

Bidang Unggulan: 2  
Topik Unggulan: 2  
Kelompok Riset: 2

SDG's: 12, 14 dan 15

**LAPORAN AKHIR PENELITIAN  
UNIVERSITAS BAKRIE  
TAHUN 2023**

**Elektrokinetik Remediasi Pada Tanah Tercemar  
Hidrokarbon Minyak Bumi**

**Teknik Lingkungan**

**SANDRA MADONNA (0318097402)**



**Universitas Bakrie  
Kampus Kuningan Kawasan Epicentrum  
Jl. HR Rasuna Said Kav. C-22, Jakarta, 12920**

**LEMBAR PENGESAHAN LAPORAN AKHIR PENELITIAN  
TAHUN 2023**

1. Judul Penelitian : Elektrokinetik Remediasi Pada Tanah Tercemar Hidrokarbon Minyak Bumi
2. Bidang Penelitian : Teknik Lingkungan
3. Peneliti Utama
  - a. Nama Lengkap : Sandra Madonna
  - b. Jenis Kelamin : Perempuan
  - c. Pangkat/Golongan/NIRD : Lector/ 0318097402
  - d. Bidang Keahlian : Teknik Lingkungan
  - e. Program Studi : Teknik Lingkungan
4. Lama Penelitian : 1 semester
5. Usulan Penelitian tahun : 2023
6. Total Biaya : Rp 10.000.000,00
5. Luaran Penelitian : Proceeding The 7th Environmental Technology and Management Conference (ETMC) 2023, dengan judul : "Bioavailability enhancement of petroleum contaminated soil by electrokinetic remediation.
6. Integrasi dalam Pembelajaran : Mata Kuliah Mikrobiologi Lingkungan dan Bioteknologi Lingkungan dalam bentuk bahan ajar slide perkuliahan

Jakarta, 29 November 2024

Menyetujui,  
**Ketua Lembaga Penelitian dan  
Pengembangan**

(Deffi Ayu Puspito Sari, Ph.D)  
0308078203

**Peneliti Utama**



**Sandra Madonna**  
0318097402

# **Elektrokinetik Remediasi Pada Tanah Tercemar Hidrokarbon Minyak Bumi**

## **ABSTRAK**

Elektrokinetik remediasi (EKR) merupakan teknologi remediasi tanah yang sangat potensial untuk tanah dengan permeabilitas rendah. Pengaliran arus listrik pada tanah terkontaminasi dapat meningkatkan bioavailabilitas kontaminan dalam bioremediasi tanah yang terkontaminasi minyak bumi. Penelitian, "Elektrokinetik Remediasi Pada Tanah Tercemar Hidrokarbon Minyak Bumi," adalah penelitian eksperimental di laboratorium untuk meningkatkan bioavailabilitas hidrokarbon minyak bumi pada tanah liat. Teknik remediasi dimulai dengan perlakuan awal menggunakan teknik elektrokinetik remediasi, konsentrasi Total Petroleum Hydrocarbon (TPH) ditentukan dengan metode gravimetrik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik sampel tanah didominasi oleh 49,31% tanah liat. Konsentrasi awal TPH pada tanah tercemar sebesar 3,7%. Pengaliran arus listrik selama 48 jam dan diikuti oleh bioremediasi selama 35 hari telah meningkatkan efisiensi penyisihan TPH hingga 80,74% (dari 33780,66 mg HC (kg berat kering)<sup>-1</sup> menjadi 6506,155176 mg HC (kg berat kering)<sup>-1</sup>). Telah terjadi peningkatan bioavailabilitas yang ditunjukkan oleh kenaikan populasi bakteri dan peningkatan biodegradasi setelah proses elektrokinetik. Dengan pendekatan ini, bioavailabilitas telah meningkat sebesar 70,18%. Metoda Bio-elektrokinetik remediasi direkomendasikan sebagai metoda yang relevan untuk tanah tercemar bersifat *clay* / tanah lempung dengan bioavailabilitas yang rendah.

*Kata kunci: Bioremediasi, Bioavailabilitas, Elektrokinetik remediasi, Remediasi tanah, Tanah clay*

# DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN LAPORAN AKHIR PENELITIAN.....	II
ABSTRAK .....	III
DAFTAR ISI .....	IV
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1    LATAR BELAKANG .....	1
1.2    IDENTIFIKASI DAN RUMUSAN PERMASALAHAN .....	3
1.3    HIPOTESIS PENELITIAN .....	3
1.4    TUJUAN PENELITIAN.....	3
1.5    RUANG LINGKUP DAN PEMBATAAN MASALAH.....	3
1.6    MANFAAT PENELITIAN .....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	4
2.1. KARAKTERISTIK MINYAK MENTAH/ <i>CRUDE OIL</i> .....	4
2.2. HIDROKARBON ALIFATIK.....	5
2.3 HIDROKARBON AROMATIK.....	5
2.4. RESIN .....	5
2.5. ASPAL.....	5
2.6 <i>Elektrokinetik Remediasi</i> .....	6
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	9
3.1. SAMPLING TANAH .....	9
3.2. <i>Pembuatan Reaktor</i> .....	10
3.3. EKSTRAKSI SAMPEL TANAH .....	10
3.4. ANALISIS KUANTITATIF DAN KUALITATIF .....	11
3.5. PROSES ELEKTROKINETIK REMEDIASI.....	11
3.6. ANALISIS DATA .....	12
BAB IV .....	13
HASIL DAN PEMBAHASAN .....	13
4.1. PENYISIHAN TOTAL PETROLEUM HYDROCARBON (TPH) .....	13
4.2. JUMLAH POPULASI BAKTERI .....	15
4.3. LUARAN PENELITIAN DAN INTEGRASI PENELITIAN DALAM KEGIATAN PEMBELAJARAN .....	17
BAB V .....	18
KESIMPULAN .....	18
DAFTAR PUSTAKA .....	19

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Pencemaran tanah yang disebabkan oleh hidrokarbon minyak bumi telah menarik minat peneliti dalam beberapa tahun terakhir. Proses biologi, fisika dan kimia dapat digunakan untuk meremediasi lingkungan dari pencemaran hidrokarbon minyak bumi. Remediasi lingkungan yang terkontaminasi oleh hidrokarbon minyak bumi dapat melibatkan beberapa metode yang dapat dilakukan di lokasi tercemar (*in situ*) atau di luar lokasi tercemar (*ex situ*) baik secara biologis, kimia, fisika-kimia, termal, listrik, elektromagnetik, akustik dan ultrasonik. Pemilihan metode remediasi yang tepat dan efektif untuk digunakan di lokasi tercemar, maka sangat penting pemahaman sifat, komposisi polutan, sumber polusi, karakteristik lingkungan tercemar, *fate*, transportasi dan distribusi polutan, mekanisme degradasi, interaksi polutan dengan mikroorganisme, faktor intrinsik dan ekstrinsik yang mempengaruhi remediasi. Lebih dari satu metode remediasi memungkinkan untuk digabungkan ke dalam rangkaian proses remediasi agar lebih efektif dalam menghilangkan atau mendegradasi bahan berbahaya beracun pada lingkungan yang tercemar (Ossai dkk., 2020).

Kontaminan hidrokarbon minyak bumi bersifat hidrofobik, recalcitrant dan persisten, sehingga sangat sulit diuraikan oleh lingkungan. Pada tanah yang terkontaminasi hidrokarbon minyak bumi sering terjadi mekanisme penyerapan kontaminan oleh tanaman di lokasi pencemaran, yang selanjutnya kontaminan tersebut akan masuk menuju populasi hewan dan manusia melalui rantai makanan (Patowary dkk., 2018). Tumpahan minyak di tanah dapat mempengaruhi seluruh ekosistem, mengubah vegetasi, satwa liar, aktifitas mikroba, karakteristik tanah dan kesuburan tanah. Mengingat dampak yang sangat berbahaya dari pencemaran kontaminan hidrokarbon minyak bumi tersebut, maka perlu segera dilakukan upaya pengurangan konsentrasinya di lingkungan (Polyak, 2018; Patowary dkk., 2018).

Kontaminan hidrokarbon minyak bumi yang tertahan di dalam tanah dalam jangka waktu yang lama akan mengalami proses *weathering* / pelapukan, sebagian darinya akan hilang melalui mekanisme fotolitik, penguapan, hidrolisis dan biotransformasi. Kontaminan

residu tersebut cenderung tahan terhadap degradasi lebih lanjut dan berkurang bioavailabilitasnya (Saini dkk., 2020). Hasil akhir yang diharapkan dari biodegradasi hidrokarbon minyak bumi adalah terjadinya mineralisasi, merombaknya menjadi karbon dioksida dan air, meskipun membutuhkan waktu yang lama, oleh karena itu untuk mempercepat waktu remediasi dan meningkatkan efisiensi remediasi dapat menggunakan kombinasi teknologi remediasi menggunakan mikroba dan teknologi lainnya seperti teknologi remediasi elektrokinetik, teknologi remediasi fotokatalitik, nanoteknologi dan teknologi bioreaktor yang merupakan strategi efektif untuk mempercepat remediasi hidrokarbon minyak bumi (Xu dkk., 2018).

Pemanfaatan teknologi elektrokinetik secara tersendiri atau dengan kombinasi teknologi lain dalam remediasi telah menarik perhatian para peneliti pada beberapa tahun terakhir, khususnya untuk meremediasi tanah yang terkontaminasi senyawa organik dan logam berat, karena aplikasinya yang spesifik untuk dioperasikan dalam matriks yang halus dan permeabilitas rendah (Cabral dkk., 2022).

Teknik elektrokinetik remediasi diduga dapat menyederhanakan rantai hidrokarbon pada minyak bumi. Teknologi elektrokinetik remediasi telah terbukti dapat meremediasi lingkungan yang terkontaminasi senyawa organik atau senyawa anorganik, terutama pada polutan yang berada di bawah permukaan dengan permeabilitas rendah (Gidudu dan Chirwa, 2020b).

Pada penelitian ini akan dilakukan remediasi tanah yang tercemar hidrokarbon minyak bumi menggunakan teknik elektrokinetik remediasi pada skala laboratorium. Dari hasil remediasi secara elektrokinetik ini diharapkan dapat meningkatkan bioavailabilitas polutan dan dapat diusulkan menjadi teknologi remediasi yang tepat untuk digabungkan dengan teknik bioremediasi dalam mengatasi pencemaran tanah akibat tumpahan atau cecceran minyak bumi di Indonesia.

## **1.2 Identifikasi dan Rumusan Permasalahan**

Bagaimana proses elektrokinetik dapat berperan sebagai perlakuan awal sebelum proses bioremediasi dalam meningkatkan bioavailabilitas polutan pada tanah terkontaminasi minyak bumi.

## **1.3 Hipotesis Penelitian**

Remediasi tanah yang tercemar hidrokarbon minyak bumi yang sulit terurai / *weathered hydrocarbons* dapat ditingkatkan dengan meningkatkan bioavailabilitas polutan melalui teknik elektrokinetik remediasi.

## **1.4 Tujuan Penelitian**

Penelitian ini bertujuan meremediasi tanah terkontaminasi minyak bumi secara fisika dengan teknik elektrokinetik remediasi, mempelajari mekanisme elektrokinetik remediasi yang akan mempengaruhi peningkatan bioavailabilitas polutan dan mempelajari mekanisme migrasi senyawa polutan dari tanah tercemar selama proses elektrokinetik remediasi serta menemukan kondisi optimum reaktor elektrokinetik remediasi.

## **1.5 Ruang Lingkup dan Pembatasan Masalah**

Penelitian ini akan dilakukan pada skala laboratorium menggunakan reaktor atau box-test yang akan digunakan dalam proses remediasi. Reaktor ini terbuat dari kaca akrilik yang terdiri dari tiga kompartemen yaitu: satu kompartemen berukuran 17 cm × 10 cm × 12 cm yang akan diisi tanah terkontaminasi, dan dua kompartemen berukuran 6 cm × 10 cm × 12 cm yang masing-masingnya digunakan sebagai tempat elektroda dan diisi dengan larutan elektrolit. Elektroda yang digunakan berupa carbon akan digunakan dengan ukuran 10 cm x 8 cm.

## **1.6 Manfaat Penelitian**

Memberikan kontribusi keilmuan mengenai remediasi senyawa hidrokarbon minyak bumi pada tanah yang tercemar di yang ke depannya dapat menjadi dasar penentuan teknologi pengolahan yang sesuai untuk dapat digabungkan dengan teknik bioremediasi

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Karakteristik Minyak Mentah/*Crude Oil*

Polutan hidrokarbon minyak bumi merupakan senyawa rekalsitran dan tergolong polutan prioritas yang bersifat persisten di alam karena reaktivitasnya yang rendah. Polutan organik persisten (POPs) ini menimbulkan ancaman serius bagi kesehatan manusia dan lingkungan (Varjani, 2017) Minyak bumi adalah kelas senyawa antropogenik yang terdiri dari senyawa alkana, hidrokarbon aromatik, resin, asphaltenes dan bahan organik lainnya (Zhang dkk., 2020). Penyusun utama hidrokarbon minyak bumi terdiri dari berbagai proporsi karbon dan hidrogen, dan mengandung senyawa non hidrokarbon minyak bumi seperti nitrogen, belerang dan oksigen dalam jumlah tertentu (Varjani dkk., 2017). Minyak mentah dapat diklasifikasikan sebagai minyak ringan, sedang atau berat berdasarkan proporsi relatif dari konstituen berat molekul yang ada di dalamnya (Varjani, 2017). Komposisi minyak mentah dapat bervariasi dengan lokasi dan usia ladang minyak serta kedalaman sumur minyak. Sekitar 85% komponen dari semua jenis minyak mentah dapat diklasifikasikan sebagai (a) berbahan dasar aspal, (b) berbahan dasar parafin dan/atau (c) campuran (Varjani, 2017).

Minyak mentah dikategorikan dalam empat fraksi; (a) Saturat (alifatik), (b) Aromatik (hidrokarbon bercincin), (c) Resin dan (d) Asphaltene. Saturat didefinisikan sebagai hidrokarbon tanpa ikatan rangkap dan mewakili persentase tertinggi dari konstituen minyak mentah dan dikategorikan menurut struktur kimianya menjadi alkana (parafin) dan sikloalkana. Hidrokarbon aromatik memiliki satu atau beberapa cincin aromatik yang biasanya tersubstitusi dengan gugus alkil yang berbeda. Dibandingkan dengan fraksi jenuh dan aromatik, resin dan asphaltenes mengandung senyawa polar non-hidrokarbon. Resin dan asphaltenes memiliki struktur karbon yang sangat kompleks dan sebagian besar tidak diketahui dengan penambahan banyak atom nitrogen, sulfur dan oksigen. Setiap komponen memiliki perilaku kimia unik yang mempengaruhi biodegradabilitasnya. Struktur empat komponen utama hidrokarbon minyak mentah tersebut dimulai dengan lapisan terluar adalah senyawa alifatik, sedangkan asphaltenes sebagai komponen massa molar yang lebih besar merupakan bagian terdalam dari minyak bumi (Varjani dkk., 2017).

## **2.2. Hidrokarbon Alifatik**

Hidrokarbon alifatik adalah struktur rantai terbuka jenuh atau tidak jenuh dengan rantai lurus atau bercabang seperti n-alkana, iso-alkana, siklo-alkana (naftena), terpen dan steran. n-Alkana dibagi menjadi empat kelompok berdasarkan berat molekul: (a) alkana berbentuk gas, (b) hidrokarbon alifatik dengan berat molekul lebih rendah (C8-C16), (c) hidrokarbon alifatik dengan berat molekul sedang (C17-C28), dan (d) hidrokarbon alifatik dengan berat molekul tinggi (>C28) (Varjani dkk., 2017).

## **2.3 Hidrokarbon Aromatik**

Hidrokarbon aromatik adalah molekul hidrokarbon yang mempunyai cincin secara umum dikelompokkan menjadi; (a) hidrokarbon aromatik monosiklik (MAHs) yaitu. BTEX (benzena, toluena, etilbenzena dan xilena), (b) hidrokarbon aromatik polisiklik (PAH) yang mengandung lebih dari satu cincin benzena, terdiri dari dua atau tiga cincin siklik, beberapa berbentuk hexagonal dengan ikatan rangkap seperti naftalena (bercincin dua), fenantrena dan antrasena (bercincin tiga) dengan berat molekul yang rendah atau disebut juga sebagai PAH ringan. PAH yang terdiri dari empat cincin atau lebih seperti pyrene dan chrysenes (bercincin empat), fluoranthene dan benzo[a]pyrene (bercincin lima) disebut sebagai PAH dengan berat molekul tinggi atau berat (Varjani dkk., 2017).

## **2.4. Resin**

Resin mengandung banyak gugus fungsi polar yang berikatan dengan N, S, O dan logam (Ni, V, Fe). Resin adalah padatan amorf dan benar-benar larut dalam minyak. Resin mengandung senyawa aromatik dengan rantai alkil yang panjang dan larut dalam n-heptana dan n-pentana, secara struktural mirip dengan molekul aktif permukaan dalam minyak mentah dan bertindak sebagai agen peptisasi (pembentukan koloid stabil dalam medium penyebaran) (Varjani dkk., 2017).

## **2.5. Aspal**

Asphaltene seperti resin mengandung banyak gugus fungsi polar, berwarna coklat tua, berat molekul tinggi dan kompleks, terdispersi secara koloid dalam senyawa jenuh dan aromatik, larut dalam hidrokarbon aromatik ringan seperti benzena dan toluena.

Asphaltene terdiri dari gugus polisiklik, yang secara bervariasi tersubstitusi dengan gugus alkil, yang berkontribusi terhadap ketahanannya terhadap biodegradasi. Resin sebagai agen peptisasi menjaga asphaltenes dalam suspensi sehingga meningkatkan stabilitas minyak (Varjani dkk., 2017).

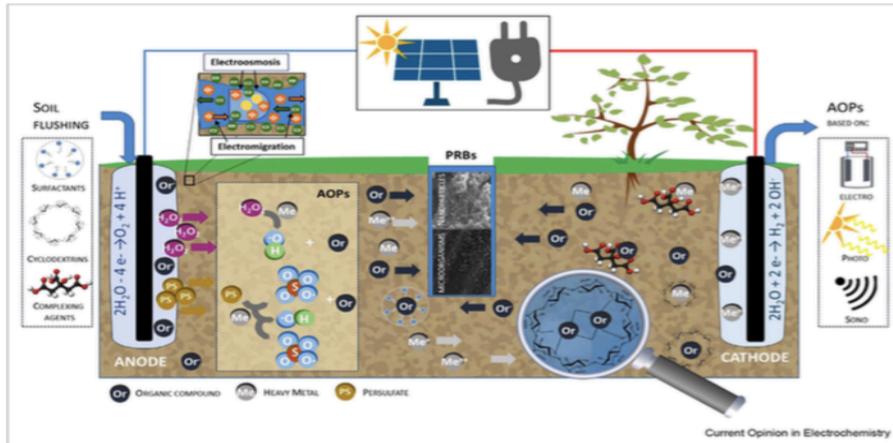
Metode Elektrokinetik Remediasi dilakukan dengan cara mengalirkan arus listrik ke dalam tanah sehingga menyebabkan kontaminan dapat bergerak dari pori-pori tanah melalui mekanisme elektromigrasi, elektroosmosis, dan elektroforesis. Untuk polutan organik mekanisme elektroosmosis adalah mekanisme transportasi utama. Karena kelarutan polutan organik dalam air rendah. Teknologi Elektrokinetik Remediasi selalu dikombinasikan dengan teknologi lain, seperti pembilasan tanah dan oksidasi kimia untuk meningkatkan kinerja remediasi. Berbagai macam surfaktan telah digunakan pada proses elektrokinetik remediasi untuk menghilangkan kontaminan organik, namun penggunaan surfaktan sintetik dapat menimbulkan berbagai masalah baru seperti toksisitas lingkungan dan resistensi terhadap biodegradasi. Penggunaan biosurfaktan telah menarik perhatian peneliti karena penggunaannya menunjukkan kompatibilitas lingkungan yang lebih luas, lebih beragam, aktivitas permukaan yang lebih baik, toksisitas yang lebih rendah, kemampuan demulsifikasi yang lebih tinggi, selektivitas yang lebih tinggi, dan biodegradabilitas yang lebih tinggi pula (Gidudu dan Chirwa, 2020b).

## **2.6 Elektrokinetik Remediasi**

Proses Elektrokinetik Remediasi merupakan proses remediasi secara fisika, teknik elektrokinetik dapat memulihkan tanah terkontaminasi dari senyawa-senyawa organik dengan menggunakan tegangan listrik rendah dan arus DC konstan. Pada remediasi tanah menggunakan proses elektrokinetik dengan elektroda diletakkan pada tanah dengan susunan aliran terbuka. Akibat arus DC yang masuk akan terjadi perubahan fisis dan kimiawi serta hidrologi dalam tanah yang menunjukkan adanya bermacam-macam perpindahan ionik dengan fenomena konduksi berpasangan dan tidak berpasangan dalam media berpori. Perpindahan ionik ini melalui penyerapan, penguapan dan reaksi penguraian yang merupakan mekanisme dasar dari remediasi elektrokinetik.

Ektrokinetik remediasi pada tanah terkontaminasi merupakan teknologi yang sangat direkomendasikan untuk meremediasi secara *in-situ* pada tanah dengan permeabilitas rendah dengan nilai konduktivitas hidrolis rendah. Remediasi dengan teknik ektrokinetik remediasi dilakukan dengan mengalirkan arus listrik secara langsung melintasi elektroda yang ditempatkan pada tanah yang tercemar. Medan listrik yang timbul menyebabkan mekanisme transpor yang berbeda pada polutan, seperti elektromigrasi (pergerakan ion ke elektroda yang berlawanan), elektroforesis (pergerakan partikel bermuatan, termasuk mikroorganisme ke elektroda yang berlawanan), dan elektro-osmosis (pergerakan air ke elektroda yang berlawanan pada katoda yang disebabkan oleh fenomena bermuatan superficial). Selain itu, terjadi reaksi elektrokimia yang berbeda, seperti elektrolisis dan elektrodeposisi, sehingga dapat diketahui bahwa proses remediasi yang terjadi merupakan hasil dari serangkaian fenomena transpor massa dan reaksi elektrokimia yang kompleks. Penelitian sebelumnya telah melaporkan bahwa remediasi menggunakan teknik Ektrokinetik remediasi telah berhasil dan menghemat biaya dalam menghilangkan berbagai jenis kontaminan di tanah dengan permeabilitas rendah (Cabral dkk., 2022; Mena dkk., 2016).

Ektrokinetik (EK) remediasi berdasarkan proses elektrokimia di mana arus listrik digunakan untuk mengekstraksi spesies kimia dari tanah. Arus listrik biasanya dengan intensitas rendah atau gradien potensial rendah langsung dialirkan pada beberapa elektroda inert yang dimasukkan ke dalam tanah, sesuai skema yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 sehingga polutan dalam medan listrik bergerak menuju anoda atau katoda. Adanya aliran terbuka antar elektroda memungkinkan fluida proses bersirkulasi di dalam dan keluar pori-pori medium padat. Pengangkutan spesies kimia yang diinduksi dalam media berpori selama remediasi elektrokimia terutama berdasarkan pada proses EK. Mekanisme spesifik di mana mobilisasi polutan terjadi adalah elektromigrasi (mobilisasi polutan dalam bentuk ionik yang mendukung medan listrik), elektro-osmosis (pergerakan cairan dalam kaitannya dengan permukaan padat dari medan listrik, biasanya dalam arah dari anoda ke katoda), dan elektroforesis (perpindahan partikel koloid bermuatan dalam suspensi) (Fdez-Sanromán dkk., 2021).



Gambar 2.1 Skema Elektrokinetik (EK) dengan sistem berbasis EK yang berbeda, termasuk mekanisme utama transportasi, remediasi *advanced oxidation processes* (AOPs) secara *ex situ*; dan *permeable reactive barrier* (PRB) (Fdez-Sanromán dkk., 2021)

Pada Gambar 2.1 menjelaskan pergerakan senyawa organik keluar dari tanah melalui proses elektromigrasi pada lingkungan bermuatan listrik dan melalui elektro-osmosis pada kondisi tidak mengandung ion. Untuk meningkatkan efisiensi remediasi menggunakan teknik elektrokinetik remediasi secara *in-situ*, baru-baru ini telah banyak menarik minat peneliti untuk menggabungkan teknik elektrokinetik remediasi dengan teknologi remediasi tanah konvensional lainnya. Teknologi yang paling umum digunakan pada proses Elektrokinetik (EK) yang terintegrasi untuk menghilangkan polutan organik di tanah, diantaranya *EK soil washing*, penggabungan EK dengan *Permeable Reactive Barrier* (PRB), dan EK-AOPs (*Advanced Oxidation Processes*). Pada umumnya, penggunaan strategi seperti kontrol pH tanah dan penambahan zat pelarut untuk meningkatkan kelarutan logam berat dan polutan organik meningkatkan semua proses EK yang terintegrasi. Namun, berbagai macam polutan dengan karakteristik yang berbeda pada tanah terkontaminasi memerlukan evaluasi awal untuk menentukan kondisi operasional terbaik. (Fdez-Sanromán dkk., 2021).

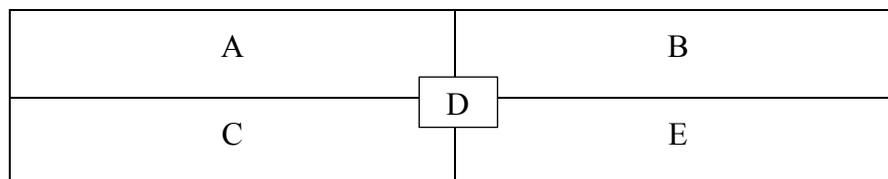
## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian; “Elektrokinetik Remediasi Pada Tanah Tercemar Hidrokarbon Minyak Bumi”, merupakan penelitian eksperimental di laboratorium yang dimulai dari sampling tanah terkontaminasi kemudian dilanjutkan uji karakteristik tanah dan pencemar, pembuatan reaktor, proses elektrokinetik remediasi, pengujian parameter uji selama proses remediasi serta analisis data.

### 3.1. Sampling Tanah

Sampel tanah yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanah yang tercemar minyak bumi. Perlakuan dilakukan penyaringan tanah untuk memisahkan sampel tanah dari makrofauna, batu-batuan dan material padat yang akan menimbulkan masalah teknis pada saat proses karakterisasi, menggunakan alat *sieve shaker size 4 ASTM Standart Test Sieve (opening 4.75 mm)*. Sementara itu juga dilakukan pengukuran kondisi lingkungan dan konsentrasi pencemar sebelum proses remediasi diketahui dengan mengukur *Total Petroleum Hydrocarbon (TPH)*, pH tanah, kelembaban tanah, suhu tanah, jumlah populasi bakteri, dan total nitrogen di tanah.

Pengambilan sampel tanah untuk dianalisis lebih lanjut dilakukan secara acak menggunakan metode *composite sampling* (gabungan tempat) terstratafikasi, dengan skema sampling seperti pada Gambar 3.1 sebagai berikut;



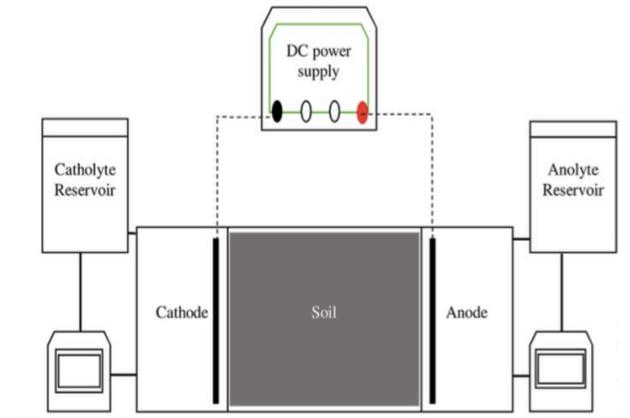
Gambar 3.1. Skema Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel dilakukan pada setiap titik sampel A, B, C dan E (Gambar 1), disetiap pada permukaan tanah dan pada kedalaman tanah kemudian disatukan untuk mendapatkan sampel yang representative (sampel dari 5 titik x 2 sampel dari ke dalaman

pada masing-masing grid (10 rata-rata sampel)). Sampel dikemas pada kantong plastik tertutup dan dimasukkan kedalam *coolbox* sebelum dilakukan ekstraksi di laboratorium.

### 3.2. Pembuatan Reaktor

Reaktor Elektrokinetik remediasi dibuat menggunakan kaca akrilik dengan membaginya menjadi 3 bagian / kompartemen yaitu; 1 kompartemen berukuran 18 cm × 12 cm × 10 cm yang berisi tanah terkontaminasi, dan 2 kompartemen masing-masingnya berukuran 6 cm × 12 cm × 10 cm sebagai tempat elektroda dengan *outlet* ke *reservoir* elektrolit. Elektroda yang digunakan berupa lempeng *stainless steel* dengan ukuran 10 cm × 6 cm. Pada dasar reaktor diletakan pipa-pipa yang dilubangi dan dihubungkan dengan pompa vacum, reaktor dirancang seperti Gambar 3.2.



Gambar 3.2 : Desain Teknis Reaktor Elektrokinetik Remediasi (Gidudu dan Chirwa, 2020)

### 3.3. Ekstraksi Sampel Tanah

Analisis *Total Petroleum Hidrokarbon* (TPH) diawali dengan ekstraksi tanah tercemar hidrokarbon minyak bumi, menggunakan metoda gravimetri dengan *Soxhlet Extraction Method* (Standard Method, metode 5520 F) bertujuan untuk mengetahui tingkat degradasi berdasarkan berat minyak awal sebelum proses remediasi. Dengan cara mengekstrak ± 20gr sampel tanah yang ditambahkan HCL pekat sebanyak 0,5 dan 25 gr  $MgSO_4H_2O$  (*anhydrous*) diaduk sampai rata dan dibiarkan selama 15-30 menit kemudian digerus dalam mortal sampai halus kemudian tanah dipindahkan ke dalam kertas thimbles. Tanah di dalam kertas thimbles diekstraksi dengan Soxhlet menggunakan pelarut n-hexan selama 4 jam (20 putaran/jam). Kemudian ekstrak yang berada di dalam labu ditimbang. Penentuan TPH yang terdapat pada sampel menggunakan rumus berikut;

$$\text{Total Petroleum Hidrokarbon (TPH)} = \frac{\text{Berat ekstrak (mg)}}{\text{Berat sampel (Kg)}}$$

(Ajona dan Vasanthi, 2021; Rocha dkk., 2019)

### **3.4. Analisis Kuantitatif dan Kualitatif**

Analisis kuantitatif dan kualitatif dari pencemar minyak bumi dengan mengetahui komposisi minyak bumi dilakukan analisis *Total Petroleum Hidrokarbon* (TPH) menggunakan alat GS/MS dengan prinsip metoda ekstraksi dan kromatografi.

Analisis menggunakan Kromatografi Gas (KG) dapat digunakan untuk mengetahui komposisi dan jenis senyawa yang terkandung di dalam sampel tanah sebelum proses remediasi dan untuk mengetahui perubahan komponen-komponen yang terdapat pada sampel tanah setelah proses remediasi (Prakash dkk., 2021) Kromatografi Gas (KG) yaitu suatu teknik untuk memisahkan senyawa-senyawa dengan menggunakan fase gerak berupa gas dan melalui suatu kolom sebagai fase diamnya. Pada saat minyak bumi disuntikan ke dalam K, komponen-komponen tunggal dari campuran akan bergerak melalui kolom pada tingkatan yang berbeda secara terpisah diantara fase bergerak dan fase diam. Pemisah komponen diukur oleh suatu detektor yang berperan sebagai dalam kolom. (Prakash dkk., 2021)

### **3.5. Proses Elektrokinetik Remediasi**

Proses elektrokinetik remediasi bertujuan meremediasi tanah terkontaminasi minyak bumi secara fisika dengan mempelajari mekanisme elektrokinetik remediasi yang akan mempengaruhi peningkatan bioavailabilitas polutan dan mempelajari mekanisme migrasi senyawa polutan dari tanah tercemar selama proses elektrokinetik remediasi serta menemukan kondisi optimum reaktor elektrokinetik remediasi (Gidudu dan Chirwa, 2020a dan Prakash dkk., 2021).

Proses Elektrokinetik Remediasi merupakan proses remediasi secara fisika, teknik elektrokinetik dapat memulihkan tanah terkontaminasi dari senyawa-senyawa organik dengan menggunakan tegangan listrik rendah dan arus DC konstan. Pada remediasi tanah menggunakan proses elektrokinetik dengan elektroda diletakkan pada tanah dengan susunan aliran terbuka. Akibat arus DC yang masuk akan terjadi perubahan fisis dan

kimiawi serta hidrologi dalam tanah yang menunjukkan adanya bermacam-macam perpindahan ionik dengan fenomena konduksi berpasangan dan tidak berpasangan dalam media berpori. Perpindahan ionik ini melalui penyerapan, penguapan dan reaksi penguraian yang merupakan mekanisme dasar dari remediasi elektrokinetik.

Pada reaktor elektrokinetik remediasi akan diisi 2000 gr tanah terkontaminasi yang akan diremediasi secara fisika dengan mengalir arus DC dengan menggunakan 2 variasi tegangan yang akan ditentukan setelah dilakukan pengujian performa reaktor. Proses elektrokinetik remediasi pada tahap ini juga akan terintegrasi dengan teknik *soil washing* melalui penambahan surfaktan sintetis yang akan ditambahkan dari atas permukaan tanah untuk membantu peningkatan bioavailabilitas polutan pada proses elektrokinetik remediasi (Gidudu dan Chirwa, 2020).

### **3.6. Analisis Data**

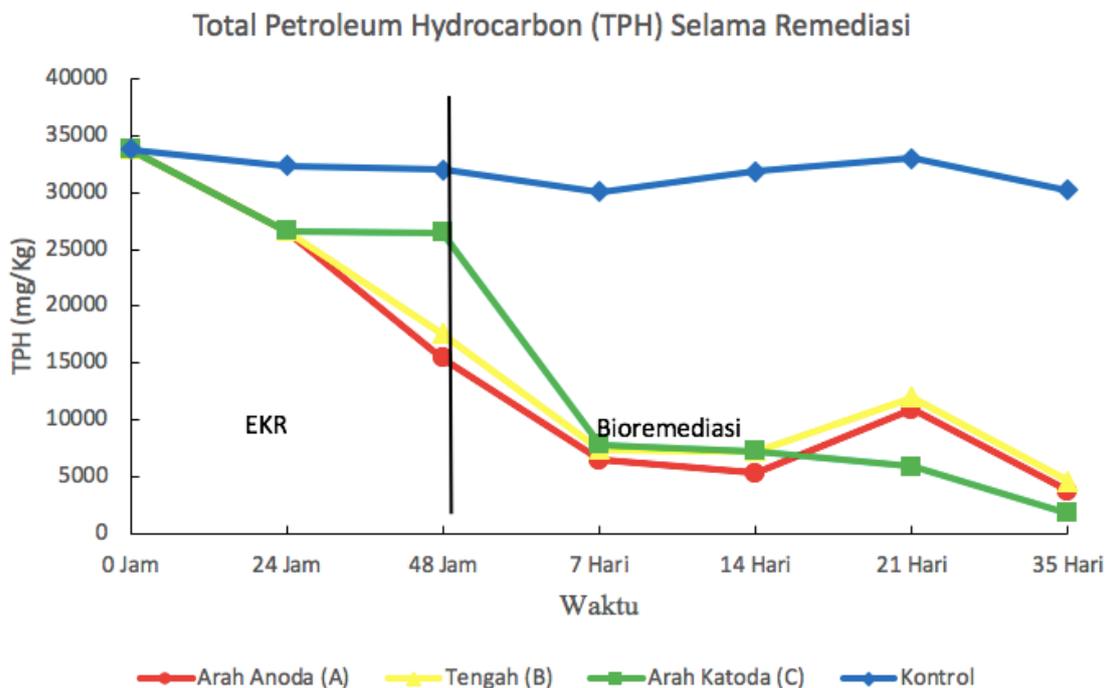
Data penurunan *Total Petroleum Hydrocarbon* (TPH) akan dianalisis menggunakan metoda *Analysis regression* dengan perangkat lunak SPSS ver 16.

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1. Penyisihan Total Petroleum Hydrocarbon (TPH)

Untuk mengetahui performa reaktor elektrokinetik dalam remediasi tanah yang terkontasi minyak bumi dapat diketahui dengan membandingkannya dengan reaktor kontrol. Peningkatan bioavailabilitas selama 48 jam proses elektrokinetik remediasi dilanjutkan dengan proses bioremediasi (bioatenuasi) selama 35 hari pengamatan dengan mengamati jumlah populasi bakteri total/Total Plate Count (TPC) dan Total Petroleum Hydrocarbon (TPH), serta mengamati mekanisme transportasi yang terjadi selama 48 jam proses remediasi. Pengukuran hasil uji kinerja reaktor selama remediasi dengan nilai parameter uji TPH dan TPC sebagai parameter kunci yang dijelaskan pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2



Gambar 4.1 : Penyisihan Total Petroleum Hydrocarbon (TPH) Selama Remediasi

Dari Gambar 4.1 dapat diketahui performa reaktor elektrokinetik remediasi selama 48 jam dialiri arus searah (DC) dengan tegangan rendah 34 V ( $V\ cm^{-1}$ ) yang dilanjutkan dengan proses bioremediasi (bioatenuasi) selama 35 hari pengamatan, terlihat bahwa terjadi penyisihan Total Petroleum Hidrokarbon (TPH) yang signifikan pada reaktor uji

bila dibandingkan dengan reaktor kontrol. Pada awal proses remediasi yaitu pada saat proses elektrokinetik, telah terjadi penurunan konsentrasi TPH pada sampel tanah hingga 26603,33(mg/Kg) atau sebesar 21,25% dalam waktu 24 jam awal remediasi. Untuk melihat pengaruh perbedaan posisi pengambilan sampel dalam pengukuran konsentrasi TPH, maka lokasi pengambilan sampel dibagi menjadi tiga area berdasarkan arah elektroda terhadap konsentrasi TPH dalam reaktor yaitu:

- Posisi sampel dekat anoda (A)
- Posisi sampel di tengah reaktor (B)
- Posisi sampel dekat katoda (C)

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada posisi sampel dekat anoda (A) terjadi penurunan TPH paling signifikan, yaitu sebesar 15421,69 (mg/Kg) atau 42,03% pada 48 jam remediasi, dengan persamaan regresi:  $Y = 89,034 - 0,003X$ , dan  $r = 0,992$ ,  $r^2 = 0,984$ , menyusul posisi sampel di tengah reaktor (B) sebesar 33,87%, dan posisi sampel dekat katoda (C) sebesar 0,45%. Rata-rata efisiensi penurunan TPH di reaktor uji selama proses elektrokinetik remediasi sebesar 41,29%.

Berdasarkan grafik penyisihan TPH (Gambar 4.1), penyisihan TPH tertinggi selama 48 jam pengaliran arus listrik terjadi pada posisi sampel dekat anoda (A). Hal ini dapat dijelaskan bahwa pada sampel tanah dekat anoda selama proses elektrokinetik telah terjadi degradasi hidrokarbon secara fisika karena pengaruh arus listrik yang diberikan pada reaktor yang menyebabkan medan listrik yang terbentuk merangsang migrasi hidrokarbon minyak bumi sebagai koloid menuju arah anoda melalui mekanisme elektroforesis (pergerakan koloid) yang menyebabkan penyisihan hidrokarbon yang tinggi terjadi di daerah tersebut. Saini et al. (2020) menjelaskan bahwa elektrokinetik telah meningkatkan distribusi nutrisi dan kontaminan di seluruh tanah. Kontaminan dapat dengan mudah berdifusi ke dalam tanah atau matriks sedimen di daerah permeabilitas rendah. Migrasi minyak melalui mekanisme elektroforesis (pergerakan koloid) terjadi selama elektrokinetik remediasi.

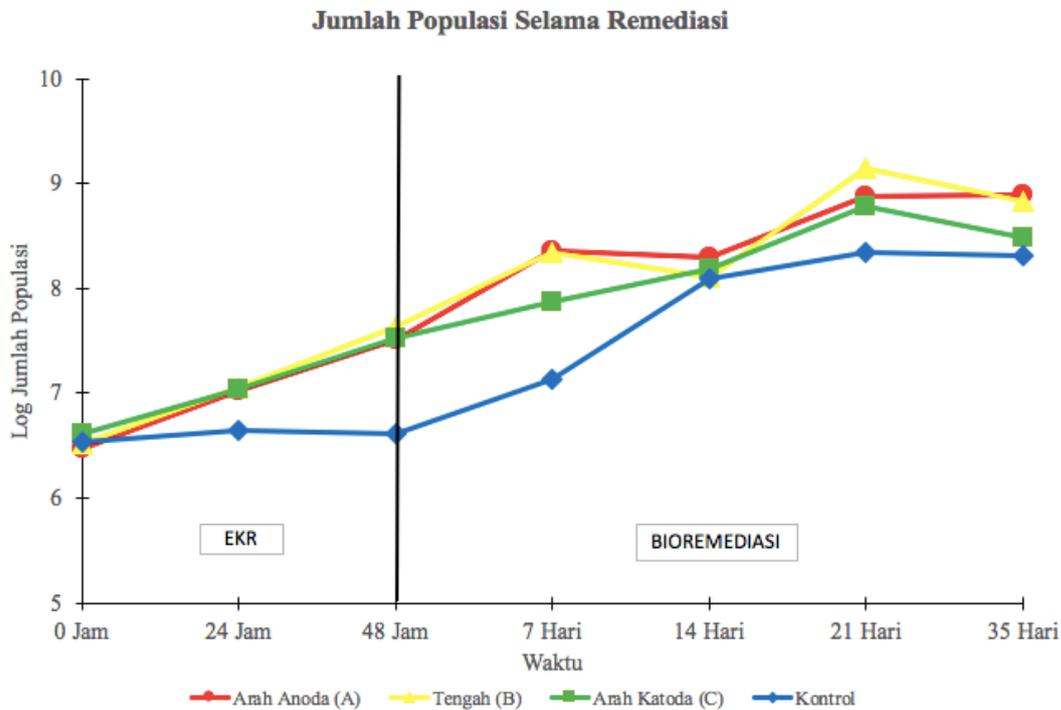
Peningkatan penyisihan TPH terus terjadi setelah 48 jam proses elektrokinetik remediasi (Gambar 4.2). Penyisihan TPH pada reaktor uji terlihat lebih besar jika dibandingkan dengan reaktor control, hal ini dikarenakan pada proses bioremediasi setelah penghentian

arus listrik telah diawali dengan *pre-treatment* menggunakan teknik elektrokinetik selama 48 jam, yang diduga telah terjadi degradasi senyawa karbon menjadi senyawa yang lebih sederhana pada hidrokarbon minyak bumi sehingga bakteri pendegradasi dapat dengan mudah memanfaatkan senyawa organik tersebut sebagai sumber nutrisi dan energi untuk pertumbuhannya. Menurut Varjani dan Upasani (2017), hidrokarbon minyak bumi didegradasi oleh mekanisme biodegradasi enzim-enzim tertentu, yaitu mekanisme pengikatan sel mikroba pada substrat yang merangsang produksi biosurfaktan sebagai zat pengemulsi. Biodegradabilitas hidrokarbon berhubungan dengan sifat fisikokimia substrat dan bioavailabilitasnya, yang mempengaruhi kontak, transportasi, dan transformasi substrat oleh bakteri.

Peningkatan bioavailabilitas setelah proses elektrokinetik remediasi bila dilihat dari penyisihan TPH sebagai indikator, dapat dijelaskan bahwa setelah hari ke 7 sampai dengan hari ke 33 proses biodegradasi berjalan cepat ditunjukkan dengan nilai efisiensi penyisihan rata-rata TPH sebesar 80,74% dari ketiga posisi pengambilan sampel pada reaktor uji. Dengan demikian, hasil penelitian menunjukkan adanya peningkatan bioavailabilitas hidrokarbon selama 48 jam remediasi elektrokimia yang dilanjutkan dengan proses bioatenuasi selama 35 hari pengamatan. Sementara itu pada reaktor kontrol juga terjadi penurunan TPH sebesar 10,56%, sehingga bila dibandingkan dengan reaktor uji dapat dijelaskan bahwa teknik elektrokinetik yang diterapkan sebelum proses bioremediasi dapat meningkatkan bioavailabilitas sebesar 70,18%.

#### **4.2. Jumlah Populasi Bakteri**

Indikator peningkatan bioavailabilitas selain peningkatan penyisihan TPH juga diketahui dengan menghitung jumlah populasi bakteri yang dapat mendegradasi hidrokarbon minyak bumi tersebut. Jumlah populasi bakteri diamati selama proses remediasi. Log jumlah populasi bakteri setiap pengamatan ditunjukkan pada Gambar 4.2 di bawah ini:



Gambar 4.2 : Jumlah Populasi Selama Remediasi

Gambar 4.2 menunjukkan adanya peningkatan jumlah populasi bakteri pada selama proses remediasi, dengan rata-rata populasi pada awal proses sebesar  $35 \times 10^5$  CFU/gr dan meningkat menjadi  $58 \times 10^7$  CFU/gr pada akhir proses. Peningkatan populasi dan peningkatan penyisihan TPH mengindikasikan telah terjadi peningkatan bioavailabilitas melalui fenomena transpor yang terjadi pada tanah selama proses elektrokinetik. Menurut Saini dkk. (2020), remediasi elektrokinetik dapat meningkatkan pergerakan mikroorganisme melalui tanah yang permeabilitasnya rendah, meskipun ukuran pori-pori yang kecil menghambat pergerakan sel. Elektroosmosis berperan penting dalam pergerakan bakteri non-motil, yang dapat memindahkan hingga 90% bakteri non-motil melalui elektroosmosis, dibandingkan dengan elektroforesis yang hanya 0%-20%. Mekanisme elektro osmosis pada penelitian ini memiliki peranan yang dominan dilihat dari populasi pada akhir proses elektrokinetik (48 jam) populasi pada posisi dekat anoda (A) sebesar  $3,2 \times 10^7 < 4,4 \times 10^7$  (posisi sentral reaktor (B)), fenomena ini dapat dijelaskan dengan adanya pergerakan bakteri yang tidak motil yang didorong oleh adanya pergerakan air akibat adanya elektroosmosis dari anoda menuju katoda selama proses remediasi elektrokinetik 48 jam, pergerakan ini juga menyebabkan peningkatan kadar air tanah yang mendukung pertumbuhan bakteri degradasi. Gambar 4.2 juga telah

menunjukkan bahwa bakteri degradasi dapat bergerak dari area katoda maupun area anoda; tidak terdapat perbedaan jumlah populasi yang signifikan dari ketiga posisi sampling pada reaktor uji. Dengan demikian, dapat diketahui bahwa selama proses elektrokinetik telah terjadi migrasi bakteri melalui elektroosmosis (bakteri bergerak dari anoda menuju katoda) dan elektroforesis (bakteri bergerak dari katoda menuju anoda).

Berdasarkan Gambar 4.2 juga dapat diketahui bahwa elektrokinetik telah berperan sebagai biostimulasi bagi pertumbuhan mikroba pendegradasi pada awal proses elektrokinetik remediasi selama 48 jam. Pada grafik log jumlah populasi bakteri dapat dilihat jumlah populasi bakteri meningkat secara signifikan, dan peningkatan ini terus berlanjut hingga 35 hari bioremediasi seiring dengan peningkatan penyisihan TPH (Gambar 4.1). Menurut Saini dkk. (2020) bahwa teknik elektrokinetik telah meningkatkan distribusi nutrisi dan kontaminan di seluruh tanah. Dari hasil penelitian ini diketahui pula bahwa distribusi nutrisi termasuk senyawa hidrokarbon minyak bumi telah secara merata tersebar di dalam tanah terkontaminasi sehingga menyebabkan pertumbuhan bakteri setelah proses elektrokinetik remediasi meningkat, dan dapat dikatakan telah terjadi peningkatan bioavailabilitas hidrokarbon setelah *pre-treatment* dengan menggunakan teknik elektrokinetik pada proses remediasi tanah.

#### **4.3. Luaran Penelitian dan Integrasi Penelitian dalam Kegiatan Pembelajaran**

- Luaran kegiatan penelitian ini berupa Proceeding The 7th Environmental Technology and Management Conference (ETMC) 2023, dengan judul : “Bioavailability enhancement of petroleum contaminated soil by electrokinetic remediation.
- Integrasi Penelitian dalam kegiatan pembelajaran pada MK. Mikrobiologi Lingkungan dan Bioteknologi Lingkungan yang telah dilaksanakan pada tahun ajaran berjalan yaitu berlangsung pada semester Genap 2022/2023 dan Ganjil 2023/2024.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

Setelah melakukan penelitian ini, beberapa kesimpulan yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

1. Karakteristik sampel tanah didominasi oleh lempung sebesar 49,31%. Konsentrasi TPH pada tanah tercemar sebesar 3,7%. Aplikasi elektrokinetik selama 48 jam dan diikuti dengan bioremediasi selama 35 hari, proses tersebut menghilangkan TPH hingga 80,74% (dari 33780,66 mg HC (kg berat kering)<sup>-1</sup> menjadi 6506,155176 mg HC (kg berat kering)<sup>-1</sup>). Terdapat peningkatan bioavailabilitas yang ditunjukkan dengan peningkatan populasi bakteri dan peningkatan biodegradasi setelah remediasi elektrokinetik. Dengan pendekatan ini bioavailabilitas telah meningkat sebesar 70,18%.
2. Reaktor bertegangan 34 V (2 V cm<sup>-1</sup>) telah meningkatkan bioavailabilitas hidrokarbon minyak bumi selama 48 jam proses elektrokinetik yang dilanjutkan dengan bioremediasi selama 33hari dengan rata-rata penyisihan TPH sebesar 41,29% pada akhir proses elektrokinetik dan pada akhir proses bioremediasi rata-rata penyisihan TPH meningkat mencapai 80,74%.
3. Telah terjadi fenomena transport melalui mekanisme elektromigrasi, elektroosmosis (pergerakan air melalui pori-pori), elektroforesis (pergerakan koloid), dan elektrolisis (pemisahan air) selama pengaliran arus listrik. Hal ini mengindikasikan adanya perubahan konsentrasi TPH dan jumlah populasi bakteri pada reaktor elektrokinetik uji
4. Telah terjadi peningkatan bioavailabilitas sebesar 70,18% pada proses remediasi tanah lempung yang terkontaminasi minyak bumi, yang diawali dengan teknik elektrokinetik remediasi, sehingga remediasi Bio-elektrokinetik merupakan metode yang direkomendasikan untuk remediasi tanah lempung dengan bioavailabilitas rendah.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ajona, M., & Vasanthi, P. (2021). Bio-remediation of crude oil contaminated soil using recombinant native microbial strain. *Environmental Technology and Innovation*, *23*. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101635>
- Cabral, L., Giovanella, P., Pellizzer, E. P., Teramoto, E. H., Kiang, C. H., & Sette, L. D. (2022): Microbial communities in petroleum-contaminated sites: Structure and metabolisms. *Chemosphere*, *286*(March 2021). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131752>
- Fdez-Sanromán, A., Pazos, M., Rosales, E., dan Sanromán, M. Á. (2021): Prospects on integrated electrokinetic systems for decontamination of soil polluted with organic contaminants, *Current Opinion in Electrochemistry*, *27*. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2021.100692>
- Gidudu, B., & Chirwa, E. M. N. (2020). Biosurfactants as demulsification enhancers in bio-electrokinetic remediation of petroleum contaminated soil. *Process Safety and Environmental Protection*, *143*, 332–339. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.052>
- Ossai, I. C., Ahmed, A., Hassan, A., dan Hamid, F. S. (2020): Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review, *Environmental Technology and Innovation*, *17*. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100526>
- Prakash, A. A., Prabhu, N. S., Rajasekar, A., Parthipan, P., AlSalhi, M. S., Devanesan, S., & Govarthan, M. (2021). Bio-electrokinetic remediation of crude oil contaminated soil enhanced by bacterial biosurfactant. *Journal of Hazardous Materials*, *405*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124061>
- Patowary, R. Kaustuvmani Patowary, Mohan Chandra Kalita, Suresh Deka (2018): Application Of Biosurfactant For Enhancement Of Bioremediation, *Journal of International Biodeterioration & Biodegradation*, *129*, 50-60.
- Polyak, Y.M. Ludmila G. Bakina, Marina V. Chugunova, Natalya V. Mayachkina, Alexander O. Gerasimov, Vladimir M. Bure (2018): Effect Of Remediation Strategies On Biological Activity Of Oil-Contaminated Soil - A Field Study, *Journal of International Biodeterioration & Biodegradation*, *126*, 57-68.
- Ramadan, B. S., Sari, G. L., Rosmalina, R. T., Effendi, A. J., and Hadrah (2018): An overview of electrokinetic soil flushing and its effect on bioremediation of hydrocarbon contaminated soil, *Journal of Environmental Management*, *218*, 309–321. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.06>
- Rocha, I. M. V., Silva, K. N. O., Silva, D. R., Martínez-Huitle, C. A., & Santos, E. V. (2019). Coupling electrokinetic remediation with phytoremediation for depolluting soil with petroleum and the use of electrochemical technologies for treating the effluent generated. *Separation and Purification Technology*, *208*(March), 194–200. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.03.012>
- Saini, A., Bekele, D. N., Chadalavada, S., Fang, C., dan Naidu, R. (2020): A review of electrokinetically enhanced bioremediation technologies for PHs, *Journal of Environmental Sciences (China)*, *88*, 31–45. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.08.010>
- Varjani, S. J. (2017a): Microbial degradation of petroleum hydrocarbons, *Bioresource Technology*, *223*, 277–286. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.0>