftalen (Patel i Gibson, 1974)) i na kraju dolazi do otvaranja prestena.



Biodegradacija naftalena bakterijama

Upotreba mikroorganizama (dekontaminacionom procesu) kao biodegradacionih agenasa je u stalnom porastu zbog ogromnog biodiverziteta i neprevaziđenog kataboličkog potencijala. Degradacione sposobnosti su uslovljene kataboličkim genima i enzimima. Osim toga, mikroorganizmi poseduju različite mehanizme za adaptaciju na hidrofobne supstrate kao što su: modifikacija ćelijske membrane, proizvodnja površinski aktivnih supstanci ili upotreba efluks pumpi za smanjenje koncentracije toksičnih komponenti. Sistem za biodegradaciju kod mikroorganizama organizovan je tako da se polazna jedinjenja u većem broju perifernih putanja transformišu do određenih centralnih međuproduka kao što su katehol, homogentizati ili protokatehuali koji se prevode do intermedijera ciklusa trikarbonskih kiselina.



Glavne putanje za aerobnu razgradnju PAH-ova kod bakterija i gljiva

Anaeroban proces se odvija pod dejstvom anaerobnih mikroorganizama i on je toliko spor da je njegov značaj zanemarljiv. Ipak je ustanovljeno da anaerobna razgradnja može uzeti maha nakon što je nafta prethodno bila izložena aerobnim mikroorganizmima (Jobson i dr., 1979). Anaerobna razgradnja ugljovodonika moguća je u dubljim slojevima nafte, tj. u dubini naftonosnih nalazišta bez dotoka vazduha. Pobuđivači anaerobne degradacije su najčešće sulforedukujuće bakterije. Reakcija sulfata pod dejstvom mikroorganizama predstavlja oksido - redukcioni proces. Pri tome se sulfati redukuju do sumporovodonika, a ugljovodonici oksidišu.

3. Mikrobiološka zajednica i dizajn procesi

Da bi uklanjanje zagađenja bilo efikasno potrebno je obezbediti odgovarajuće naftno- oksidujuće mikroorganizme, u dovoljno velikom broju, kao i optimalne uslove za njihov rast i razvoj kao što su dovoljne količine azota i fosfora (Petrović, 1984). Najčešće se primenjuje autohtona mikroflora, koja se izoluje iz zemljišta i razmnožava u bioreaktorima. Pored kvasaca iz rodova *Candida* (*C. lipolytica*, *C. tropicalis*), *Hansenula*, *Torulopsis*, *Rhodotorula* i gljiva iz rodova *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Trichoderma* i druge, osnovnu ulogu u biodegradaciji ugljovodonika nafte imaju bakterije, među kojima dominiraju vrste iz rodova *Pseudomonas*, *Vibrio*, *Arthrobacter*, *Aeromonas*, *Acinetobacter* i dr.

Prilikom dizajniranja bioremedijacionog procesa mora se sprečiti da se zagađenje širi dalje zbog prodiranja u podzemnu vodu. Koja varijanta čišćenja će se primeniti zavisi od vrste zagađenja, prirode terena i dr. Može se primeniti tehnička, spontana bioremedijacija, kombinacija obe, ili mešavina bioremedijacije sa nebiološkim tretmanom. Pošto je obično koncentracija zagađenja u podzemnoj vodi manja nego u zoni izvora zagađenja, onda se mogu primeniti drugačije procedure za izvornu zonu i za raširenu mrlju. Faktori koji utiču na dizajniranje bioremedijacionog procesa su: ciljevi koji se žele postići prilikom tretmana zemljišta, širenje zagađenja (vrsta, koncentracija i lokacija), vrsta biološkog procesa koji efikasno transformiše zagađenje, transportna dinamika zemljišta.

Bioremedijacija se može podeliti na dva osnovna tipa:

- a) Pasivnu (passive) bioremedijaciju, koja se primenjuje kada su prirodni uslovi pogodni za odvijanje bioremedijacije bez ljudske intervencije;
- b) Tehničku (engineered) bioremedijaciju, koja se primenjuje kada je potrebno dodavati materije koje stimulišu mikroorganizme.

Prirodno uklanjanje zagađenja može biti posledica destruktivnih (aerobna i anaerobna biodegradacija, abiotička oksidacija, hidroliza) i nedestruktivnih (sorpcija, razblaženje (disperzija i infiltracija), volatilizacija) procesa. Prednosti prirodnog uklanjanja su niži troškovi čišćenja i minimalno narušavanje pejzaža. Nedostaci su nemogućnost uklanjanja visokih koncentracija zagađenja, može doći do migracije zagađenja, vreme razgradnje težih frakcija je dugo, ne može se uvek postići ciljna vrednost koncentracije zagađenja za razumno vreme, uslovi na lokalitetu mogu biti nepovoljni, potreban je dugotrajan monitoring. Da bi pasivna bioremedijacija bila favorizovana potrebni su sledeći uslovi: stalan protok podzemne vode, prisustvo minerala koji štite da ne dođe do promene pH sredine, prisustvo visokih koncentracija kiseonika, nitrata, sulfata, gvožđa(III). Pasivna bioremedijacija se oslanja na prirodne sposobnosti prisutnih mikrobioloških zajednica.

Termini za tehničku bioremedijaciju su “pojačana” (eng. enhanced) bioremedijacija i “biooporavak” (eng. biorestitution). Tehnička bioremedijacija je brža od pasivne jer se vrši stimulacija mikrobiološke degradacije zagađenja kontrolom koncentracije kiseonika, nutrijenata, vlažnosti, pH, temperature i dr. Tehnička bioremedijacija se primenjuje kada je bitno da se čišćenje izvrši za kratko vreme ili kada se mrlja veoma brzo širi. Ona je podložna varijacijama zbog geoloških, hidroloških i hemijskih karakteristika zemljišta i potrebnog biohemijskog procesa, a važan aspekt prilikom uspostavljanja tehničke bioremedijacije je i to da li se tretira zemljište ili voda.

3.1. In situ i ex situ bioremedijacija

U zavisnosti od lokaliteta izvođenja dekontaminacije, bioremedijacione tehnologije se dele na dve podvrste: in situ i ex situ. In situ bio-tehnologije se izvode direktno na mestu kontaminacije, dok se kod ex situ bio-tehnologija kontaminirano zemljište uklanja sa mesta kontaminacije i transportuje na mesto “obrade/tretmana”. In situ bioremedijacione tehnologije su znatno ekonomičnije od ex situ tehnologija, zato što omogućavaju tretman zemljišta direktno na mestu kontaminacije, pri čemu se izbegavaju troškovi iskopavanja i transporta.

In situ bioremedijacione tehnologije su veoma efikasne kad je podpovršinsko zemljište veoma propustljivo, kad obuhvata zemljište koje se nalazi na dubinama maksimalno od 8 – 10 metara i kada su podzemne vode prisutne na dubinama ispod 10 metara. Dubina kontaminacije predstavlja veoma bitan faktor koji određuje da li će se in situ bioremedijacija primeniti. Zemljište sa niskom propustljivošću nije pogodno za in situ bioremedijaciju. Neke od najvažnijih in situ bioremedijacionih tehnologija su površinska obrada zemljišta (landfarming), bioventilacija, biorasprskavanje, biostimulacija i fitoremedijacija.

In situ bioremedijacija zasniva se na tretiranju kontaminiranog zemljišta ili voda na istoj lokaciji gde je utvrđeno prisustvo kontaminanata. Osnovni cilj aerobne in situ bioremedijacije je obezbeđivanje kiseonika i hranljivih elemenata neophodnih za razvoj mikroorganizama u cilju što efikasnije degradacije kontaminanata. Ovoj grupi metoda, između ostalog, pripadaju i bioventilacija i ubacivanje vodonik-peroksida. Kod sistema bioventilacije vazduh iz atmosfere se ubrizgava u kontaminirano zemljište ili vodu, a

kiseonik, koji na ovaj način dospeva u sistem, koriste mikroorganizmi za sopstvene biosinteze, kao i degradaciju kontaminanta.

Ex situ tehnike bioremedijacije su brže, lakše se kontrolišu i omogućavaju razgradnjušireg spektra kontaminanata nego pri bioremedijaciji *in situ*. Ove tehnike podrazumevaju iskopavanje i tretman kontaminiranog zemljišta pre, aponekad i nakon obavljanja bioremedijacije. Najčešći način bioremedijacije *ex situ* jeste mešanje kontaminiranog zemljišta sa odgovarajućim količinama vode u posebnom «bioreaktoru» uz dodatak mikroorganizama. Informacije iz oblasti molekularne ekologije mogu biti korisne za razvoj metoda bioremedijacije i procenu uticaja na životnu sredinu.

3.2. Sistemi bioremedijacije u arhitekturi

Living machine sistem trebalo bi što više koristiti u arhitekturi kako zbog svojih karakteristika održivog sistema, tako i iz estetskih razloga. Naime, sam koncept ovogpostrojenja zasniva se na imitiranju prirodnih procesa i okruženja, što mu pruža veliki stepenprimene u organskoj arhitekturi. Posebno važan princip u projektovanju danas jeste što bolje ukopiti izgrađene površine u prirodni ambijent, sa što manjim stepenom zagađenja. Uz to,reciklaža i održivi sistemi igradju najznačajniju ulogu. Upravo iz razloga očuvanja životne sredine, korišćenje bioremedijacije u oblikovanju urbanog prostora, tačnije u recikliranju njegovog otpada, je od velike važnosti. Uz to, pažljivo osmišljeni living machine sistemi mogu biti dekorativni, posebno u dvorištima javnih istambenih objekata, parkovima i tome sl.

Neke vrste mikroorganizama mogu da koriste naftu kao izvor ugljenika, neke vrste nafta ubija ili inhibira, dok na neke vrste ne utiče. Fizičke i hemijske karakteristike nafte utiču na stepen i brzinu njene degradacije. Fizički uticaji od značaja za biodegradivnost su: viskoznost, fotolitička aktivnost, isparavanje, mehanička disperzija, rastvaranje, bioemulzifikacija i sorpcija. Viskoznost utiče na širenje naftne mrlje, a time i na pove- ćanje površine pogodne za napad mikroorganizama koji teže da se koncentrišu na dodirnoj površini nafta - voda. Nafta malog viskoziteta prosuta pri hladnijim uslovima otpornija je na biorazgradnju. Fotolitički proizvodi su polarniji i time podložniji biodegradaciji od jedinjenja od kojih su nastali. Tečni ugljovodonici su podložniji biorazgradnji od onih u čvrstom agregatnom stanju.

Lako isparljiva jedinjenja, benzen, toluen, etilbenzen i ksileni (BTEX), relativno lako se razgrađuju usled više faktora: relativno su rastvorni u vodi, mogu služiti kao primarni elektron-donori za mnoge bakterije, brzo se razgrađuju i bakterije koje razgrađuju BTEX brzo rastu u prisustvu kiseonika. PAH-ovi se sporo razgrađuju zbog kompleksne strukture, niske rastvorljivosti i jakih sorptivnih karateristika. Efikasnost biodegradacije individualnih PAH-ova u sedimentu opada sa porastom broja kondenzovanih prstenova u molekulu, tako da se petočlani i šestočlani PAH-ovi veoma teško razgrađuju.

4. Faktori koji utiču na efikasnost bioremedijacije

Za uspešnost bioremedijacionog procesa pored mikroorganizma sposobnog da razgradi kontaminant kao izvor ugljenika moraju se uzeti u obzir i drugi faktori kao što su lakousvojivi izvor azota i fosfora (hranljive supstance), vlažnost, temperatura, kiseonik (aeracija) i eventualno prisustvo surfaktanata. Osim toga, važne su i karakteristike zemljišta kao što je pH, mineraloški sastav i sadržaj organske supstance.

Zagađujuća supstanca predstavlja izvor ugljenika za mikroorganizme, pa je kontaminirano zemljište uglavnom siromašno u azotu i fosforu. Dodatak ovih sastojaka dovodi do povećanog rasta mikroorganizama i ubrzava proces degradacije kontaminanta. Uobičajeno je da se hranljive supstance dodaju u zemljište radi uspostavljanja masenog odnosa ugljenik:azot:fosfor (C:N:P) oko 120:10:1 što je približno odnosu ovih elemenata u biomasi. Dodatak hranljivih supstanci se označava kao biostimulacija, a može se koristiti mineralno đubrivo ili đubrivo organskog porekla (stajsko đubrivo, aktivni mulj). Optimalna vlažnost zemljišta za proces bioremedijacije je 12–30%, ili 40–80% saturacionog kapaciteta.

Dostupnost kiseonika zavisi od intenziteta ukupne mikrobiološke potrošnje i tipa zemljišta. Za povišenje koncentracije O_2 u kontaminiranoj sredini se koriste brojne metode poput prevrtanja, prinudne aeracije, mehaničkog mešanja, bioventilacije, uvođenja vazduha i dodatkom alternativnih izvora kiseonika poput vodonik-peroksida ili najčešće magnezijum-peroksida. pH zemljišta određuje tip mikroorganizama koji je na raspolaganju za biodegradaciju. Većini bakterija odgovara neutralni pH, a gljivama slabo kisela sredina. Obično je optimalno pH za bioremedijaciju u granicama od 6 do 8. Ako je zemljište kiseliije dodaje se kreč, a ako je suviše alkalno pH se podešava dodavanjem amonijum-sulfata.

Tekstura zemljišta utiče na permeabilnost, sadržaj vlage i ukupnu gustinu zemljišta. Fino sprášena zemljišta su manje permeabilna od zemljišta sa krupnim česticama. Zemljišta sa niskom permeabilnošću su obično slepljena i otežavaju distribuciju i transport vlage, hranljivih supstanci i vazduha. Ovakvom zemljištu se prilikom bioremedijacije mogu dodati agensi kao što je slama ili piljevina radi postizanja željene teksture.

5. Biološke metode dekontaminacije

Biološke metode se primenjuju i na zemljište zagađeno radio-nukleidima i mogu se koristiti i u kombinaciji sa ostalim metodama. Najčešće korićeni procesi bioremedijacije za ovaj polutant su: biotransformacija – gde se kontaminirani molekuli prevode u manje opasne ili neopasne molekule; biodegradacija – gde se organske supstance razaraju do manjih organskih i neorganskih molekula; biomineralizacija – gde se razgrađuju organski materijali na neorganske, kao što su CO_2 i H_2O . Sva tri procesa se mogu primeniti in situ i ex situ. Strategije koje se preporučuju za uklanjanje metala i radionukleira uključuju mikrobiološko luženje, mikrobiološke surfaktante, volatilizaciju, bioakumulaciju.

U svakom slučaju, bioremedijacijom se obezbeđuju isti procesi kao oni koji se javljaju u prirodi. Zavisno od mesta i kontaminanta, bioremedijacija može biti bezbednija i jeftinija nego alternativne tehnologije kao što su insineracija i odlaganje na deponiju. Takođe se može primeniti i fitoremedijacija koja podrazumeva upotrebu biljaka za ekstrakciju, sekvstraciju i/ili detoksikaciju polutanata koji su prisutni u zemljištu.

Mehanizmi fitoremedijacije:

- fitostabilizacija – uključuje upotrebu biljaka koje sadrže/imobilišu zagađivače u putem: absorpcije i akumulacije, adsorpcije na površinu korena te precipitaciju u zoni korena;
- fitodegradacija/fitotransformacija – uključuje raspadanje zagađivača kroz: metaboličke procese (interno) i oslobađanje enzima u zemljište;
- fitovolatilizacija - absorpcija i transpiracija zagađivača u atmosferu pomoću biljke;
- rizodegradacija – raspadanje zagađivača u zemljištu zbog interakcije mikrobi/koren/zemljište;

– fitohidraulika – podrazumeva upotrebu biljaka za praćenje migracije zagađivača.



Slika 4. Dekontaminacija zemljišta od strane pripadnika Vojske

Zaključak

Tržište remedijacionih tehnologija je u stalnom porastu. Iako je učešće bioloških metoda na ovom tržištu oko 10%, bioremedijacija ima značajne prednosti u odnosu na druge tehnologije kako u pogledu cene tako i u efikasnosti u uklanjanju polutanata. Ova tehnologija najmanje narušava životnu sredinu, naročito pri primeni in situ, a odgovara i strategiji održivog razvoja. Ipak, bioremedijacija nije univerzalna i nije primenjiva za svako zagađenje. Uspešnost bioremedijacije zemljišta zavisi od niza parametara: faktora sredine, dodatka i dostupnosti hranljivih supstanci i tehničkih karakteristika postrojenja. Važno je istaći da se čak i pod optimalnim uslovima pri procesu ne uklanjaju svi kontaminanti, već efektivnost i ekonomska isplativost biološkog procesa zavisi od identifikacije kritičnih faktora i njihove optimizacije. U državama Zapadnog Balkana se tek očekuje razvoj remedijacionih tehnologija, a u svetu gde se bioremedijacija već komercijalno koristi na industrijskom nivou više od 10 godina stalno se unapređuju tehnike da bi se proširila lista kontaminanata na koje se tretman može primeniti, a proces ubrzati s ciljem povećavanja efikasnosti. Proučavaju se metaboličke putanje i uloga pojedinih sojeva u mikrobnim zajednicama. Uvode se ekotoksikološke metode za praćenje i evaluaciju toka procesa, proučava se distribucija kontaminanata pre i posle primenjenog tretmana. Od posebne važnosti su strategije za povećanje biodostupnosti kontaminanata kao i uvođenje bioloških koraka u postupke bazirane na hemijskim ili fizičkim metodama.

Literatura

- [1] Bakić R., Biočanin R., Badić M. Bioindikatori životne sredine u agro-industrijskom kompleksu Srbije, CESNA B, Beograd, 2011.
- [2] Beškoski V., Đ. Gojgić-Cvijović G., Milić J., Ilić M., Miletić S., Jovančičević B., Vrvic M.: Bioremedijacija zemljišta kontaminiranog naftom i naftnim derivatima: mikroorganizmi, putanje razgradnje, tehnologije, Univerzitet u Beogradu, Hemijski fakultet, Beograd
- [3] Biočanin R., Amidžić B., Panić S. Medical waste treatment, Međunarodna konferencija „OTPADNE VODE, KOMUNALNI ČVRSTI OTPAD I OPASAN OTPAD“, 14-17. april 2008. Vršac.
- [4] Biočanin R., Bakić R., Perić V. Koridor 10 u koncepciji održivog razvoja i očuvanja životne sredine, SVAROG, NUBL, Banja Luka, 2011.

- [5] Biočanin R., Bakić R. Bioindikatori životne sredine u sistemu kvaliteta eko-monitoringa, KVALITET br.7-8, Poslovna politika, Beograd, 2011.
- [6] Biočanin R., Badić M., Milešević T., Čordaš D. Koncept eko-bezbednosti Zapadnog Balkana kao determinante održivog razvoja regiona, XXXII Međ. Savetovanje "ENERGETIKA-2016", 22-25. Mart 2016. Zlatibor.
- [7] Jusufrić I., Biočanin R. Otpad i održivi razvoj, IUT Travnik, Travnik, 2012.
- [8] Milešević T., Biočanin R., Borovčanin J., Nikolić D. Modern water systems in the framework of sustainable development of cities, XI International conference "Traffic and environmental problems of countries in transition in terms of integration in European Union", 22-23. May 2015. Travnik, BiH.
- [9] S.Stefanov, R.Cvejic, R.Biocanin. Modeling of pollutants at the land fillwaste, International scientific and methodological conference "Quality of education" management, certification, recognition, p.152-159, Kramatorsk, Ukraine, 2011.
- [10] Saulović Đ., Biočanin R., Rodriguez B. Bioindicators in human environment, VII Simpozijum „Savremene tehnologije i privredni razvoj“, 19-20. oktobar 2007. Leskovac.