

Bioremedijacija nafte

Žavrljan, Anamarija

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:616053>

Rights / Prava: [In copyright](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2022-10-02**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
BIOLOŠKI ODSJEK

BIOREMEDIJACIJA NAFTE

BIOREMEDIATION OF OIL

SEMINARSKI RAD

Anamarija Žavrljan
Preddiplomski studij Znanosti o okolišu
(Undergraduate Study of Environmental Sciences)
Mentor: prof. dr. sc. Jasna Hrenović

Zagreb, 2019.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. NAFTA.....	2
2.1. Postanak.....	2
2.2. Fizikalno-kemijska svojstva.....	4
3. BIOREMEDIJACIJA.....	6
3.1. Prednosti i nedostaci.....	7
4. ČIMBENICI KOJI UTJEČU NA UČINKOVITOST BIOREMEDIJACIJE...8	
4.1. Hranjive tvari.....	9
4.2. Temperatura.....	10
4.3. pH-vrijednost.....	10
4.4. Vlažnost tla.....	10
4.5. Kisik.....	10
5. MIKROORGANIZMI.....	11
6. <i>IN SITU</i> I <i>EX SITU</i> BIOREMEDIJACIJA.....	12
7. BIOAUGMENTACIJA I BIOSTIMULACIJA.....	13
8. BIOREMEDIJACIJA TLA ONEČIŠĆENOG NAFTOM.....	15
9. BIOREMEDIJACIJA PODZEMNE VODE ONEČIŠĆENE NAFTOM.....	17
9.1. Stimulirana <i>in situ</i> bioremedijacija.....	17
10. ZAKLJUČAK.....	19
11. LITERATURA.....	20
12. SAŽETAK.....	22
13. SUMMARY.....	22

1. UVOD

Današnji svijet teško je zamisliti bez nafte. Velik dio industrije ovisi o nafti i naftnim derivatima. Otkriće nafte definitivno je utjecalo na razvoj prometa. Pozitivno je što je olakšala i ubrzala razvoj, no postoji i negativna strana, a to je njezin štetan utjecaj na okoliš. Crpljenje nafte iz podzemlja, njena prerada, proizvodnja, transport i korištenje onečistila su mnoga područja. Naftne industrije negativno utječu na kvalitetu zraka, onečišćuju mora i oceane, podzemne vode i tla. Postoje brojni načini kako velike količine nafte mogu doći u okoliš i onečistiti ga, npr. događaju se razne nesreće u transportu cisterni, može doći do puknuća naftovoda ili izlivanja iz rafinerija. Sve to jako loše djeluje na područje u kojem se dogodila nesreća. Mnoge životinje ne mogu preživjeti uvjete koji nastanu nakon onečišćenja određenog ekosustava. Ako slučajno nafta dođe do podzemnih voda koje ljudi koriste za svoje potrebe, to štetno djeluje na njih jer nastaje potencijalna opasnost za njihovo zdravlje. Osim toga, ponekad dođe do izlivanja nafte u mora i oceane što isto tako negativno djeluje na živi svijet tog područja. Jedno od najpoznatijih izlivanja nafte u ocean dogodilo se 1989. godine iz tankera Exxon Valdez. Nedaleko od obala Aljaske tanker je udario u podmorski greben i došlo je do izlivanja velikih količina nafte. Smatra se da je ispustio 42 milijuna litara sirove nafte koja se vrlo brzo proširila na veće područje. Mnogi su organizmi, kako biljni tako i životinjski, stradali zbog te nesreće. Čak i ne samo organizmi koji su živjeli u moru već i brojne ptice kojima je nafta došla do perja i onemogućila njihov let. Upravo zbog takvih nesreća i štetnog djelovanja nafte na okoliš, bitno je pronaći, razviti i unaprijediti određene metode koje će omogućiti brzo i učinkovito uklanjanje onečišćujuće tvari iz okoliša. Jedna od tih metoda je bioremedijacija koja uklanja štetnu tvar djelovanjem mikroorganizama. Korištena je za sanaciju mnogih područja, uključujući i područje u kojem je došlo do izlivanja nafte iz tankera Exxon Valdez. Mikroorganizmi su uspješno razgradili velike količine nafte i smanjili onečišćenje.

Cilj ovog seminara je objasniti proces bioremedijacije nafte, čimbenike koji utječu na njenu učinkovitost te navesti mikroorganizme koji imaju sposobnost razgrađivanja naftnih ugljikovodika. Osim toga, u ovom su seminarskom radu objašnjene *in situ* i *ex situ* bioremedijacija, procesi biostimulacije i bioaugmentacije te načini bioremedijacije podzemne vode i tla onečišćenih naftom.

2. NAFTA

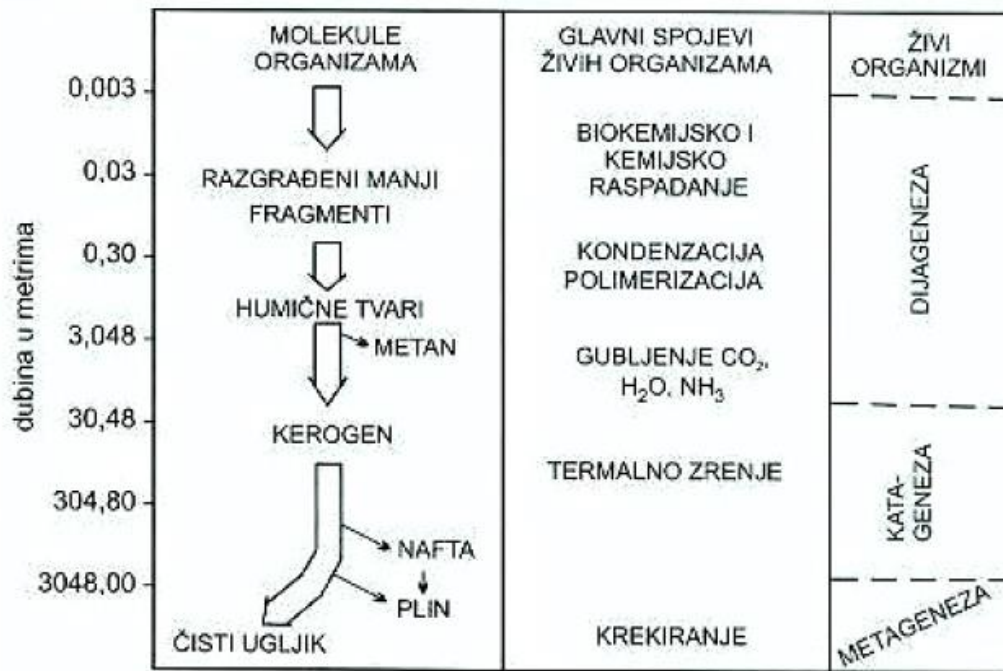
Nafta, zajedno s ugljenom i prirodnim plinom, pripada u skupinu fosilnih goriva. Nafta i ugljen nazivaju se još i kaustobioliti jer su to stijene koje gore. Sagorijevanjem fosilnih goriva nastaju velike količine ugljikovog dioksida koje odlaze u atmosferu. Ako je sagorijevanje nepotpuno nastaje plin ugljikov monoksid koji je vrlo otrovan (Delić, 2009).

2.1. Postanak

Sve teorije o postanku nafte koje postoje mogu se podijeliti u dvije grupe, odnosno dvije teorije, anorgansku i organsku. Do sada prikupljeni dokazi idu u prilog organskoj teoriji. Prema toj teoriji, nafta je nastala od ostataka živih organizama, biljaka i životinja (Mendušić, 2012). Neki smatraju da u postanku nafte sudjeluje samo biljni materijal, najviše alge dok se drugi ne slažu s tim i smatraju da u tom procesu uz biljni sudjeluje i životinjski materijal (Delić, 2009).

Smatra se da su organizmi od kojih je nastala nafta živjeli u morima i jezerima. Nakon što su uginuli, pali su na dno i na njih su se počeli taložiti mulj i pijesak. Debljina taloga se povećavala, a samim time je rastao i tlak. Proces aerobne razgradnje uginulih organizama nije se mogao odvijati jer nije bilo kisika, no zahvaljujući anaerobnim bakterijama organski materijal se razgrađivao u tvari iz kojih je onda raznim kemijskim procesima nastala nafta. (Mendušić, 2012).

Postoje tri bitna procesa za nastanak nafte, a to su dijageneza, katageneza i metageneza (Slika 1). Dijageneza podrazumijeva mijenjanje organskih tvari tijekom njihova transporta i taloženja. Odvija se na nižim temperaturama (50-60 °C) nego ostala dva procesa i na malim dubinama uz biološke i kemijske reakcije. U toj fazi vrlo su značajne bakterije odnosno mikrobiološka aktivnost jer njihovim djelovanjem nastaje jedini ugljikovodik, metan. Tijekom dijageneze nastaju duge i velike molekule. Najveće i najsloženije nazivaju se kerogen. On je vrlo bitan jer iz njega nastaje nafta. Sljedeća faza postanka nafte je katageneza koja nastaje porastom debljine sedimenata, dubine zalijeganja, temperature koja u toj fazi obično iznosi 60-200 °C i tlaka. Kerogen se raspada na manje molekule i nastaje bitumen koji je neposredna izvorišna tvar za naftu. U toj fazi stvaraju se najveće količine nafte. Posljednja faza je metageneza. Odvija se na velikim dubinama i temperaturama većim od 200 °C. U toj fazi kerogen dobiva uređeniju strukturu i nastaju produkti koji se sastoje od malih molekula plina (Slika 2, Velić, 2007).

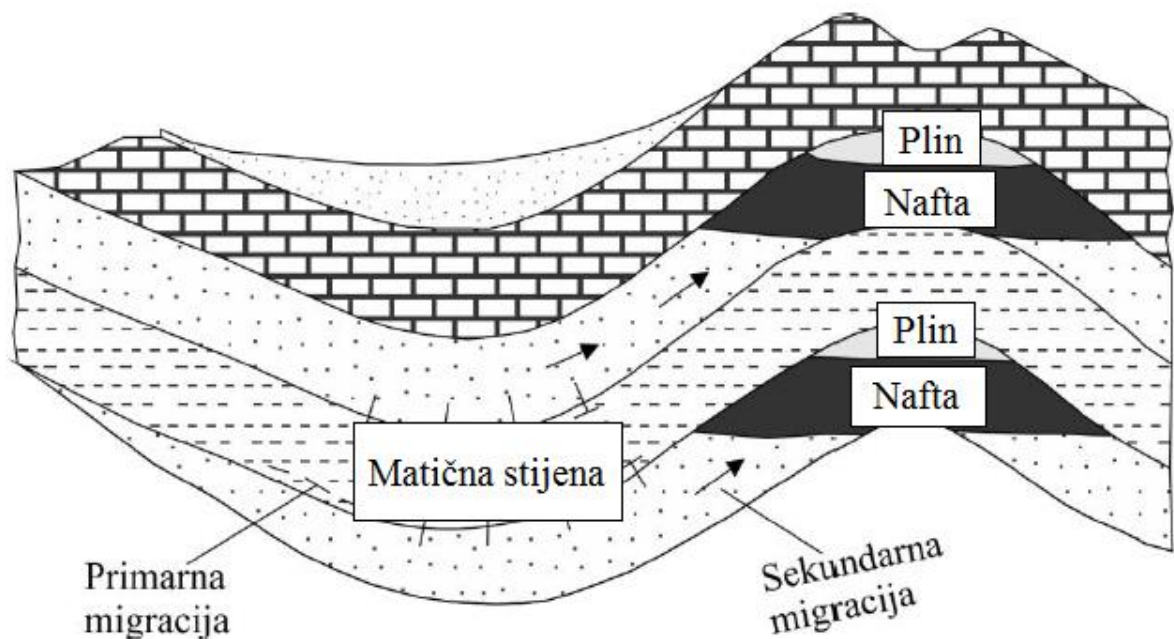


Slika 1. Prikaz procesa pretvorbe organske tvari u sedimentima (preuzeto iz Velić, 2007)



Slika 2. Opća shema nastajanja nafte i plina u odnosu na termalnu zrelost matičnih stijena (preuzeto iz Velić, 2007)

Nafta i plin mogu se kretati kroz stijene u podzemlje i to se naziva migracija ugljikovodika. Postoje primarna i sekundarna migracija. Primarna migracija podrazumijeva otpuštanje ugljikovodika iz matičnih stijena i njihovo kretanje do granice s ležišnim stijenama veće propusnosti dok je sekundarna migracija kretanje nafte i plina unutar kolektorskih stijena. Akumulacija je nakupljanje ugljikovodika u stabilne strukture u kojima mogu dugo biti očuvani, a zamke su strukture iz kojih je migracija nemoguća ili jako spora pa nastaju ležišta (Velić, 2007). U gornjem dijelu ležišta nalazi se plin, u srednjem dijelu nafta, a u donjem dijelu voda, u skladu s njihovim gustoćama (Slika 3, Mendušić 2012).

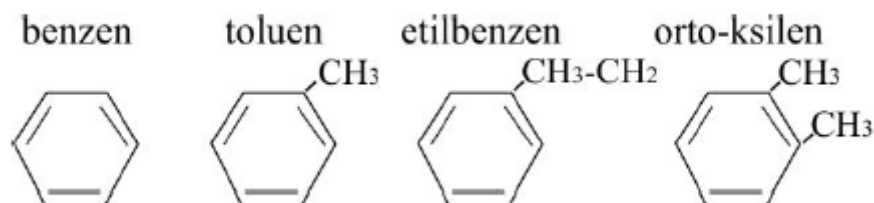


Slika 3. Nastanak ležišta nafte i plina (prilagođeno na temelju Marić, 2015)

2.2. Fizikalno-kemijski sastav

Nafta je složena smjesa različitih spojeva, najvećim dijelom ugljikovodika. Njihov udio u nafti veći je od 75%. Ugljikovodici koji se nalaze u nafti pripadaju skupinama alkana (parafina), cikloalkana (naftena) i aromatskih ugljikovodika (Mendušić, 2012). Od aromatskih ugljikovodika najzastupljeniji su monociklički, najviše benzen. Osim njega, pojavljuju se još i toluen, etilbenzen i ksilen. Skraćeno ih se naziva BTEX (Slika 4, Marić, 2015). Udio određenog ugljikovodika, odnosno sastav nafte, mijenja se ovisno o vrsti i nalazištu nafte. Alkeni (olefini) nisu pronađeni u sirovoj nafti, ali se javljaju kasnije, prilikom njene prerade.

Od ostalih spojeva u sastavu nafte mogu se pronaći sumporni, dušikovi i kisikovi spojevi, ali njihov udio je puno manji (Mendušić, 2012).

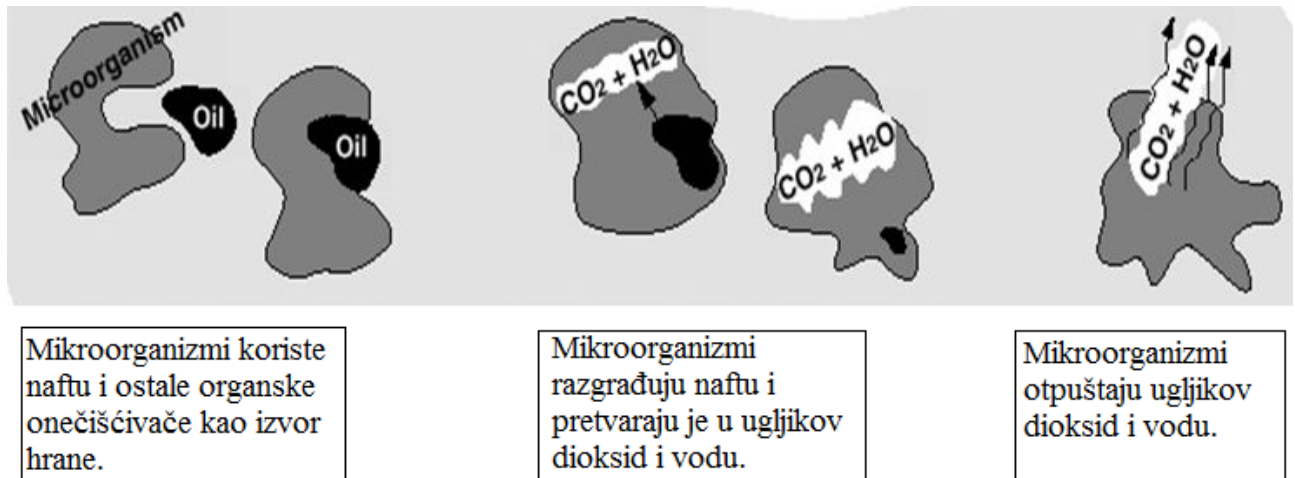


Slika 4. Strukturne formule benzena, toluena, etilbenzena i orto-ksilena (preuzeto iz Marić, 2015)

Fizikalna svojstva koja određuju bitne karakteristike nafte su gustoća, viskoznost, isparljivost i temperatura paljenja. Gustoća nafte obično iznosi od 800 do 900 kg/m³ u standardnim uvjetima. Viskoznost je mjera za unutarnje trenje između slojeva nafte u gibanju, na točno određenoj temperaturi (Mendušić, 2012).

3. BIOREMEDIJACIJA

Bioremedijacija je postupak u kojem se koriste mikroorganizmi koji razgrađuju i uklanjaju štetne tvari iz okoliša na način da ih pretvaraju u tvari koje nisu toliko štetne. Bitno je održavati optimalne uvjete temperature, pH vrijednosti, vlage, kisika i nutrijenata kako bi bioremedijacija bila što uspješnija. To je ekonomski vrlo isplativa metoda. U skladu je s konceptom održivog razvoja pa upravo zbog toga pripada tzv. zelenim tehnologijama (Bertović, 2016). Vrlo je bitno poznavati karakteristike onečišćujuće tvari, područja na kojem je došlo do onečišćenja, ali isto tako i karakteristike mikroorganizama jer nemaju svi iste sposobnosti za razgradnju štetne tvari. Sve navedeno bitno je kako ne bi nastala još veća šteta na tom, ali i širem području. O tim faktorima ovisi i duljina trajanja bioremedijacije koja obično traje nekoliko godina. Ako se razgrađuju jednostavniji spojevi traje nekoliko mjeseci dok se složeniji spojevi razgrađuju mnogo duže. Bioremedijacija je proces koji se može odvijati u aerobnim i anaerobnim uvjetima. U aerobnim uvjetima mikroorganizmi koriste kisik kako bi pretvorili štetnu tvar u ugljikov dioksid i vodu (Slika 5), a u anaerobnim uvjetima razgradnjom štetne tvari nastaju različiti produkti, najčešće metan, ugljikov dioksid i vodik (Raičević i sur., 2007).



Slika 5. Proces bioremedijacije nafte (prilagođeno na temelju

[https://www.google.com/search?rlz=1C1GGRV_enHR751HR751&biw=1366&bih=657&tbm=isch&sa=1&ei=eV44XfmVO8OWsAfysIXgDg&q=bioremediation+of+oil&oq=bioremediation+of+oil&gs_l=img.3..0i19.96062.99985..101744...0.0..0.122.739.1j6.....0...1..gws-wiz-img.....0i8i30i19.gZi3u8q_VBg&ved=0ahUKEwi5tuL81c3jAhVDC-wKHJYAewQ4dUDCAY&uact=5#imgdii=V2WOj2wNmxQv8M:&imgcr=D7agVKNoMcQ8TM:\)](https://www.google.com/search?rlz=1C1GGRV_enHR751HR751&biw=1366&bih=657&tbm=isch&sa=1&ei=eV44XfmVO8OWsAfysIXgDg&q=bioremediation+of+oil&oq=bioremediation+of+oil&gs_l=img.3..0i19.96062.99985..101744...0.0..0.122.739.1j6.....0...1..gws-wiz-img.....0i8i30i19.gZi3u8q_VBg&ved=0ahUKEwi5tuL81c3jAhVDC-wKHJYAewQ4dUDCAY&uact=5#imgdii=V2WOj2wNmxQv8M:&imgcr=D7agVKNoMcQ8TM:)

3.1. Prednosti i nedostaci

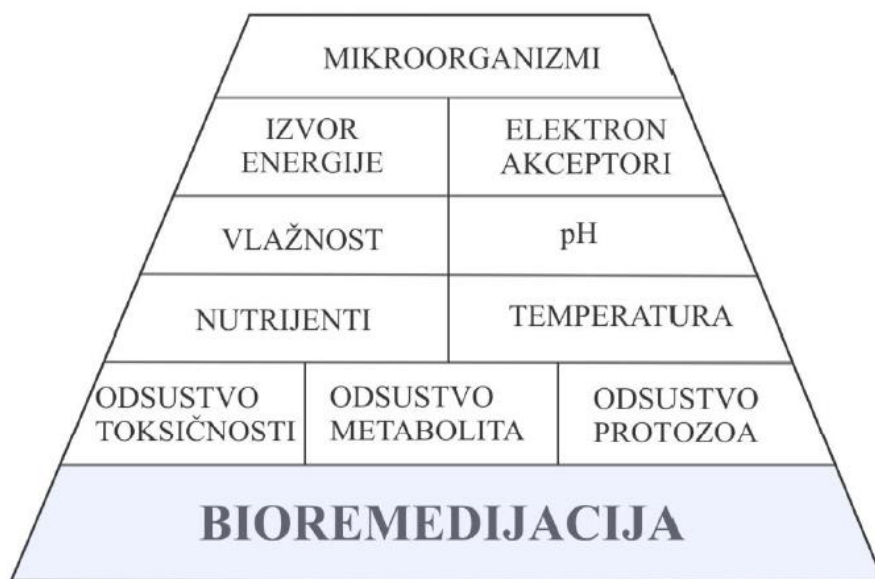
Kao i svaki drugi proces, bioremedijacija ima prednosti i nedostatke. Pozitivna strana je to što je ekonomičnija i prihvatljivija za okoliš od kemijskih i fizikalnih postupaka koji se također koriste za sanaciju onečišćenih područja. Odnosno, njena primjena manje utječe na okoliš od fizikalno-kemijskih postupaka jer ne zahtjeva velike promjene na onečišćenom području. Osim toga, određeni mikroorganizmi mogu u potpunosti ukloniti štetnu tvar iz okoliša, što je vrlo teško postići u jednom koraku koristeći fizikalno-kemijske procese. Ako se radi o nafti, nije ju potrebno premještati na drugo mjesto i na taj način riskirati moguće onečišćenje okolnih područja, već se postupak može provesti na onečišćenom području (<https://hr.thpanorama.com/articles/biologa/biorremediacin-caractersticas-tipos-ventajas-y-desventajas.html>). Nafta se transformira u manje opasne spojeve, a ne prenosi u druge sustave. Isto tako, nema potrebe da osoba koja provodi taj proces bude dugo izložena štetnoj tvari i ugrožava svoje zdravlje. Negativna strana bioremedijacije je to što ponekad rezultati dobiveni u laboratoriju nisu jednaki onima na terenu. Produkt nastao u procesu bioremedijacije ispušta se okoliš te postoji mogućnost da je više toksičan od onečišćujuće tvari, a tada se šteta u okolišu povećava. Isto tako, nisu svi kemijski spojevi biorazgradivi pa je ponekad slabo učinkovita. Osim toga, to je vrlo složen proces koji ovisi o mnogim čimbenicima koje je potrebno neprestano kontrolirati. Još jedan nedostatak je nemogućnost predviđanja vremena potrebnog za taj proces. Bioremedijacija može trajati dulje od fizikalno-kemijskih procesa koji se također koriste sa istom svrhom, za sanaciju onečišćenih područja (<https://hr.thpanorama.com/articles/biologa/biorremediacin-caractersticas-tipos-ventajas-y-desventajas.html>).

4. ČIMBENICI KOJI UTJEČU NA UČINKOVITOST BIOREMEDIJACIJE

Bioremedijacija je vrlo složen proces i na njezinu učinkovitost utječu mnogi čimbenici: hranjive tvari, temperatura, pH vrijednost, vlaga i kisik (Tablica 1). Ako je onečišćenje nastalo u tlu, na konačni rezultat bioremedijacije utječu i karakteristike tog tla, odnosno njegova struktura i tekstura (Bertović, 2016). One utječu na količinu vlage u tlu i permeabilnost. Tla koja se uglavnom sastoje od manjih čestica su manje permeabilna pa je otežan transport hranjivih tvari, kisika i vlage. Zato se ponekad tlu dodaju slama i piljevina kako bi se olakšao transport tih faktora. Za uspješnost bioremedijacije važan je udio gline i organske tvari jer na sebe vrlo dobro vežu štetne tvari pa ih na taj način čine manje dostupnim mikroorganizmima (Silva-Castro i sur., 2015). Osim toga, na učinkovitost bioremedijacije utječu i karakteristike štetne tvari i mikroorganizama. Većina naftnih ugljikovodika u nekoj je mjeri biorazgradiva. O broju atoma i strukturi molekule ovisi koliko brzo se određeni ugljikovodik može razgraditi. Najlakše se razgrađuju n-alkani, zatim razgranati alkani i alkeni dok se najteže razgrađuju policiklički aromatski ugljikovodici (Beškoski i sur., 2012). Nemaju svi mikroorganizmi sposobnost razgradnje nafte pa je potrebno znati njihove mogućnosti i koristiti one mikroorganizme koji će omogućiti što bolji rezultat. Ponekad je potrebno povećati broj organizama prilagodbom okolišnih uvjeta ili dodavanjem novih mikroorganizama (Bertović, 2016). Treba uzeti u obzir i druge toksične tvari koje se nalaze na onečišćenom području. Postoji mogućnost da te tvari nisu biorazgradive, a mogu negativno djelovati na mikroorganizme koji razgrađuju onečišćujuću tvar. Ako postoje toksični spojevi koji štete mikroorganizmima, učinkovitost bioremedijacije će biti manja (Slika 6, Bobić, 2005).

Tablica 1. Čimbenici koji utječu na učinkovitost bioremedijacije (preuzeto iz Bertović, 2016)

Parametri	Minimalni uvjeti za biodegradaciju	Idealni uvjeti za biodegradaciju
Udio vlage (%)	25 - 28	30 – 90
pH	5,5 – 8,8	6,5 – 8,0
Udio kisika (%)	Aerobni uvjeti	10 – 40
Nutrijenti	N i P	C:N:P = 100:10:1
Temperatura	15-45	20 – 30



Slika 6. Faktori koji utječu na uspješnost bioremedijacije (preuzeto iz Marić, 2015)

4.1. Hranjive tvari

Nafta je izvor ugljika kojeg mikroorganizmi koriste za rast i razvoj. Osim ugljika potrebni su im i drugi elementi, posebno dušik, fosfor i sumpor. Poznato je da su bakterijama ti elementi vrlo bitni i bakterije sudjeluju u njihovim biogeokemijskim ciklusima, odnosno kruženju tih elemenata u prirodi. One ih koriste u svom metabolizmu i pretvaraju u druge spojeve koje onda koriste drugi organizmi. Sumpor je element koji se nalazi u sastavu nafte pa ga obično ima dovoljno, za razliku od dušika i fosfora. Ako ih nema dovoljno na mjestu onečišćenja potrebno ih je dodati kako bi mikroorganizmi mogli normalno rasti i što učinkovitije razgraditi štetnu tvar. Kako bi se nadoknadio njihov nedostatak, obično se dodaje umjetno gnojivo NPK. Omjer tih najbitnijih elemenata trebao bi biti C:N:P=100:10:1 jer je to približan omjer tih elemenata u biomasi (Bertović, 2016). Izbor nutrijenata puno je važniji za *in situ* nego za *ex situ* bioremedijaciju. Pri izboru treba paziti na vrijeme njihovog zadržavanja u tlu. Svi elementi potrebni za proces bioremedijacije u tlu ili podzemnoj vodi, skoro uvijek su prisutni u dovoljnim količinama, osim dušika i fosfora. Potreba za nutrijentima ovisi o tome koliko se nutrijenti obnavljaju iz mrtvih organizama, kolika količina onečišćujuće tvari je pretvorena u ugljikov dioksid i koliko nutrijenata već postoji na tom području. Izvor fosfora najčešće su fosforne kiseline, a izvor dušika može biti amonijeva sol, nitratna sol, urea ili kombinacija različitih supstanci, npr. umjetno gnojivo NPK (Ugrinov i Stojanov, 2010).

4.2. Temperatura

Raspon temperature na kojem se može odvijati biorazgradnja vrlo je velik. Postoje neki mikroorganizmi koji imaju sposobnost biorazgradnje onečišćujućih tvari na ekstremnim temperaturama. Ipak, optimalna temperatura za većinu mikroorganizama je između 15 i 45 °C (Vidali, 2001). Temperatura na kojoj je razgradnja određene onečišćujuće tvari najbrža ovisi o sustavu u kojem se onečišćenje nalazi. Ako se nalazi u tlu razgradnja štetne tvari najbrža je na temperaturama 30-40 °C. U slatkovodnim sustavima to se događa na temperaturama 20-30 °C, a u morskim sustavima 15-20 °C (Venosa i Zhu, 2003). Na višim temperaturama dolazi do ubrzanja enzimske aktivnosti pa je i biorazgradnja puno brža. No ako su temperature previsoke dolazi do raspada i neaktivnosti enzima i proteina (Marić, 2015).

4.3. pH vrijednost

Vrsta mikroorganizama koja sudjeluje u procesu bioremedijacije ovisi o pH vrijednosti. Optimalni uvjeti za aktivnost mikroorganizama postižu se u neutralnoj sredini. To je najčešće u granicama pH vrijednosti od 6,5 do 8 (Bertović, 2012).

4.4. Vlažnost tla

Najpovoljnija vlažnost tla za proces bioremedijacije je između 30 i 90%. Udio vlage vrlo je bitan jer ukoliko nema dovoljno vlage mikroorganizmi ne mogu normalno rasti, već je njihov rast ograničen i smanjen. Ako se udio vlage smanji ispod 10% bakterije ugibaju. Prevelika vlažnost tla nije dobra jer smanjuje udio kisika pa mogu nastati anaerobni uvjeti (Vidali, 2001).

4.5. Kisik

Kisik je jedan od najbitnijih elemenata za razgradnju nafte. Upravo zbog toga, ako ga nema dovoljno, potrebno ga je dodati kako bi razgradnja bila što bolja. Biorazgradnja naftnih ugljikovodika najbrža je u aerobnim uvjetima. Koncentracija kisika brže se smanjuje u tlima koja sadrže veći udio onečišćenja pa mogu nastati anaerobni uvjeti (Bertović, 2016).

5. MIKROORGANIZMI

Bakterije su razvile sposobnost za razgradnju raznih ugljikovodika zahvaljujući enzimskim reakcijama. Enzimi koji sudjeluju u reakcijama nalaze se u bakterijama i omogućuju da energiju iz kemijskih veza ugljikovodika bakterije iskoriste za rast i razvoj (Bertović, 2016). Lakši ugljikovodici koji imaju manju molekulsku masu i jednostavniju strukturu, mogu se lakše razgraditi. Upravo zbog toga, postoji veći broj različitih bakterija koje su razvile sposobnost da ih mogu transformirati u spojeve koji nisu opasni za viša živa bića. Teže i složenije ugljikovodike puno je teže razgraditi pa su samo neki bakterijski sojevi razvili enzimске reakcije koje to mogu učiniti (Llado i sur., 2012). Potrebno je sinergijsko djelovanje različitih bakterijskih sojeva kako bi se razgradili naftni ugljikovodici, a samim time, kako bi cijeli postupak bioremedijacije bio uspješan (Bertović, 2012). Od svih ugljikovodika najlakše se mogu razgraditi alkani. Lakše se razgrađuju jednostavniji, a teže složeniji alkani uz nekoliko iznimaka. C₅-C₁₀ ugljikovodici mogu izazvati oštećenja lipidne membrane pa su zbog toga štetni za neke mikroorganizme. Za razliku od njih, C₂₀-C₄₀ ugljikovodici su u čvrstom agregacijskom stanju na sobnoj temperaturi i hidrofobni su pa ih je zbog toga teže razgraditi (Beškoski i sur., 2012). Bakterije razgrađuju alkane postepenom oksidacijom do alkohola, aldehida i masnih kiselina. U procesu oksidacije katalizator je enzim alkan monooksigenaza. Rodovi mikroorganizama koji najčešće sudjeluju u bioremedijaciji nafte, odnosno naftnih ugljikovodika su bakterije: *Nocardia*, *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Flavobacterium*, *Micrococcus*, *Arthrobacter*, *Corynebacterium*, *Achromobacter*, *Rhodococcus*, *Alcaligenes*, *Mycobacterium* i *Bacillus*, kvasci: *Rhodotorulla*, *Candida*, *Sporobolomyces* i *Aureobasidium* te plijesni: *Fusarium*, *Aspergillus*, *Mucor*, *Penicillium*, *Trichoderma* i *Phanerochaete* (Balba i sur., 1998; Cerniglia i Sutherland, 2001; Kuhad i Gupta, 2009). Određeni mikroorganizmi mogu razgraditi samo neke komponente nafte. Upravo zbog toga koriste se miješane kulture različitih mikroorganizama tako da svaka vrsta razgradi određenu komponentu kako bi bioremedijacija bila učinkovitija. Postoje mikroorganizmi koji primarno razlažu naftu, no uz njih se u zemlji nalaze i drugi mikroorganizmi koji se hrane produktima nastalim primarnom razgradnjom nafte. Uklanjanjem tih produkata, nastavlja se daljnja razgradnja nafte (Beškoski i sur., 2012).

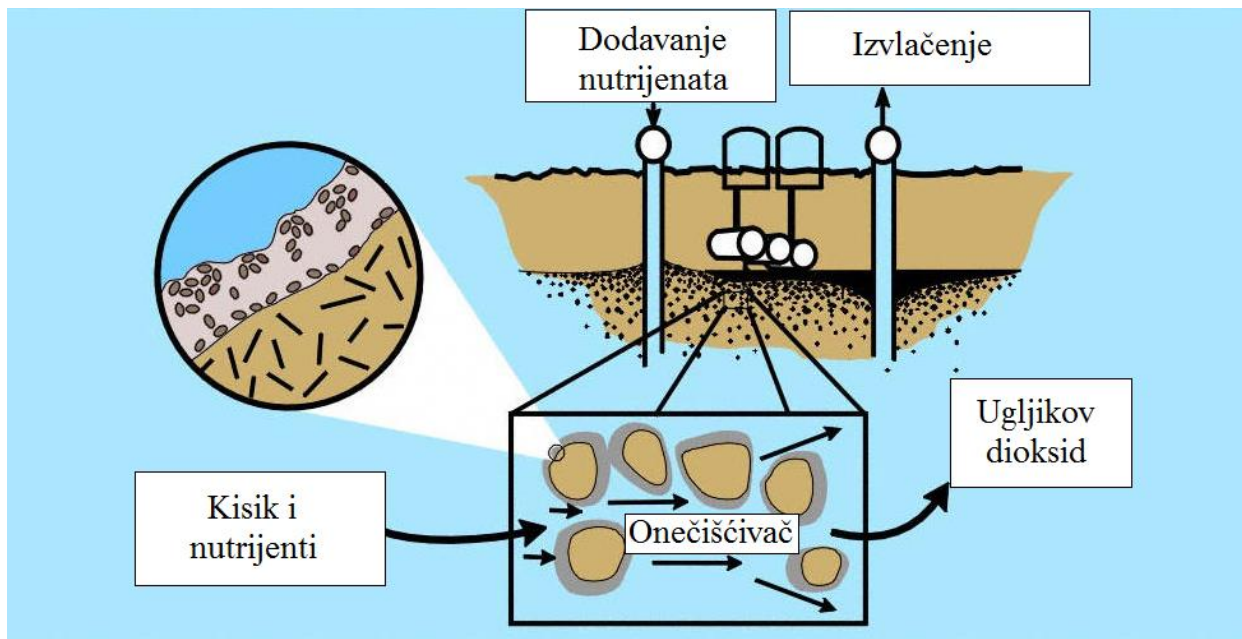
6. IN SITU I EX SITU BIOREMEDIJACIJA

Postoje dva tipa bioremedijacije s obzirom na to gdje se obrađuje zemlja ili voda onečišćena naftom. *In situ* bioremedijacija podrazumijeva obrađivanje onečišćene zemlje ili vode na mjestu na kojem je onečišćenje nastalo, dok *ex situ* bioremedijacija zahtjeva iskopavanje onečišćene zemlje ili ispumpavanje onečišćene vode te prenošenje u posebna postrojenja gdje se to dalje obrađuje. Za aerobnu *in situ* bioremedijaciju, vrlo je bitno da se mikroorganizmima osigura dovoljna količina kisika i hranjivih tvari kako bi se mogli što bolje razvijati i učinkovito razgraditi naftu. Prilikom korištenja *ex situ* bioremedijacije vrlo često se zemlja onečišćena nekom štetnom tvari pomiješa s određenom količinom vode u posebnom postrojenju te se dodaju mikroorganizmi. Oba tipa imaju svoje prednosti, ali i nedostatke (Bertović, 2016). *In situ* bioremedijacija ekonomski je isplativija jer nema potrebe za iskopavanjem, ispumpavanjem i transportom onečišćene zemlje ili vode. Nedostatak joj je slaba kontrola uvjeta. Vrlo je važno onemogućiti ispiranje štetnih tvari u podzemne vode, ali i druge sustave kako se onečišćenje ne bi dalje širilo (Beškoski i sur., 2012). *Ex situ* bioremedijacija skuplja je zbog troškova iskopavanja, ispumpavanja i transporta, ali se vrlo dobro mogu kontrolirati uvjeti i nema opasnosti od procjeđivanja otpadnih voda (Bertović, 2016).

7. BIOAUGMENTACIJA I BIOSTIMULACIJA

Bioaugmentacija je proces u kojem se mikroorganizmi koji imaju enzime potrebne za razgradnju određene štetne tvari dodaju u onečišćeno tlo ili vodu zbog toga što nema dovoljno prirodno prisutnih bakterija na tom području ili prisutne bakterije ne posjeduju enzime potrebne za razgradnju štetne tvari. Mikroorganizmi koji se koriste u tom procesu mogu se uzeti s mjesta na kojem je došlo do onečišćenja ili iz nekog drugog izvora (Beškoski i sur., 2012). Bioaugmentacija nije uvijek uspješna. Ponekad se dogodi da se broj organizama koji se doda na mjesto onečišćenja naglo smanji. Razlozi toga mogu biti različiti: može doći do kompeticije između mikroorganizama koji su prirodno prisutni na tom području i onih koji su naknadno dodani, ili čak do predatorstva nekih većih organizama, npr. protozoa koji mogu koristiti mikroorganizme za ishranu. Osim toga, jedan od razloga može biti neprilagođenost dodanih mikroorganizama na promjene određenih uvjeta u okolišu, npr. promjene temperature, pH vrijednosti i hranjivih tvari (Beškoski i sur., 2012). Zato je bolje upotrijebiti mikroorganizme koji se nalaze na onečišćenom području jer su već prilagođeni uvjetima tog okoliša (Horakova i Nemeč, 2000). Pri izboru mikroorganizama koji će se koristiti u postupku bioaugmentacije potrebno je uzeti u obzir njihovu sposobnost razgrađivanja nafte, sposobnost preživljavanja i otpornost na druge štetne tvari koje se nalaze na onečišćenom području. Najčešće se priprema miješana kultura, broj organizama se povećava i dodaje onečišćenom području (Beškoski i sur., 2012).

Biostimulacija je proces u kojem se postižu idealni uvjeti za rast i razvoj mikroorganizama. To se može postići na više načina. Neki od njih uključuju dodavanje kisika i nutrijenata, ali isto tako i rahljenje i vlaženje tla, ako je onečišćena tvar u tlu (Slika 7, Silva-Castro, 2015). Ponekad je potrebno dodati surfaktante. To su spojevi koji smanjuju površinsku napetost vode i povećavaju topljivost tvari. Ako se radi o onečišćenju tla naftom, ugljikovodici u tlu vežu se na čestice tla pa upotreba surfaktanata potpomaže desorpciju onečišćenja i povećava njihovu dostupnost mikroorganizmima. U tlo se mogu dodati komercijalni surfaktanti ili mogu nastati kao produkt razgradnje ugljikovodika određenih sojeva bakterija (Bertović, 2016). Glavni cilj oba postupka brza je i učinkovita razgradnja onečišćenja. Kombinacijom tih postupaka postižu se najbolji rezultati razgradnje naftnih ugljikovodika (Bertović, 2016).



Slika 7. Biostimulacija tla onečišćenog naftom (prilagođeno na temelju

[https://www.google.com/search?rlz=1C1GGRV_enHR751HR751&biw=1366&bih=608&tbm=isch&sa=1&ei=eV44XfmVO8OWsAfysIXgDg&q=bioremediation+of+oil&oq=bioremediation+of+oil&gs_l=img.3..0i19.7441.9447..10247...0.0..0.138.771.3j4.....0.....1..gws-wiz-img.....0i8i30i19.YH8nM8cY0gE&ved=0ahUKEwi5tuL81c3jAhVDC-wKHxJYAewQ4dUDcAY&uact=5#imgrc=C6Ypm1A6vwLMBM:\)](https://www.google.com/search?rlz=1C1GGRV_enHR751HR751&biw=1366&bih=608&tbm=isch&sa=1&ei=eV44XfmVO8OWsAfysIXgDg&q=bioremediation+of+oil&oq=bioremediation+of+oil&gs_l=img.3..0i19.7441.9447..10247...0.0..0.138.771.3j4.....0.....1..gws-wiz-img.....0i8i30i19.YH8nM8cY0gE&ved=0ahUKEwi5tuL81c3jAhVDC-wKHxJYAewQ4dUDcAY&uact=5#imgrc=C6Ypm1A6vwLMBM:)

8. BIOREMEDIJACIJA TLA ONEČIŠĆENOG NAFTOM

Metoda bioremedijacije vrlo se često koristi za sanaciju tla onečišćenog naftnim ugljikovodicima. Ugljikovodični spojevi koji onečišćuju tlo se uz pomoć mješovite kulture mikroorganizama pretvaraju u manje opasne spojeve i na kraju u ugljikov dioksid i vodu. Glavni cilj je pročistiti tlo kako bi se moglo ponovno koristiti za uređenje okoliša ili kao građevinski materijal (Bertović, 2016). Kako bi se utvrdilo može li se provesti proces bioremedijacije potrebno je procijeniti mogući stupanj razgradnje onečišćujuće tvari. Uz to treba odrediti postoji li sposobnost postizanja potpune mineralizacije i uvjete u okolišu koji su za to potrebni. Mineralizacija organskih tvari podrazumijeva njihovu potpunu razgradnju na anorganske sastavne dijelove (Bobić, 2005). Osim toga, potrebno je analizirati mjesto na kojem je došlo do onečišćenja. Prvo treba provjeriti je li uopće to područje pogodno za proces bioremedijacije. Provodi se analiza tla kako bi se odredio stupanj onečišćenja, o kojoj vrsti tla se radi, količina hranjivih tvari i postoje li mikroorganizmi koji imaju sposobnost razgrađivanja nafte. Ako u tlu nema mikroorganizama potrebnih za bioremedijaciju ili ih je vrlo malo, potrebno ih je dodati na mjesto onečišćenja. Uzorkovanje i ispitivanje tla vrlo je bitno zbog određivanja optimalnih uvjeta za proces bioremedijacije. Uzorci se uzimaju periodično kako bi se mogao pratiti tijek razgradnje (Bobić, 2005). Bioremedijacija tla onečišćenog naftom može se odvijati *in situ* i *ex situ*. Uvjete ispod površine vrlo je teško kontrolirati. Budući da *ex situ* metoda omogućuje kontrolu uvjeta smatra se vrlo dobrom metodom u tom postupku. Problem je što su troškovi vrlo veliki pa se često primjenjuje jeftinija *in situ* metoda. Tri faktora kojima se provjerava može li se provesti *in situ* postupak su učinkovitost, primjenjivost i troškovi (Bobić, 2005).

Ako je tlo onečišćeno naftnim ugljikovodicima do dubine od 50 cm, a ne dublje, može se primijeniti postupak obrade koji se primjenjuje pri odlaganju na tlo. Prvo se tlo iskapa, a zatim skuplja u gomile u procesu kompostiranja. Nakon toga dodaju se hranjive tvari, tlo se prozračuje i postavljaju se uvjeti optimalne pH vrijednosti kako bi bioremedijacija bila što uspješnija (Bobić, 2005). Postoji mogućnost tretiranja tla u posebnim površinskim bioreaktorima u kojima se pomiješaju tlo i aktivni mulj (Bobić, 2005). Gomile su zaštićene plastičnim folijama kako ne bi došlo do osipanja i da bi bilo dovoljno toplo. Do njih se cijevima dovode kisik i hranjive tvari. Bioremedijacija površinskog onečišćenja može biti vrlo brz proces, potrebno je otprilike 100 dana ako se optimiziraju svi potrebni čimbenici (Bobić, 2005).

Za razliku od površinskih onečišćenja tla, duboka onečišćenja tla naftnim ugljikovodicima puno je teže sanirati jer se smanjuje mogućnost kontroliranja potrebnih uvjeta. Prvo je potrebno procijeniti u kakvom je stanju onečišćeno područje, no to nije toliko teško jer postoje mnoge tehnike koje omogućuju jednostavnu procjenu stanja tla. Najčešće je najveći problem kisik jer ga na tim dubinama nema dovoljno. Zato je za *in situ* metodu najbitnije omogućiti dotok kisika (Bobić, 2005). Ponekad se umjesto kisika može dodati vodikov peroksid, no budući da je toksičan i njegove reakcije s nekim sastavnicama tla mogu blokirati pore tla, kisik se smatra puno boljim izborom. Osim toga, vodikov peroksid puno je skuplji od kisika (Bobić, 2005). U cijelom tom procesu, vrlo su bitne i laboratorijske metode koje pomažu odrediti stupanj razgradnje nafte (Bobić 2005).

Onečišćenje tla naftom često može predstavljati problem za podzemne vode. Nafta koja se nalazi na površini tla ispod kojeg postoji vodonosni sloj teče okomito prema dolje zbog utjecaja sile teže (Bobić, 2005). Kad onečišćujuća tvar dođe do vodonosnog sloja, počinje se lateralno širiti, a vrlo često prodire i dublje u vodonosni sloj. Nafta se također može širiti i radijalno kapilarnim silama u mreži pornih prostora koji se nalaze između čestica tla. Neki onečišćivači naftnog podrijetla putuju i šire se jednakom brzinom kojom se kreću i podzemne vode dok su neki ipak sporiji zbog različitih interakcija s česticama tla u vodonosnom sloju (Bobić, 2005). Potrebno je vrlo oprezno postupati i ako je moguće izbjeći onečišćenje podzemne vode. Ako to ne uspije i dođe do onečišćenja podzemne vode postoje metode za sanaciju koje su opisane u narednom poglavlju.

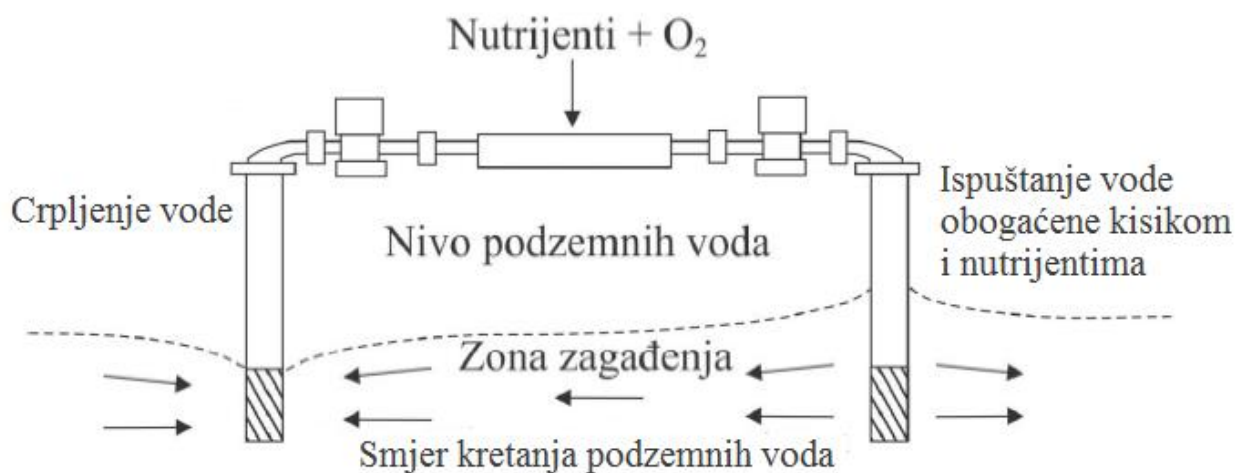
9. BIOREMEDIJACIJA PODZEMNIH VODA ONEČIŠĆENIH NAFTOM

Bioremedijacija je vrlo učinkovit postupak koji se često koristi za sanaciju podzemne vode onečišćene naftom. Čimbenik koji utječe na odvijanje tog postupka je oblik u kojem se onečišćujuća tvar nalazi u podzemnoj vodi zbog interakcije s mikroorganizmima. Brzina procesa razgradnje ovisi o fizičko-kemijskim karakteristikama nafte (Marić, 2015). Energija potrebna mikroorganizmima da bi bili aktivni nastaje oksidacijsko-redukcijskim reakcijama u kojima dolazi do oksidacije organske onečišćujuće tvari, dok se elektron akceptor reducira. Onečišćujuća tvar predstavlja elektron donora, a elektron akceptori su neorganski spojevi koji mogu primiti elektrone koje otpuštaju drugi kemijski spojevi (Marić, 2015). Kako bi mikroorganizmi dobili što više energije, potrebne su reakcije oksidacije naftnih ugljikovodika i reakcije redukcije elektron akceptora (Marić, 2015). Ako postoji dovoljno elektron donora i akceptora, reakcije će se odvijati tako da one u kojima se oslobađa više energije imaju prednost u odnosu na one reakcije u kojima se oslobađa manje energije (Marić, 2015). Kisik je elektron akceptor kojim mikroorganizmi dobiju najviše energije. Nakon njega slijede nitratni ioni, ioni mangana, ioni željeza, sulfatni ioni i hidrokarbonatni ioni. Navedeni su redoslijedom s obzirom na to koliko energije se oslobađa. Nakon redukcije jednog elektron akceptora prelazi se na redukciju drugog koji oslobađa manje energije (Marić, 2015). Svaka reakcija utječe na kemijski sastav podzemnih voda, a promjene kemijskog sastava daju informaciju o tome kako napreduje biorazgradnja, odnosno otkrivaju stupanj razgradnje (Marić, 2015). Osim toga, uvid u to kako napreduje proces može se dobiti iz podataka o promjenama koncentracija onečišćujućih tvari u određenom vremenu. Time se jasno može zaključiti dolazi li do smanjenja onečišćenja u podzemnim vodama (Marić, 2015). Najbrža razgradnja većine organskih onečišćujućih tvari odvija se u aerobnim uvjetima (Venosa i Zhu, 2003). Za biorazgradnju onečišćujuće tvari podzemnih voda u aerobnim uvjetima potrebna je koncentracija kisika iznad 0,5 mg/l (Marić, 2015).

9.1. Stimulirana *in situ* bioremedijacija

Jedna od metoda koja se koristi za pročišćavanje onečišćenih podzemnih voda je stimulirana *in situ* bioremedijacija. Glavni cilj te metode je postizanje optimalnih uvjeta kontroliranjem faktora koji utječu na bioremedijaciju. Taj postupak podrazumijeva biostimulaciju i bioaugmentaciju (Alvarez i Illman, 2006). Biostimulacija se puno češće koristi ako se radi o onečišćenju naftnim ugljikovodicima (Slika 8). Bioaugmentacija se ne

koristi toliko često koliko za onečišćenja tla. Mikroorganizmi koji se koriste u tom postupku obično se uzimaju iz sedimenta onečišćenog područja jer su tada u većini slučajeva rezultati znatno bolji (Horakova i Nemeč, 2000). Prije primjene stimulirane *in situ* bioremedijacije potrebno je detaljno istražiti mjesto na kojem je došlo do onečišćenja i otkriti ograničavajuće faktore kako bi se moglo utjecati na njih sa svrhom učinkovitije biorazgradnje. Na rezultat te metode utječu koeficijent filtracije i karakteristike onečišćujuće tvari. Koeficijent filtracije prikazuje sposobnost podzemne vode da propušta nutrijente i elektron akceptore. Još jedan bitan faktor je koncentracija željeza. Dodavanjem kisika u podzemnu vodu može doći do reakcije sa željezom pri čemu nastaje talog. To može predstavljati problem prilikom dodavanja kisika radi bolje učinkovitosti jer se spajanjem kisika sa željezom smanjuje količina elementarnog kisika. Zato koncentracija željeza ne bi smjela biti prevelika. Prije bioremedijacije treba utvrditi brojnost mikroorganizama. Neki izvori tvrde da je granična vrijednost broja bakterija potrebnih za uspješnu bioremedijaciju 1000 CFU/g (Marić, 2015). Najveći broj primijenjenih bioremedijacija onečišćenih podzemnih voda zasniva se na povećanju dostupnosti elektron akceptora i nutrijenata, najčešće dušika i fosfora. Ipak, u novije vrijeme sve se češće koriste kombinacije biostimulacije i bioaugmentacije radi postizanja boljih rezultata (Marić, 2015).



Slika 8. Shema sustava za biostimulaciju dodavanjem kisika i nutrijenata (prilagođeno na temelju Marić, 2015)

10. ZAKLJUČAK

Bioremedijacija je jedna od metoda koje mogu učinkovito ukloniti naftu iz okoliša. Glavne prednosti procesa su ekonomska isplativost jer su troškovi puno niži u odnosu na neke druge fizikalno-kemijske postupke i mogućnost primjene na području na kojem je došlo do onečišćenja naftom. Bioremedijacija ne zahtjeva velike promjene prostora ni izgradnju posebnih postrojenja za pročišćavanje. Nafta se djelovanjem mješovite kulture mikroorganizama transformira u manje opasne produkte i na kraju u ugljikov dioksid i vodu. Određeni mikroorganizmi razgrađuju pojedine sastavne dijelove nafte, a budući da je cilj potpuno uklanjanje nafte iz okoliša, potrebno je sinergijsko djelovanje različitih mikroorganizama. To se događa na mjestu onečišćenja što znači da nema potrebe za premještanjem nafte u druge sustave. Mikroorganizmi mogu u potpunosti razgraditi naftu za razliku od nekih drugih fizikalno-kemijskih metoda. Isto tako, nije potrebno dodavati nove kemikalije u okoliš koje bi ga mogle dodatno onečistiti. Ipak, treba znati da je to vrlo složen proces čija učinkovitost ovisi o nizu faktora. Potrebno je dobro poznavati onečišćeno područje, karakteristike nafte i mikroorganizama koji imaju sposobnost razgrađivanja nafte kako ne bi nastala još veća šteta u okolišu. Osim toga, na konačan rezultat bioremedijacije utječu hranjive tvari, temperatura, pH vrijednost, vlažnost tla te kisik. Kontroliranjem svih potrebnih uvjeta, bioremedijacija se odvija brzo i učinkovito. Problem koji se često javlja je nedostatak hranjivih tvari, najčešće dušika i fosfora koji su bakterijama neophodni za rast i razvoj. Kako bi se taj problem riješio, potrebno je dodavati te nutrijente na onečišćeno područje. Zbog svega navedenog, bioremedijacija se iskazala kao jedna od najboljih metoda za uklanjanje nafte iz onečišćenih područja. Kako bi rezultati bili još bolji, potrebno je neprestano unaprjeđivati tu metodu i pronalaziti mikroorganizme koji imaju sposobnost u što većoj mjeri razgraditi naftu. Ako se tako nastavi, u budućnosti bi to mogla biti glavna metoda za uklanjanje svih onečišćujućih tvari koje određeni mikroorganizmi mogu razgraditi.

11. LITERATURA

- Alvarez JP, Illman AW, 2006. Bioremediation and Natural Attenuation: Process Fundamentals and Mathematical Models. John Wiley & Sons, New York.
- Balba MT, Al-Awadhi N, Al-Daher R, 1998. Bioremediation od oil-contaminated soil: microbiological methods for feasibility assessment and field evaluation. *Journal of Microbiological Methods*, **32**, 155-164.
- Bertović B, 2016. Bioremedijacija nafte onečišćene naftnim ugljikovodicima. *Goriva i maziva* **55**, 4, 295-305.
- Beškoski V, Gojgić-Cvijović G, Milić J, Ilić V, Miletić S, Jovančićević S, Vrvic M, 2012. Bioremedijacija zemljišta kontaminiranog naftom i naftnim derivatima: mikroorganizmi, putevi razgradnje, tehnologije. *Hemijska Industrija* **66** (2), 275-289.
- Bobić V, 2005. Onečišćenje tla naftnim ugljikovodicima – bioobnova: mogućnosti, učinkovitost, iskustva. *Goriva i maziva* **44**, 1, 9-34.
- Cerniglia C, Sutherland JB, 2001. Fungi in Bioremediation, Gadd GM, Ed., British Mycological Socitey, Cambridge University Press, Cambridge.
- Delić D, 2009. Nafta i plin. Seminarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb.
- Horakova DMV, Nemeč M, 2000. Remediation Engineering of Contaminated Soils, Wise DL, Trantolo DJ, Eichon EJ, Inyang HI, Stottmeister U, Eds., Marcel Dekker, New York.
- Kuhad RC, Gupta R, 2009. Advances in Applied Bioremediation, Singh A, Kuhad RC, Ward OP, Eds., Springer-Verlag, Berlin.
- Llado S, Solanas AM, Lapuente J, Borrás M, Vinas M, 2012. A diversified approach to evaluate biostimulation and bioaugmentation strategies for heavy-oil-contaminated soil. *Science of the Total Environment*, **435-436**, 262-269.
- Marić N, 2015. Prirodno prečišćavanje i stimulisana bioremedijacija podzemnih voda zagađenih naftnim ugljikovodonicima. Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.
- Menđušić V, 2012. Derivati nafte. Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Osijek.
- Raičević V, Lalević B, Dabić D, Kiković D, Jovanović Lj, Nikšić M, 2007. Mikroorganizmi u bioremedijaciji zemljišta i voda. *Zaštita materijala* **48** (2), 49-52.

- Silva-Castro GA, Uad I, Rodriguez-Calvo A, Gonzales-Lopez J, Calco C, 2015. Response of Authochthonus microbiota of diessel polluted soils to land-farming treatments. *Environmental Research* **137**, 49-58.
- Ugrinov D, Stojanov A, 2010. Bioremedijacija u tretmanu zagađenog zemljišta. *Zaštita materijala* **51** (6), 237-244.
- Venosa D, Zhu X, 2003. Biodegradation of Crude Oil Contaminating Marine Shorelines and Freshwater Wetlands. *Spill Science & Technology Bulletin* **8**, 163-178.
- Velić J, 2007. Geologija ležišta nafte i plina. Fakultetska skripta, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
- Vidali M, 2001. Bioremediation an Overview. *Journal of Applied Chemistry*, **73** (7), 1163-1172.
- <https://hr.thpanorama.com/articles/biologa/biorremediacin-caractersticas-tipos-ventajas-y-desventajas.html>
- https://www.google.com/search?rlz=1C1GGRV_enHR751HR751&biw=1366&bih=657&tbm=isch&sa=1&ei=eV44XfmVO8OWsAfysIXgDg&q=bioremediation+of+oil&oq=bioremediation+of+oil&gs_l=img.3..0i19.96062.99985..101744...0.0..0.122.739.1j6.....0...1..gws-wiz-img.....0i8i30i19.gZi3u8q_VBg&ved=0ahUKEwi5tuL81c3jAhVDC-wKHXJYAewQ4dUDCAY&uact=5#imgdii=V2WOj2wNmxQv8M:&imgrc=D7agVKNNoMcQ8TM:
- https://www.google.com/search?rlz=1C1GGRV_enHR751HR751&biw=1366&bih=608&tbm=isch&sa=1&ei=eV44XfmVO8OWsAfysIXgDg&q=bioremediation+of+oil&oq=bioremediation+of+oil&gs_l=img.3..0i19.7441.9447..10247...0.0..0.138.771.3j4.....0....1..gws-wiz-img.....0i8i30i19.YH8nM8cY0gE&ved=0ahUKEwi5tuL81c3jAhVDC-wKHXJYAewQ4dUDCAY&uact=5#imgrc=C6Ypm1A6vwLMBM:

12. SAŽETAK

Nafta je složena smjesa različitih spojeva među kojima su najzastupljeniji ugljikovodici. Ako na neki način dospije u okoliš te ga onečisti, to je područje potrebno sanirati. Bioremedijacija je postupak koji se koristi za uklanjanje štetnih tvari iz okoliša pomoću mikroorganizama. Djelovanjem različitih mikroorganizama koji imaju sposobnost razgradnje naftnih ugljikovodika, onečišćenje naftom može se smanjiti. Oni koriste naftne ugljikovodike za rast i razvoj te ih pretvaraju u manje štetne spojeve, koji se pri kraju procesa pretvaraju u ugljikov dioksid i vodu. S obzirom na to odvija li se taj postupak na samom mjestu onečišćenja ili se onečišćena voda ili tlo prenose u posebna postrojenja, postoje *in situ* i *ex situ* bioremedijacija. Kako bi postupak bio što uspješniji, potrebno je održavati optimalne uvjete. Ponekad je u onečišćeno područje potrebno dodati nutrijente, kisik ili određene mikroorganizme ako ih nema dovoljno ili ne mogu dovoljno učinkovito razgraditi onečišćujuću tvar. Metoda bioremedijacije sve se češće koristi pri sanaciji okoliša jer je učinkovita i ekonomski isplativa. Trenutno je jedna od najboljih metoda sanacije područja onečišćenih naftom te naftnim ugljikovodicima.

13. SUMMARY

Oil is a liquid derived from petroleum that consists of complex organic compounds, most of them being hydrocarbons. If it ends up in nature as a pollutant, it is necessary to try to restore the area to its' natural state. Bioremediation is a process in which microorganisms are used to degrade pollutants present in the contaminated area. Hydrocarbon-degrading microorganisms have the ability to transform petroleum hydrocarbons into less harmful compounds. At the end of the process, the hydrocarbons are biotransformed to carbon dioxide and water. Bioremediation can be carried out *in situ* or *ex situ* depending on if the contaminated medium will be recovered at the site of contamination or transferred to a facility. Optimal conditions are needed for this process to be effective. Sometimes it is necessary to add nutrients, oxygen or certain microorganisms to the affected area. Since it is effective and economically viable, bioremediation is being used more frequently in restoring polluted environments. Currently it is one of the best options for recovering areas polluted by oil and petroleum hydrocarbons.