

**Barbara Bertović**

ISSN 0350-350X

GOMABN 55, 4, 295-305

Stručni rad/Professional paper

## **BIOREMEDIJACIJA ZEMLJE ONEČIŠĆENE NAFTNIM UGLJIKOVODICIMA**

### **Sažetak**

*Tlo onečišćeno naftnim ugljikovodicima predstavlja rizik za ljudsko zdravlje i okoliš. Ovaj problem je unutar INA d.d. prepoznat kao jedan od značajnijih te su započeti postupci sanacija određenih lokacija. STSI d.o.o. kao član INA Grupe započeo je s razvojem djelatnosti gospodarenja otpadom i provođenjem remedijacijskih postupaka, u skladu s najboljim raspoloživim tehnikama. Metoda bioremedijacije danas je u svijetu prepoznata kao glavna metoda u sanaciji tla onečišćenih naftnim ugljikovodicima. Upotrebom mješovite kulture mikroorganizama, ugljikovodični spojevi koji onečišćuju tlo transformiraju se u manje opasne produkte, te konačno u vodu i ugljikov dioksid. Postupak se pospješuje održavanjem optimalnih uvjeta kao što je raspon temperature i pH-vrijednosti, postotak vlage, udio kisika i nutrijenata. Tako pročišćeno tlo više se ne smatra otpadom već se može ponovno koristiti za potrebe uređenja okoliša ili kao građevinski materijal.*

*Prednost pročišćavanja tla upotrebom prirodnih mikroorganizama (bez GMO) je u tome što nema unošenja novih kemikalija te nema potrebe za izgradnjom specijalnih postrojenja. Također, u usporedbi s ostalim metodama obrade, bioremedijacija je ekonomski isplativija. Sve ovo ubraja bioremedijaciju u tzv. zelene tehnologije jer odgovara konceptu održivog razvoja. Na temelju dosadašnjih iskustava u bioremedijaciji tla onečišćenog naftnim ugljikovodicima tvrtka STSI d.o.o. postigla je zadovoljavajuće rezultate jer je tlo pročišćeno do tog stupnja da se ponovno koristi u okolišu te nam je cilj daljnji razvoj i unapređenje ove metode.*

**Ključne riječi:** bioremedijacija; onečišćeno tlo; okoliš; naftni ugljikovodici; mikroorganizmi

# BIOREMEDIATION OF SOIL CONTAMINATED WITH PETROLEUM HYDROCARBONS

## Abstract

*Soil contaminated with petroleum hydrocarbons is a risk to human health and the environment and to deal with that risk, remediation activities are performed. STSI d.o.o., as a member of INA Group, started to develop waste management activity for the purposes of INA d.d., according to the best available techniques. Today, the method of bioremediation is recognized worldwide as the main method for remediation of soil contaminated with petroleum hydrocarbons. The aim of bioremediation method is using of mixed culture of microorganisms and transformation of hazardous polluting hydrocarbons in soil to less dangerous products, where the end result can be water and carbon-dioxide. The process is accelerated by maintaining optimum conditions such as temperature and pH range, moisture content, oxygen and nutrient concentration. Soil that has been cleaned up in that way can be reused in the environment. Some of the advantages of the use of natural microorganisms (GMO free) for soil clean-up mean there are no new chemicals being introduced into the environment and there is no need for construction of special plants. Also, when compared to other methods of treatment, this method is much more cost effective and efficient. All the above traits put bioremediation in the so-called green technology – technology of the future, because it corresponds to the concept of sustainable development. Based on the past experience in bioremediation of soil contaminated with petroleum hydrocarbons, STSI d.o.o. have achieved satisfactory results with soil clean-up to the level that can be reused in the environment and our goal is further development and improvement of this method.*

**Key words:** Bioremediation; contaminated soil; environment; petroleum hydrocarbons; microorganisms

## 1. Uvod

Ubrzani razvoj tehnologije i rast stanovništva svakodnevno povećavaju potrebu za energijom, a predviđanja su da će do 2040. godine korištenje energije porasti za 30 % [1]. Pariški sporazum koji je stupio na snagu u studenom 2016. godine ključni je sporazum koji će znatno utjecati na energetske sektor. Kako bi se poštovali uvjeti dogovoreni ovim sporazumom, potreban je zaokret na korištenje niskougljičnih izvora energije. Predviđaju se značajna ulaganja u obnovljive izvore te se smatra da će 2040. čak 60 % novonastale potrebe za energijom biti zadovoljeno iz ovih izvora. Zbog velikog utjecaja na okoliš korištenje ugljena bit će drastično smanjeno te će se umjesto njega za čak 50 % povećati upotreba prirodnog plina. Ipak, predviđanja pokazuju da će nafta i tada biti jedan od dominantnih izvora energije s potrošnjom od 103 mb/d [1].

Razvoj svijesti o utjecaju koji čovjek ima na okoliš doveo je do donošenja strogih zakonskih okvira koji pokušavaju štetne utjecaje svesti na minimum, a industrije uvode nove, čiste tehnologije i kreću u saniranje dugogodišnjih onečišćenja. Moderne naftne industrije, pa tako i INA d.d., također su uvidjele da brojne aktivnosti koje provode imaju negativan utjecaj na kvalitetu zraka, onečišćuju mora i oceane, ali i podzemne vode te tlo. Dugogodišnje aktivnosti crpljenja nafte iz podzemlja te njene prerade, skladištenja, transporta i korištenja, ali i iznenadne nezgode (npr. puknuća naftovoda) onečistile su brojne lokacije i akumulirale velike količine onečišćene zemlje. Koncentracija ugljikovodičnih spojeva u onečišćenom tlu prikazuje se kao koncentracija ukupnih naftnih ugljikovodika - TPH (*eng. Total Petroleum Hydrocarbons*) i uključuje hlapljive ugljikovodike ( $C_2 - C_5$ ) i ugljikovodike u rasponu od  $C_5$  do  $C_{40}$  [2,3]. Upravo povišena koncentracija TPH-a svrstava zemlju izloženu utjecaju nafte i naftnih produkata u opasni otpad te se mora tako tretirati. Neonečišćeni okoliš, pa tako i čisto tlo, predstavlja temelj za zdravlje ljudi i kvalitetu življenja. Kako bi se sanirala dugogodišnja onečišćenja te smanjio negativan utjecaj novonastalih onečišćenja, provode se brojni remedijacijski postupci.

## **2. Bioremedijacija zemlje onečišćene naftnim ugljikovodicima**

### **2.1. Opis procesa bioremedijacije**

Fizikalne, kemijske i toplinske metode često su upotrebljavane tehnologije za pročišćavanje naftom onečišćenih lokacija [3,4]. Ipak, ovi su se postupci pokazali skupi i vrlo često nedovoljno učinkoviti [5,6]. Zbog toga se javila potreba za primjenom jeftinijih i ekološki prihvatljivijih metoda te danas preko 25 % svih remedijacijskih postupaka otpada na biološke metode [7]. Tehnologije bioremedijacije razvijaju se od 1940., ali su postigle popularnost nakon poznatog izljeva nafte Exxon Valdez [8]. Ove metode su ekonomski isplativije te nema potrebe za izgradnjom posebnih postrojenja niti za uvođenjem novih kemikalija u okoliš, zbog čega se ubrajaju u tzv. „green technologies“ (zelene tehnologije). Bioremedijacija je proces koji koristi mikroorganizme u svrhu sanacije naftnih izljeva, pročišćavanja onečišćene zemlje te podzemnih i otpadnih voda [9]. Mikroorganizmi, koristeći ugljikovodične spojeve kao supstrat za rast i razvoj, transformiraju opasne spojeve u manje opasne produkte, sve do konačne degradacije do ugljikovog dioksida i vode [10,11]. U Tablici 1 dano je nekoliko do danas provedenih istraživanja uspješnosti bioremedijacije u pročišćavanju zemlje onečišćene naftnim ugljikovodicima. Rezultati pokazuju da je većina naftnih ugljikovodika u manjoj ili većoj mjeri podložna biodegradaciji te da je bioremedijacija učinkovita metoda za čišćenje nafte i naftnih produkata [4].

Nafta je složena smjesa više od 1000 različitih spojeva primarno izrađenih od ugljikovodika [3,7]. Energija koja je pohranjena u kemijskim vezama ugljikovodika oslobađa se gorenjem (fosilna goriva), ili pomoću preciznijih kemijskih reakcija živih organizama – enzimskih reakcija [10,12]. Enzimi potrebni za ove reakcije nalaze se u bakterijama te im omogućavaju da energiju pohranjenu u ovim vezama oslobode na mnogo nižim temperaturama te je iskoriste za rast i održavanje životnih potreba i

procesa [13]. Kroz milijune godina bakterije su razvile velik broj različitih enzimskih reakcija prikladnih za degradaciju širokog spektra ugljikovodika. Poznato je da su lakši ugljikovodici s jednostavnijom strukturom i manjom molekulskom masom podložniji biodegradaciji te ih samim time može transformirati veći broj različitih bakterija. Teže i kompleksnije ugljikovodične frakcije predstavljaju veći izazov za mikroorganizme. Enzimske reakcije potrebne za raspad ovih spojeva razvili su samo određeni bakterijski sojevi [14]. Stoga je za uspješnu bioremedijaciju onečišćene zemlje do ciljanih koncentracija i konačnu degradaciju naftnih ugljikovodika do vode i ugljikovog dioksida potrebno sinergijsko djelovanje zajednice različitih bakterijskih sojeva [15].

| Tip bioremedijacije              | Uspješnost pročišćavanja  | Trajanje procesa | Referencija                    |
|----------------------------------|---------------------------|------------------|--------------------------------|
| Bioaugmentacija i biostimulacija | 99 % niža koncentracija   | 18 mjeseci       | <i>Singh et al., 2012 (23)</i> |
| Bioaugmentacija                  | 79,7 % niža koncentracija | 60 dana          | <i>Silva et al., 2015 (16)</i> |
| Bioaugmentacija i biostimulacija | 80 % niža koncentracija   | 24 tjedna        | <i>Roy et al., 2014 (6)</i>    |
| Biostimulacija                   | 70 % niža koncentracija   | 3 mjeseca        | <i>Tumeo et al., 1994 (24)</i> |
| Bioaugmentacija                  | 64,4 % niža koncentracija | 40 dana          | <i>Shen et al., 2016 (25)</i>  |

Tablica 1: Primjeri bioremedijacije onečišćene zemlje [4]

## 2.2. Limitirajući faktori

Bioremedijacija je kompleksan proces čija učinkovitost ovisi o nizu faktora – postojanju potrebnih mikroorganizama, tipu, dostupnosti i koncentraciji onečišćenja, okolišnim uvjetima te karakteristikama onečišćene zemlje [7,10,16,17].

### 2.2.1. Karakteristike onečišćene zemlje

Struktura i tekstura zemljišta utječe na permeabilnost i sadržaj vlage u tlu [7]. Tla s većim udjelom manjih čestica (prah, glina) karakterizira manja permeabilnost, što otežava transport vlage, nutrijenata i kisika. Kako bi se povećao protok potrebnih supstancija, prilikom bioremedijacije tlu se mogu dodavati agensi kao što su slama i piljevina. Na brzinu i efikasnost biodegradacije utječe i udio gline i organske tvari u tlu, koji vrlo dobro vežu na sebe onečišćenje čineći ga slabije dostupnim bakterijama [16].

### 2.2.2. Karakteristike onečišćujućih parametara i potrebnih mikroorganizama

Nisu sva onečišćenja podložna biodegradaciji, ipak većina naftnih ugljikovodika je u većoj ili manjoj mjeri biorazgradljiva [2]. Ovisno o broju atoma i strukturi molekule, degradacija ugljikovodika odvija se različitim brzinama. Opće je prihvaćeno da se biodegradacija smanjuje duž niza n-alkani, razgranati alkani i alkeni, dok su najslabije biorazgradljivi policiklički aromatski ugljikovodici [7,10,12,14].

Osim o tipu onečišćenja, degradacija ovisi i o vrsti i broju mikroorganizama. Tlo koje se nalazi u prirodi sadrži velik broj različitih mikroorganizama, od kojih relativno mali broj ima sposobnost biodegradacije naftnih ugljikovodika [13,16,18]. Da bi bioremedijacija bila uspješna, potrebno je povećati broj mikroorganizama kontrolom i prilagodbom okolišnih uvjeta (biostimulacija) i/ili naciepljivanjem novih mikroorganizama (bioaugmentacija).

### 2.2.3. Biodostupnost onečišćujućih parametara

Karakteristike zemljišta (niska permeabilnost, visok udio gline i organske tvari) i slaba topljivost ugljikovodika, ponekad onečišćenje čine nedostupno bakterijama. Ugljikovodici u tlu vežu se na čestice zemlje, a upotreba surfaktanata, tvari koje smanjuju površinsku napetost vode i povećavaju topljivost tvari, potpomažu desorpciju onečišćenja i povećavaju njihovu dostupnost bakterijama [7,16]. Biodostupnost se, dakle, može povećati dodavanjem komercijalnih surfaktanata u onečišćeno tlo, ali i primjenom sojeva bakterija koji uz sposobnost degradacije ugljikovodika kao produkt stvaraju i surfaktante [18].

### 2.2.4. Okolišni uvjeti

Za efikasnost bioremedijacije, uz do sada navedeno, vrlo je bitan monitoring i stimulacija uvjeta u kojima se odvija bioremedijacija. Iako pojedini mikroorganizmi preživljavaju u ekstremnim uvjetima, za rast i razvoj većine sojeva bakterija potrebno je odražavati okolišne uvjete unutar točno određenih granica (tablica 2) [16,17]. Nedovoljna vlažnost ograničava rast bakterija, a ukoliko se udio vlage smanji ispod 10 %, bakterije ugibaju. Prevelika vlažnost smanjuje aeraciju tla [17].

| 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                          |

Tablica 2: Okolišni uvjeti potrebni za biodegradaciju naftnih ugljikovodika (17)

Biodegradacija naftnih ugljikovodika najbrže se odvija u aerobnim uvjetima. Kisik je jedan od ključnih elemenata za razgradnju stoga ga treba kontinuirano nadoknađivati. U tlima s većim udjelom onečišćenja, koncentracija kisika će se mnogo brže smanjivati što u konačnici može dovesti do anaerobnih uvjeta [2]. Za većinu bakterija optimalan je neutralan pH. Za rast stanice, bakterije uz ugljik i energiju trebaju i nutrijente - dušik i fosfor. Dodatkom ovih supstancija, u onečišćenom tlu se uspostavlja prirodni omjeri ovih elemenata u biomasi, što dovodi do povećanog rasta mikroorganizama [7,16]. Iako su danas izdvojeni sojevi koju mogu biodegradirati onečišćenje na temperaturnim ekstremima, za većinu sojeva su optimalni uvjeti između 15-45 °C [17].

### 2.3. Klasifikacija tehnologija bioremedijacije

Izbor točno određene tehnologije i strategije bioremedijacije ovisi o nizu faktora - vrsti i koncentraciji onečišćenja, karakteristikama onečišćene zemlje i lokacije koja se sanira, zakonskoj regulativi i ciljanim vrijednostima onečišćenja te o raspoloživim financijskim sredstvima [7,9,13].

#### 2.3.1. *In situ* i *ex situ* bioremedijacija

Ovisno o tome obrađuje li se onečišćena zemlja na mjestu nastanka onečišćenja ili prije početka obrade vrši iskop, prva temeljena podjela bioremedijacije je na *in situ* i *ex situ* tehnologije [9]. *In situ* tehnologije bioremedijacije omogućavaju obradu onečišćene zemlje na mjestu nastanka onečišćenja pri čemu se smanjuju ukupni troškovi iskopa i transporta onečišćene zemlje. Nedostaci ovih tehnologija su ograničenost dubine zemljišta do koje je bioremedijacija efikasna te slabija kontrola i prilagodba uvjeta provedbe bioremedijacije. Također, potrebno je onemogućiti ispiranje onečišćujućih tvari u podzemne vode i druge sustave [7,9]. Zajedničko svim *ex situ* tehnologijama je proces uklanjanja onečišćenog materijala (iskop) s mjesta onečišćenja. Obrada onečišćene zemlje može se obaviti na istoj lokaciji korištenjem vodonepropusnih folija, ili se zemlja može transportirati u postrojenje za obradu otpada, što povećava ukupne troškove obrade. Najveće prednosti *ex situ* metoda su dobar monitoring uvjeta i napretka bioremedijacije, te nemogućnost procjeđivanja otpadnih voda [9].

#### 2.3.2. Biostimulacija i bioaugmentacija

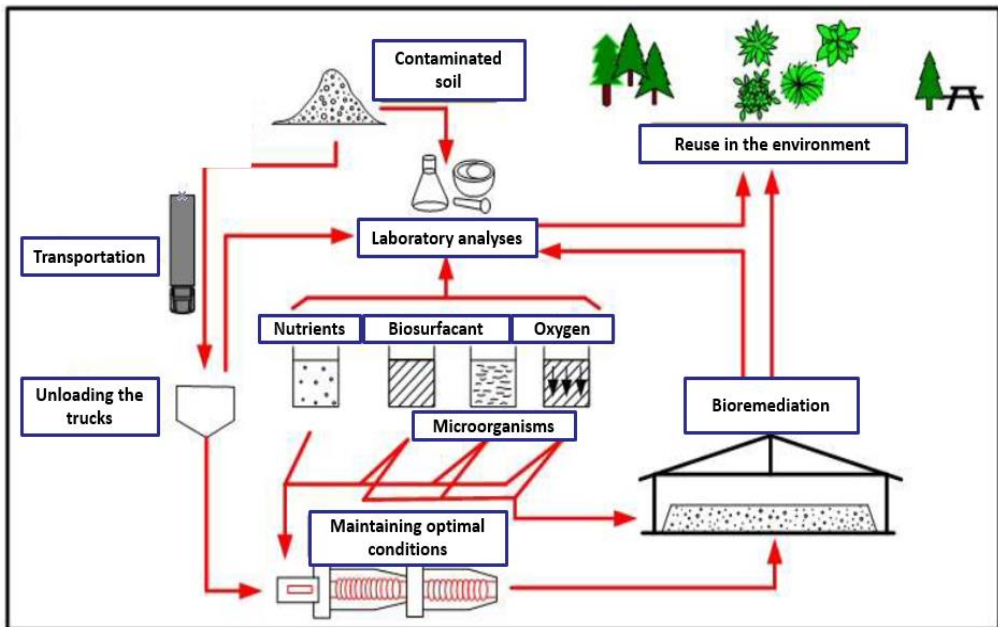
Biodegradacija naftnih ugljikovodika u okolišu dugotrajan je proces koji se odvija djelovanjem bakterija prirodno prisutnih u tlu [10]. Kako bi se proces remedijacije ubrzao u praksi se koristi tzv. kontrolirana bioremedijacija (eng. engineered bioremediation) koja kontrolom i prilagodbom okolišnih uvjeta te nacrpljivanjem odgovarajućih mikroorganizama značajno povećava efikasnost procesa. Postizanje idealnih uvjeta za rast i razvoj mikroorganizama (tablica 2) naziva se biostimulacija. Istraživanja su pokazala da postupci rahljenja i aeracije tla, vlaženja tla te dodavanja nutrijenata i surfaktanata značajno povećavaju efikasnost bioremedijacije [2,4,13,16]. Kada onečišćeno tlo ne sadrži odgovarajuću količinu bakterija koje mogu učinkovito razgraditi onečišćenje, obavlja se bioaugmentacija. Bioaugmentacija je proces dodavanja mikroorganizama koji sadrže potrebne enzime za degradaciju nafte i naftnih produkata [4,19,20,21]. Aplikirati se mogu komercijalni preparati mikroorganizama, ili autohtoni sojevi izolirani iz onečišćene zemlje. Kombinacija biostimulacije i bioaugmentacije je najučinkovitiji postupak za degradaciju naftnih ugljikovodika [2,4,6,18].

### 3. Bioremedijacija zemlje onečišćene naftnim ugljikovodicima na lokaciji Moslavačka Gračenica

Tvrtka STSI d.o.o. je sukladno Zakonu o održivom gospodarenju otpadom (NN 93/13) za lokaciju Moslavačka Gračenica ishodila dozvolu za gospodarenje opasnim otpadom. Dozvola, između ostalog, obuhvaća i obradu otpada metodom bioremedijacije, a maksimalna količina onečišćene zemlje koja se sukladno dozvoli može obraditi unutar jedne godine iznosi 1.800,0 tona [22].

### 3.1. Opis postupka bioremedijacije na lokaciji Moslavačka Gračenica

Na lokaciji se primjenjuje *ex situ*, "landfarming" metoda bioremedijacije te se koristi kombinirani postupak biostimulacije i bioaugmentacije (slika 1). Landfarming metoda (metoda vrtnih gredica) je *ex situ* metoda koju karakterizira formiranje gredica s onečišćenom zemljom, s ciljem lakše kontrole i prilagodbe uvjeta bioremedijacije [9, 16]. Nakon iskopa i transporta do Moslavačke Gračenice, onečišćeno se tlo istovaruje na za to pripremljene površine koje sukladno Zakonu o održivom gospodarenju otpadom (NN 93/13) moraju biti vodonepropusne i natkrivene. Nakon toga formiraju se "gredice" (sloj) zemlje do 0,8 m visine te ovlaštenu laboratorij uzima uzorke tla kako bi se odredilo nulto (početno) onečišćenje.



Slika 1: Shema procesa bioremedijacije na lokaciji Moslavačka Gračenica [22]

Za provedbu postupka bioremedijacije, na lokaciji se koriste dva komercijalna preparata. Prvi preparat se sastoji od miješane kulture prirodnih mikroorganizama i enzima (bez GMO) te od nutrijenata potrebnih za rast i razvoj bakterija. Drugi preparat je biosurfaktant koji povećava biodostupnost onečišćenja bakterijama. Sukladno početnoj koncentraciji onečišćenja i recepturi proizvođača, ova dva preparata se miješaju s vodom, te se nakon aktivacije apliciraju na onečišćenu zemlju. Kako bi se pripremljena otopina što je moguće ravnomjernije rasporedila, onečišćena zemlja se vlaži i miješa građevinskim strojevima. S ciljem osiguravanja što idealnijih uvjeta za bioremedijaciju (tablica 2), prema informacijama iz literature [2,6,16], rahljenje zemlje radi dovođenja kisika te vlaženje zemlje potrebno je ponavljati svakih 7 dana.

Nakon 30 dana ponavlja se analiza tla na TPH kako bi se utvrdio stupanj degradacije. Također, nakon 30 dana radi se nova aplikacija komercijalnih preparata s ciljem što brže i efikasnije bioremedijacije [18]. Cjelokupni postupak se ponavlja sve dok se ne dosegnu ciljane vrijednosti kod kojih se zemlja više ne kategorizira kao otpad. Nakon što završi postupak bioremedijacije te se laboratorijskom analizom ovlaštenog laboratorija utvrdi da su koncentracije ugljikovodika smanjenje do potrebnih vrijednosti, zemlja se može ponovno koristiti u okolišu.

### 3.2. Rezultati bioremedijacije onečišćene zemlje s BP Petrinja

Prilikom rekonstrukcije benzinske postaje (BP) Petrinja, iskopano je 1284,8 tona zemlje onečišćene naftnim ugljikovodicima. Nakon prihvata i raspoređivanja zemlje na predviđene površine ispod nadstrešnice, napravljena je laboratorijska analiza kojom su utvrđene sljedeće početne koncentracije onečišćujućih tvari - mineralna ulja (TPH) 1694,6 mg/kg s.t., BTEX 0,698 mg/kg s.t., PAH-ovi 0,0655 mg/kg s.t. (Tablica 3, Slika 2).

| Analizirani parametri | Početno onečišćenje | Nakon 30 dana | Nakon 60 dana | Nakon 90 dana | Nakon 120 dana |
|-----------------------|---------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| pH                    | 7,4                 | 8,1           | 7,1           | 7,2           | 7,4            |
| TPH <sup>1</sup>      | 1.694,6             | 977,4         | 496,0         | 172,4         | 75,5           |
| BTEX <sup>2</sup>     | 0,698               | < 0,1         | < 0,1         | < 0,1         | < 0,1          |
| PAH <sup>3</sup>      | 0,0655              | < 0,001       | < 0,001       | < 0,001       | < 0,001        |

<sup>1</sup> Total Petroleum Hydrocarbons (mg/kg s.t.)

<sup>2</sup> Benzen, toluen, etilbenzen, ksilen (mg/kg s.t.)

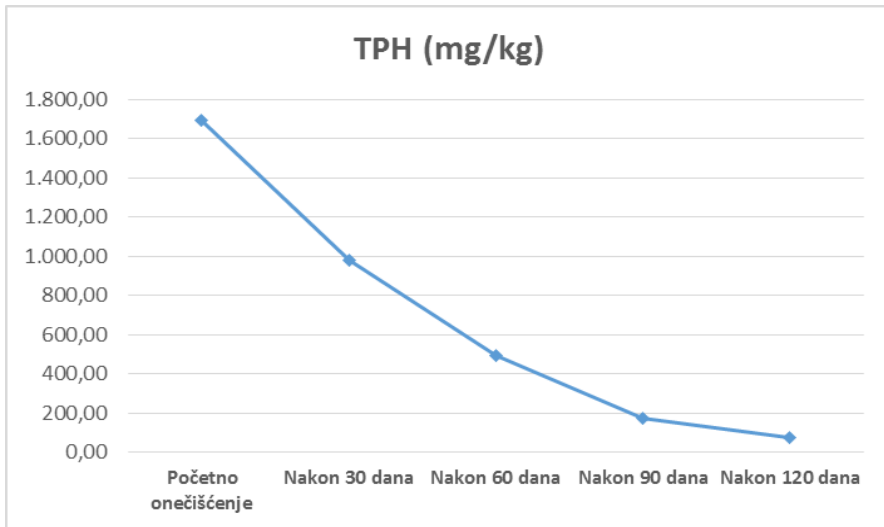
<sup>3</sup> Policiklički aromatski ugljikovodici (mg/kg s.t.)

Tablica 3: Koncentracija onečišćujućih parametara tijekom procesa

Sukladno koncentracijama aplicirani su komercijalni preparati te se na tjednoj bazi provodilo vlaženje i rahljenje (aeracija) tla. Svakih 30 dana pratio se napredak bioremedijacije (tablica 3, slika 2) te je ponovljena aplikacija mikroorganizama i surfaktanta. Nakon mjesec dana zabilježeno je smanjenje BTEX-a i PAH-ova ispod granice detekcije, dok se koncentracija mineralnih ulja smanjila za oko 40 %. Nakon 60 dana bioremedijacije tlo je pročišćeno za oko 70 %, a nakon 90 dana za oko 90 %. Ciljane koncentracije su postignute nakon 120 dana kada je izmjereno 75,5 mg/kg s.t. mineralnih ulja te je bioremedijacija prekinuta.

Ovako pročišćena zemlja nije odložena na odlagalište već je iskorištena kao građevinski materijal u uređenju okoliša. Tvrtka STSI d.o.o. postigla je uspješne rezultate u bioremedijaciji onečišćene zemlje te u budućnosti planira dodatno proširenje kapaciteta obrade te nabavu opreme za monitoring uvjeta odvijanja procesa.





Slika 2: Promjena koncentracija onečišćujućih parametara tijekom procesa

#### 4. Zaključak

Onečišćenje tla naftom i naftnim produktima velik je ekološki problem prisutan na globalnoj razini. INA d.d. svjesna je ovog problema te je, vodeći se načelima održivog razvoja, donijela odluku o implementaciji najmodernijih remedijacijskih metoda. Danas je među brojnim remedijacijskim tehnologijama bioremedijacija prepoznata kao jedan od efikasnijih i ekonomski isplativijih postupaka, stoga je upravo ova metoda implementirana unutar tvrtke STSI d.o.o. kao postupak obrade zemlje onečišćene naftnim ugljikovodicima. Bioremedijacija se temelji na enzimskim reakcijama mikroorganizama koji ugljikovodične spojeve koriste kao energiju za rast i razvoj, a konačni produkti ovih reakcija su voda i ugljični dioksid. Na lokaciji Moslavačka Gračenica uspješno je primijenjena ova metoda te je oko 1300 tona opasnog otpada (onečišćene zemlje) pročišćeno do stupnja kada se više ne smatra otpadom, te se može ponovno iskoristiti u okolišu kao materijal. Implementacijom bioremedijacije više nema potrebe za transportom velikih količina opasnog otpada na spaljivanje. Ova metoda ne zahtijeva velike intervencije u prostoru i izgradnju posebnih postrojenja. Za pročišćavanje nije potreban unos novih kemikalija u okoliš te ne nastaju nove emisije, čime se ne opterećuju ostale sastavnice okoliša. Nakon završenog procesa nema povećanja volumena otpada kao kod nekih drugih metoda obrade (solidifikacija/stabilizacija). Ovako pročišćeni materijal može se ponovno iskoristiti, što zbog velikih količina ovoga otpada značajno smanjuje opterećenje na odlagališta otpada.

Također, u usporedbi s drugim metodama obrade, bioremedijacija je ekonomski isplativija. Sve ovo svrstava bioremedijaciju u tzv. "green technologies" - tehnologije budućnosti - jer u potpunosti odgovara načelima održivog razvoja.

**Literatura**

- (1) *World Energy Outlook 2016 Executive Summary*, International Energy Agency, Paris, 2016
- (2) Wang S.Y., Kuo Y.C., Hong A., Chang Y.M., Kao C.M., *Chemosphere*, **164**, 558-567, 2016
- (3) *Oil in the Soil*, Netherlands Centre for Soil Quality Management and Knowledge Transfer, Gouda, 2010
- (4) Lim M.W., Lau E.V., Poh P.E., *Marine Pollution Bulletin*, **109**, 14-45, 2016
- (5) Lundstedt S., Haglund P., Oberg L., *Environmental Toxicology and Chemistry*, **22**, 1413-1420, 2003
- (6) Roy A.S., Baruah R., Borah M., Singh A.K., Boruah H. P. D., Saikia N., Deka M., Dutta N., *International Biodeterioration & Biodegradation*, **94**, 79-89, 2014
- (7) Beškoski V.P., Gojgić – Cvijović G.Đ., Milić J.S., Ilić M.V., Miletić S.B., Jovančičević B.S., Vrvic M.M., *Hemijska Industrija*, **66 (2)**, 275-289, 2012
- (8) Bragg J.R., Prince R.C., Harner E.J., Atlas R.M., *Nature*, **368**, 413-418, 1994
- (9) *In Situ and Ex Situ Biodegradation Technologies for Remediation of Contaminated Sites*, Environmental Protection Agency, Engineering Issue Series, 2006
- (10) S. Maletić, B. Dalmacija, Rončević S., InTech, DOI:10.5772/50108, 2013
- (11) Das N., Chandran P., *Biotechnology Research International*, DOI:10.4061/2011/941810, 2011
- (12) *Microbes & Oil Spills FAQ*, American Academy of Microbiology, Washington DC, 2011
- (13) Bento F.M., Camargo F.A.O., Okeke B.C., Frankenberger W.T., *Bioresource Technology*, **96**, 1049-1055, 2004
- (14) Llado S., Solanas A.M., Lapuente J., Borrás M., Vinas M., *Science of the Total Environment*, **435-436**, 262-269, 2012
- (15) Mishra S., Jyot J., Kuhad R.C., Lal B., *Current Microbiology*, **43**, 328-335, 2001
- (16) Silva-Castro G.A., Uad I., Rodriguez-Calvo A., Gonzalez-Lopez J., Calco C., *Environmental Research*, **137**, 49-58, 2015
- (17) Vidali M., *Journal of Applied Chemistry*, **73 (7)**, 1163-1172, 2001
- (18) Lebowska M., Zborowska E., Karwowska E., Miaskiewicz – Peska E., Muszynski A., Tabernacka A., Naumczyk J., Jeczalik M., *Ecological Engineering*, **37**, 1895-1900, 2011
- (19) Boopathy R., *Bioresource Technology*, **74**, 63-67, 2000
- (20) Szulc A., Ambrozewicz D., Sydow M., Lawniczak L., Piotrowska-Cyplik A., Marecik R., Chrzanowski L., *Journal of Environmental Management*, **132**, 121-128, 2014
- (21) Thompson I.P., Van Der Gast C.J., Ciric L., Singer A.C., *Environmental Microbiology*, **7**, 909-915, 2005
- (22) *Elaborat gospodarenja otpadom tvrtke STSI d.o.o.*, IPZ UNIPROJEKT TERRA, Zagreb, 2014

- (23) Singh B., Bhattacharya A., Channashettar V.A., Jeyaseelan C.P., Gupta S., Sarma P.M., Mandal A.K., Lal B., *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **89**, 257-262, 2012
- (24) Tumeo M., Braddock J., Venator T., Rog S., Owens D., *Spill Science & Technology Bulletin*, **1**, 53-59, 1994
- (25) Shen W., Zhu N., Cui J., Wang H., Dang Z., Wu P., Luo Y., Shi C., *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **124**, 120-128, 2016

**Autor**

Barbara Bertović  
STSI d.o.o., Zagreb, Hrvatska  
Barbara.Bertovic@stsi.hr

**Primljeno**

30.12.2016.

**Prihvaćeno**

15.2.2017.