

TINJAUAN SINGKAT BIO-ELEKTROKINETIK REMEDIASI PADA TANAH TERCEMAR HIDROKARBON MINYAK BUMI

SANDRA MADONNA¹

1. Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Bakrie
Email : s.ramadonna@gmail.com

ABSTRAK

Bioremediasi tanah yang tercemar hidrokarbon minyak bumi telah banyak digunakan, namun dalam aplikasinya yang luas masih dibatasi oleh karakteristik polutan, tanah dan mikroba pendegradasi dalam beradaptasi pada lingkungan yang berbeda. Tantangan dalam bioremediasi tanah tercemar hidrokarbon minyak bumi selain kompleksitas senyawa polutan sehingga sulit terbiodegradasi dan menyebabkan laju degradasinya berjalan lambat. Bioremediasi tanah tercemar hidrokarbon minyak bumi umumnya akan berlangsung dalam hitungan bulan, waktu degradasi tersebut dapat dipercepat dengan menggabungkannya dengan teknik elektrokinetik remediasi dan meningkatkan bioavailabilitas dengan melakukan biostimulasi pada tanah tercemar tersebut, sehingga remediasi dapat berlangsung dalam hitungan hari bahkan hitungan jam. Makalah ini memberikan ulasan tentang penggabungan teknologi remediasi untuk tanah yang terkontaminasi minyak bumi. Metode yang dibahas meliputi Bioremediasi dan Elektrokinetik remediasi yang dikaitkan dengan efektifitas degradasi, waktu degradasi, kelebihan, kekurangan, dan prospek pengembangannya di masa depan. Penekanan pada makalah ini adalah tidak ada teknologi remediasi tunggal yang dianggap sebagai solusi terbaik untuk remediasi tanah yang terkontaminasi minyak bumi yang bersifat kompleks.

Kata kunci: bioremediasi, elektrokinetik remediasi, tanah terkontaminasi minyak bumi.

ABSTRACT

Bioremediation has been widely applied for the recovery of oil-contaminated soil, but its application is still limited by the characteristics of pollutants, soil characteristics and the characteristics of degrading microbes in adapting to different environments. The challenges in bioremediation of petroleum-contaminated soils are characteristics of pollutant compounds that are recalcitrant and toxic so that pollutants are difficult to biodegrade caused the rate of degradation to run slowly. The slow rate of degradation of organic waste is influenced by microbial decomposing enzymes that are not able to catalyze the degradation reaction of unnatural waste or xenobiotic waste, the solubility of pollutants in the air is very low, and is toxic to degrading microorganisms. Bioremediation of petroleum polluted soil will generally take place in months, the degradation time is accelerated by combining it with electrokinetic remediation techniques and increasing bioavailability by biostimulating the polluted soil. This paper provides an overview of the incorporation of remediation technology for petroleum contaminated soil. The methods discussed include bioremediation and electrokinetic remediation involving the rate of degradation, advantages, disadvantages, and prospects for their future development. The emphasis in this paper is that no single remediation technology is considered the best solution for the complex remediation of petroleum-contaminated soil.

Keywords: *Bioremediation, Electrokinetic Remediation, Petroleum contaminated soil*

1. PENDAHULUAN

Industri minyak dan gas bumi (migas) masih memegang peran penting dalam mendukung pertumbuhan ekonomi di Indonesia. Namun dalam rangkaian kegiatan industri migas seperti eksplorasi, eksploitasi, dan pengolahan hingga pengangkutan minyak bumi dan produk-produknya sering menimbulkan pencemaran lingkungan. Pengaruh negatif dari industri migas tidak dapat dibiarkan berlarut-larut, limbah migas harus dikelola dengan baik untuk menghindari terjadinya degradasi kualitas lingkungan dan sumber daya alam.

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 yang terdapat di lokasi pencemaran, kontaminan tersebut selanjutnya akan masuk menuju populasi hewan dan manusia melalui rantai makanan (Patowary dkk., 2018). Tumpahan minyak di tanah dapat mempengaruhi seluruh ekosistem, mengubah vegetasi, hewan, aktivitas mikroba, karakteristik tanah dan kesuburan tanah. Dampak ekologis minyak terhadap fungsi tanah paling jelas terlihat melalui perubahan aktivitas mikroorganisme dan enzim-enzim mikroorganisme tanah tersebut (Polyak, 2018).

Chen, dkk. (2019) menyatakan bahwa remediasi tanah yang terkontaminasi minyak bumi masih menjadi topik yang hangat untuk studi lingkungan dan reservasi ekologi. Berbagai metode remediasi dengan pendekatan *physiochemical* proses seperti *soil washing*, *vapor extraction*, *flushing*, dan *thermal desorption* telah digunakan. Selain itu pendekatan biologis seperti *landfarming*, *biopiles*, *sistem bioslurry*, dan *bioventing* juga telah digunakan untuk meremediasi kontaminasi minyak bumi. Metode bioremediasi banyak menarik minat peneliti dengan alasan karena konsumsi energinya yang rendah, biaya operasi murah, dan tidak menimbulkan polusi sekunder. Metode bioreaktor telah banyak dipelajari dan diaplikasikan dan untuk remediasi tanah yang terkontaminasi karena efektif digunakan dan memberikan waktu reaksi yang singkat

Patowary dkk. (2018) menyatakan bahwa para peneliti telah banyak melakukan penelitian yang melibatkan mikroorganisme untuk memulihkan lingkungan yang terkontaminasi minyak bumi. Sejumlah besar mikroorganisme yang digunakan adalah mikroorganisme endogenous yang hidup lokasi yang tercemar minyak, mikroorganisme tersebut memiliki kemampuan untuk mendegradasi kontaminan hidrokarbon. Meskipun telah banyak penelitian bioremediasi tanah yang terkontaminasi hidrokarbon dengan memanfaatkan spesies mikroorganisme endogenous atau konsorsium mikroorganisme namun untuk aplikasi yang luas masih dibatasi oleh karakteristik mikroorganisme tersebut yang memerlukan adaptasi yang berbeda terhadap kondisi ekologi yang beragam di berbagai wilayah di dunia. Menurut Chen, dkk. (2019) bahwa keberhasilan bioremediasi minyak bumi tergantung pada kondisi lingkungan yang mempengaruhi biodegradasi seperti jenis dan karakteristik tanah di lokasi, aktivitas mikroba, kelembaban, suhu, pH, ketersediaan oksigen, nutrisi dan konsentrasi polutan minyak bumi.

Menurut Patowary dkk. (2018) bahwa meskipun proses biodegradasi senyawa hidrokarbon minyak bumi telah terbukti efektif namun proses tersebut dapat dihambat oleh sifat polutan yang bersifat recalcitrant dan bioavailabilitas yang rendah. Selain itu degradasi senyawa organik hidrokarbon minyak bumi yang bersifat hidrofobik dari tanah agak sukar karena kelarutannya yang rendah dan kecenderungannya untuk tetap melekat pada partikel tanah dan material organik lain di dalam tanah. Pemilihan metode yang sesuai dapat mempercepat proses biodegradasi senyawa organik hidrokarbon minyak bumi.

Bioremediasi umumnya berlangsung dalam hitungan bulan, waktu degradasi tersebut dapat dipercepat dengan memberikan perlakuan awal terhadap tanah yang terkontaminasi senyawa organik dan logam berat dengan cara menghilangkan polutan logam yang menjadi penghambat aktivitas mikroba heterotrofik di lingkungan. Teknik Elektrokinetik dapat digunakan untuk mengikat logam-logam yang terdapat pada pencemar di lingkungan. Elektrokinetik remediasi diduga juga 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. Metode Elektrokinetik Remediasi dilakukan dengan cara mengalirkan arus listrik ke dalam tanah sehingga menyebabkan kontaminan dapat dihilangkan dari pori-pori tanah melalui mekanisme elektromigrasi, elektroosmosis, dan elektroforesis. Untuk polutan organik, 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 & Chirwa, 2020a).

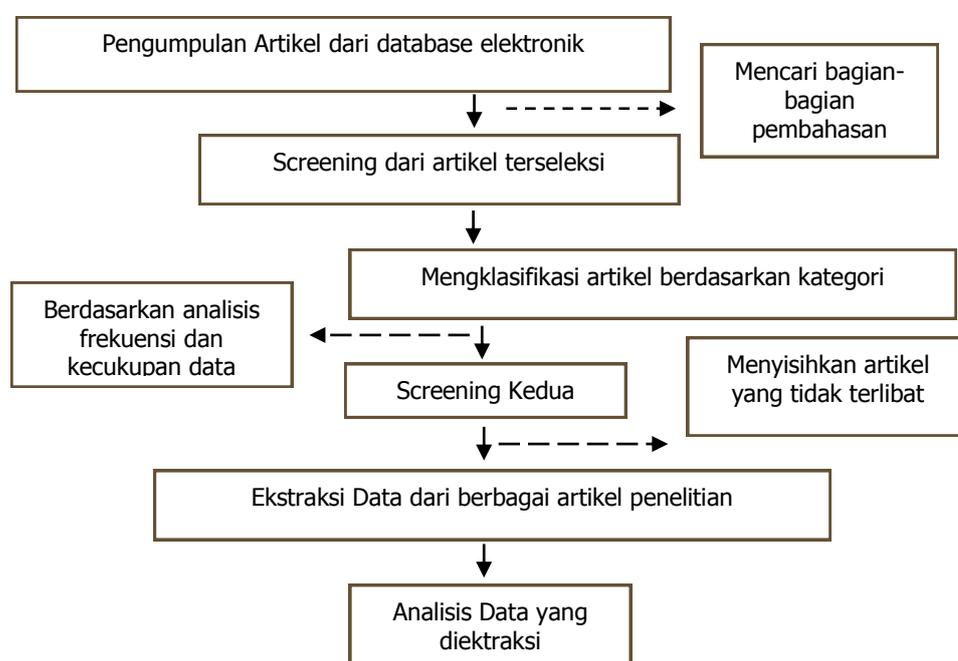
Pengabungan teknik elektrokinetik dan biostimulasi dalam remediasi tanah terkontaminasi minyak bumi diduga dapat mempercepat waktu degradasi, sehingga bioremediasi dapat berlangsung dalam hitungan hari bahkan hitungan jam. Penggunaan biosurfaktan dapat meningkatkan bioelektrokinetik remediasi lingkungan yang tercemar minyak. Penelitian Gidudu & Chirwa (2020) telah membuktikan bahwa remediasi hidrokarbon minyak bumi tergantung pada aplikasi yang sinergis dari biosurfaktan, bioremediasi, dan remediasi elektrokinetik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa untuk meningkatkan efektifitas proses remediasi dapat dicapai dengan mengkombinasikan proses remediasi secara elektrokinetik dengan proses bioremediasi dan penambahan biosurfaktan media. Biosurfaktan dapat digunakan sebagai larutan pembilas di anoda dan/atau katoda yang digunakan dalam proses elektrokinetik remediasi.

Mikroba hidrokarbonoklastik menghasilkan biosurfaktan yang dapat menurunkan tegangan permukaan suatu cairan dan tegangan antar muka antara dua fase yang berbeda serta meningkatkan stabilitas emulsi, sehingga dapat memicu bioavailabilitas polutan. Selain kemampuannya menghasilkan biosurfaktan, konsorsium bakteri hidrokarbonoklastik mampu memanfaatkan hidrokarbon minyak bumi sebagai substrat. (Gidudu & Chirwa, 2020a). Biosurfaktan juga diharapkan dapat meningkatkan efisiensi bioremediator yaitu mikroorganisme dengan meningkatkan hidrofobisitas membran selnya dan mengubah permeabilitas membran sehingga dapat meningkatkan kemampuannya untuk menyerap senyawa hidrokarbon dan memanfaatkannya sebagai substrat, sehingga proses biodegradasi dapat berlangsung (Patowary dkk., 2018).

Penelitian Bioremediasi terus berkembang dengan demikian kebaruan dari teknologi Bioremediasi yang akan dikaji pada makalah ini adalah penggabungan teknik remediasi secara fisika (elektrokinetik remediasi) dengan teknik bioremediation dikaitkan dengan peningkatan laju degradasi, kelebihan, kekurangan, dan prospek pengembangannya di masa depan.

2. METODE

Metode penelitian yang digunakan adalah Meta-analisis yang menganalisis data yang dikumpulkan dari artikel penelitian-penelitian sebelumnya, untuk mendapatkan kesimpulan baru atau mengisi kesenjangan antara penelitian sebelumnya. Meta-analisis terdiri dari mengumpulkan, meringkas, menganalisis, dan meninjau data dari literatur penelitian sebelumnya, untuk mendapatkan temuan baru. Kajian Pengaruh Penggabungan Teknik Remediasi (Bio-Elektrokinetik Remediasi) Terhadap Remediasi Tanah Tercemar Hidrokarbon Minyak Bumi dilakukan dengan melakukan meta-analisis konsep pada artikel-artikel penelitian terkait yang telah dilakukan sebelumnya. Untuk mendapatkan artikel yang diinginkan dilakukan penyaringan melalui tahap-tahap penyaringan pada Gambar 1. Literatur yang digunakan bersumber dari database Scopus dan Directory of Open Access Journals (DOAJ).



Gambar 1. Alur Pengumpulan Data (Sumber: Asiah dkk, 2019)

Seleksi dari pencarian literatur dilakukan dengan melihat waktu publikasi. Literatur yang terseleksi adalah literatur yang dipublikasikan pada batas waktu 5 tahun terakhir. Penelitian ini dilakukan pada tahun 2021, oleh karena itu batas waktu penerbitan literatur yang dapat digunakan adalah dari tahun 2017 sampai dengan tahun 2021. Pembatasan tahunan publikasi dalam makalah ini bertujuan untuk memberikan data atau hasil terbaru yang berkaitan dengan penelitian, sehingga hasil penelitian-penelitian meta-analisis yang didapat akan lebih akurat mengikuti perkembangan saat ini. Pencarian literatur atau jurnal menggunakan kata kunci yang terkait dengan topik penelitian. Fungsi kata kunci adalah optimalisasi pencarian jurnal agar dapat diperoleh jurnal yang sesuai dengan kriteria topik penelitian dan sekaligus mempersempit pencarian jurnal. Melalui pencarian menggunakan kata kata kunci tersebut, muncul kata kunci baru yang merupakan hasil kombinasi dari topik-topik tersebut. Ditemukan 5 kata kunci terkait topik yang digunakan dalam pencarian jurnal atau artikel yang masing-masing memiliki terminologi. Fungsi dari adanya terminologi ini adalah sebagai tolak ukur pencarian jurnal atau artikel agar sesuai dengan kriteria atau

tujuan penelitian. Kata kunci tersebut adalah; Bioremediasi, Elektrokinetik Remediasi, Waktu Degradasi, Tanah terkontaminasi, dan Minyak Bumi.

3.HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Penggabungan Teknik Remediasi (Bio-Elektrokinetik Remediasi) Terhadap Remediasi Tanah Tercemar Hidrokarbon Minyak Bumi dapat diketahui dari efektifitasnya dan laju degradasi polutan. Berdasarkan pencarian literature menggunakan kata kunci Bioeremediasi tanah terkontaminasi minyak bumi pada data base scopus terdapat 2.437 artikel, kemudian dilakukan penyaring berdasarkan tahun publikasi yang terbit pada 5 tahun terakhir tersaring 678 artikel. Untuk menjawab tujuan penelitian mengetahui pengaruh penggabungan teknik remediasi terhadap laju degradasi pencarian artikel lebih lanjut dikerucutkan lagi dengan penambahan kata kunci elektrokinetik remediasi, sehingga di hasilkan 26 artikel, dan kemudian disaring kembali berdasarkan tahun terbit pada 5 tahun terakhir tersaring 9 artikel yang terkait topik pembahasan. Hasil pengkajian Perbandingan Efektifitas degradasi dan Waktu Degradasi Dalam Remediasi Tanah Terkontaminasi Minyak Bumi dapat dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Efektifitas Degradasi dan Waktu Degradasi Dalam Remediasi Tanah Terkontaminasi Minyak Bumi

Judul Artikel, Tahun dan Penulis	Topik Yang Diteliti	Hasil Penelitian/ Waktu Degrasi	Gap Penelitian
Effect of remediation strategies on biological activity of oil-contaminated soil - A field study, 2018 Polyak dkk.	Pengaruh kontaminasi minyak dan strategi remediasi yang berbeda (secara alami, biostimulasi, dan bioaugmentasi) pada parameter fisiko-kimia dan biologi.	<ul style="list-style-type: none"> • Dekontaminasi mencapai 90%, selama 9 tahun. • Penambahan bakteri (bioaugmentasi) meningkatkan laju biodegradasi sementara, biostimulasi lebih untuk tanah podsolik 	<ul style="list-style-type: none"> • Hanya meneliti pada tanah podsolik saja. • Lokasi studi St. Petersburg, Rusia (59°44'34''LU, 30°22'49''BT) dengan iklim kontinental lembab
Coupling electrokinetic remediation with phytoremediation for depolluting soil with petroleum and the use of electrochemical technologies for treating the effluent generated, 2019 Rocha dkk.	Peningkatan efisiensi fitoremediasi (phytoR) secara elektrokinetik remediasi (ER) dengan menggunakan elektroda grafit untuk depolusi tanah terkontaminasi minyak bumi.	Penyisihan total petroleum hydrocarbon (TPH), lebih efisien untuk ER-phytoR-RP (Reversal Polarity) yang dilakukan pada 1 V cm-1 setelah 20 hari	<ul style="list-style-type: none"> • Metode fitoremediasi (phytoR) dan elektrokinetik remediasi (ER) • Difokuskan pada efek medan listrik (dengan menerapkan arus searah (DC) dari polaritas pembalikan serta pertumbuhan bunga matahari
Remediation of resins contaminated soil by the combination of electrokinetic and bioremediation processes, 2020 Ma dkk.	Remediasi tanah yang terkontaminasi resin minyak bumi dengan teknologi elektrokinetik-bioremediasi (EK-BIO)	<ul style="list-style-type: none"> • Terjadi perubahan struktur resin. Jumlah mikroba, respirasi basal tanah dan aktivitas dehidrogenase berhubungan positif dengan degradasi resin, dan dapat ditingkatkan dengan medan listrik arus 	<ul style="list-style-type: none"> • Senyawa resin minyak bumi • Tanah terkontaminasi artifisial dari Universitas Pertambangan dan Teknologi China • Konsorsium mikroba; <i>Rhizobium sp.</i>, <i>Arthrobacter globiformis</i>,

Judul Artikel, Tahun dan Penulis	Topik Yang Diteliti	Hasil Penelitian/ Waktu Degrasi	Gap Penelitian
		searah. Selanjutnya bioremediasi akhirnya menyebabkan penurunan aromatisitas, kondensasi aromatisitas dan fitotoksisitas	<i>Clavibacter xyli</i> , <i>Curtobacterium flaccumfaciens</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> dan <i>Bacillus sp.</i>
Microbial community responses to soil parameters and their effects on petroleum degradation during bio-electrokinetic remediation, 2020 Fan, dkk.	Evaluasi interaksi antara total petroleum hydrocarbon (TPH), parameter tanah, dan komunitas mikroba selama proses remediasi bio-elektrokinetik	Keberlanjutan BIO-EK terkait erat dengan faktor lingkungan mikro tanah dan struktur komunitas mikroba. Selama proses remediasi 98 hari.	<ul style="list-style-type: none"> • Tanah artifisial salin-alkali di Yinchuan Cina • Hanya menggunakan bakteri resistensi salin-alkali yang tinggi dengan genera dominan: <i>Marinobacter</i> dan <i>Bacillus</i>
The combined application of a high voltage, low electrode spacing, and biosurfactants enhances the bio-electrokinetic, 2020 Gidudu & Chirwa.	Pengaruh variasi tegangan, jarak antar elektroda dan aplikasi biosurfaktan pada remediasi bioelektrokinetik tanah terkontaminasi petrokimia	<ul style="list-style-type: none"> • Penambahan biosurfaktan dan jarak elektroda yang lebih rendah meningkatkan desorpsi dan demulsifikasi yang menyebabkan pengurangan energi dengan mempercepat proses dekontaminasi 	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrokinetik remediasi dengan tegangan 30 V dan 10 V, jarak elektroda 335 mm dan 185 mm, • Penambahan 28 g/L biosurfaktan. • Sampel tanah terdiri dari 71% pasir, 20% lanau, dan 9% lempung dari Pretoria, Afrika Selatan
Development of laboratory-scale sequential electrokinetic and biological treatment of chronically hydrocarbon-impacted soils, 2020 Crognale dkk.	Penelitian berfokus pada remediasi tanah yang tercemar minyak disel secara kronis dengan menggabungkan teknik elektrokinetik remediasi dengan berbagai pendekatan bioremediasi.	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrokinetik remediasi (EKR) berlangsung selama 20-hari (1,0 V cm⁻¹ dengan pembalikan polaritas) dekontaminasi terjadi sebesar 47,2% dan 46,2%. 	<ul style="list-style-type: none"> • Minyak disel • EKR berdampak negatif terhadap populasi bakteri yang bersifat sementara. • Diperlukan biological treatment terlebih dahulu sebelum aplikasi EKR.
Electrokinetic-Fenton for the remediation low hydraulic conductivity soil contaminated with petroleum, 2020 Paixão dkk.	Penggunaan proses elektrokinetik Fenton (EK Fenton), sebagai pendekatan remediasi tanah.	<ul style="list-style-type: none"> • Efisiensi penyisihan total petroleum hydrocarbons (TPHs); 89% • Proses EK Fenton efisien untuk menghilangkan hidrokarbon dari jenis tanah kaolin 	<ul style="list-style-type: none"> • Menggunakan elektroda besi dengan elektrolit pendukung: air ledeng, H₂O₂, dan asam sitrat • Tanah kaolin dipilih karena konduktivitas hidroliknya rendah
Bio-electrokinetic remediation of crude oil contaminated soil enhanced by bacterial	Evaluasi pegabungan metoda bioremediasi (BIO) dan elektrokinetik (EK)	<ul style="list-style-type: none"> • Efisiensi biodegradasi menggunakan Aplikasi biosurfaktan bakteri (BS) dari 	<ul style="list-style-type: none"> • Hanya menggunakan tiga spesies bakteri (penghasil biosurfaktan)

Judul Artikel, Tahun dan Penulis	Topik Yang Diteliti	Hasil Penelitian/ Waktu Degrasi	Gap Penelitian
biosurfactant, 2021 Prakash dkk.	(bio-elektrokinetik (BIO-EK)) dalam remediasi hidrokarbon minyak bumi, menggunakan aplikasi biosurfaktan bakteri (BS) dari <i>Bacillus subtilis</i> AS2, <i>Bacillus licheniformis</i> AS3 dan <i>Bacillus velezensis</i> AS4	<i>Bacillus subtilis</i> AS2, <i>Bacillus licheniformis</i> AS3 dan <i>Bacillus velezensis</i> AS4 masing-masing sebesar 88%, 92% dan 97%. •Peningkatan laju biodegradasi tanah 92% dibandingkan EK (60%) 2 hari.	<ul style="list-style-type: none"> • Lokasi pengambilan sampel air laut: hutan bakau di Pichavaram, Tamil Nadu, India (lintang-11,4319° LU dan bujur- 79,7810°BT • Menggunakan sampel tanah artifisial
The effects of electrical heating and additives on the microbial remediation of petroleum-contaminated soils, 2021 Jia dkk.	Bioremediasi menggunakan reaktor termostatik menguji efek aditif bahan organik, surfaktan, dan penyedia oksigen dari sembilan strain jamur pendegradasi hidrokarbon pada tingkat penyisihan minyak mentah.	•Rata-rata laju penyisihan minyak mentah tertinggi pada suhu 25 °C (74,8%). Perlakuan optimal pada S1W1O1 (penambahan Tween80, pupuk organik, dan H2O2)	<ul style="list-style-type: none"> • Menggunakan sembilan strain jamur • Menggunakan reaktor termostatik dengan variasi suhu tanah 20 °C, 25 °C, dan 30 °C. • Menambahkan surfaktan sintetis dan pupuk organik • Sampel tanah hutan daerah dataran tinggi

Bedasarkan Tabel 1, diketahui bawah terdapat variasi efektifitas degradasi dan waktu degradasi pada remediasi tanah terkontaminasi minyak bumi. Efektifitas tertinggi dengan waktu degradasi tercepat terjadi pada penelitian Prakash dkk. (2021) dengan menggunakan metode Bio-elektrokinetik remediasi, efektifitas degradasi dapat mencapai 92 % dalam 2 hari (48 jam). Penambahan biosurfaktan bakteri (BS) dari *Bacillus subtilis* AS2, *Bacillus licheniformis* AS3 dan *Bacillus velezensis* AS4 ini yang dapat meningkatkan laju degradasi bila dibandingkan remediasi tanah yang hanya menggunakan Elektrokinetik remediasi hanya mencapai efektifitas degradasi 60 %. Dari Tabel 1 juga dapat diketahui bahwa Penelitian Bioremediasi terus berkembang memperbaiki kinerja yang sudah ada. Dari data yang ada pada diketahui bahwa, remediasi tanah terkontaminasi minyak bumi dipengaruhi oleh karakteristik senyawa polutan, karakteristik tanah dan karakteristik mikroba pendegradasi pada lokasi geografis yang berbeda. Penggabungan teknik remediasi dapat meningkatkan bioavailabilitas, efektifitas dan waktu degradasi dalam meremediasi hidrokarbon minyak bumi. Berikut kajian lebih lanjut terkait Teknik Bioremediasi dan Elektrokinetik remediasi dikaitkan dengan efektifitas degradasi, waktu degradasi, kelebihan, kekurangan, dan prospek pengembangannya di masa depan

3.1. Tanah Yang Terkontaminasi Hidrokarbon Minyak Bumi

Tanah merupakan salah satu komponen kunci dalam proses bioremediasi. Tanah merupakan salah satu media yang mendukung pertumbuhan tanaman dan mikroorganisme tanah. Sifat fisik dan kimia tanah sangat berpengaruh pada ketersediaan nutrisi, aerasi, kandungan air tanah dan aktifitas biologi di dalam tanah. Hal-hal penting yang perlu diperhatikan dalam proses biodegradasi kontaminan di dalam tanah diantaranya ukuran partikel-partikel tanah, porositas tanah, kandungan air tanah, komposisi kimia tanah, bagian tanah yang liat, dan bahan organik di dalam tanah. Dalam proses elektrokinetik remediasi unsur hara dan akseptor elektron ditransfer melalui pori-pori tanah sehingga meningkatkan bioavailabilitas kontaminan (Ramadan dkk., 2018).

Bedasarkan Tabel 1 diketahui karakteristik tanah yang berbeda mempengaruhi efektifitas degradasi dan waktu degradasi dalam meremediasi tanah terkontaminasi minyak bumi berbeda pula. Penelitian Polyak (2018) menghasilkan efektifitas degradasi mencapai 90 % pada tanah podsolik, selama periode 9 tahun. Penambahan bakteri (bioaugmentasi) meningkatkan laju biodegradasi hanya bersifat sementara, oleh karenanya biostimulasi adalah strategi remediasi yang lebih baik untuk tanah podsolik. Sementara Penelitian Fan dkk. (2020) menyimpulkan bahwa keberlanjutan BIO-EK terkait erat dengan faktor lingkungan mikro tanah dan struktur komunitas mikroba. Tanah artifisial salin-alkali yang digunakan dalam penelitian dapat diremediasi dalam 98 hari (Fan dkk., 2020)

Minyak bumi merupakan senyawa yang kompleks dari senyawa alifatik (seperti; alkena, alkana, sikloalkana), hidrokarbon monoaromatik (seperti; xilena, toluena, fenol, benzena, etilbenzena), dan hidrokarbon aromatik polisiklik (seperti; antrasena, fluorena, naftalena). Lepasnya senyawa-senyawa tersebut ke lingkungan dapat menyebabkan kerusakan pada organisme dan mengganggu kesehatan manusia. Kontaminasi air dan tanah dari berbagai jenis produk minyak bumi mengakibatkan migrasi hidrokarbon menuju zona tak jenuh, oleh sebab itu toksisitas polutan ini di lingkungan menjadi perhatian utama selama beberapa dekade terakhir (Cabral dkk., 2022). Pada tanah yang terkontaminasi hidrokarbon minyak bumi 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).

Berbagai Teknik remediasi telah diteliti dan diaplikasikan untuk mengurangi kontaminasi minyak bumi di lingkungan. Di antara pendekatan pemulihan lingkungan tercemar hidrokarbon minyak bumi tersebut, teknik bioremediasi sangat menonjol penggunaannya, karena polutan senyawa hidrokarbon ini dapat digunakan sebagai substrat untuk pertumbuhan mikroorganisme. Pada gilirannya, mikroorganisme dapat memainkan peran penting dengan kontribusi signifikan terhadap stabilisasi lingkungan yang terkena dampak (Cabral dkk., 2022).

3. 2. Bioremediasi

Bioremediasi telah banyak diaplikasikan untuk meremediasi lingkungan yang tercemar hidrokarbon minyak bumi oleh mikroba pendegradasi hidrokarbon minyak bumi, karena sebagian besar hidrokarbon minyak bumi relatif bersifat *biodegradable* di lingkungan (Wang dkk., 2016) Sebagian besar penelitian memanfaatkan mikroorganisme *endogenous* yang hidup di lokasi tercemar minyak bumi, karena memiliki kemampuan untuk mendegradasi kontaminan hidrokarbon minyak bumi, walaupun proses degradasi senyawa tersebut terhambat oleh sifat *recalcitrant* dan bioavailabilitas yang rendah dari polutan (Patowary dkk., 2018).

Terdapat dua acara pendekatan untuk meningkatkan keefektifan penggunaan mikroorganisma dalam bioremediasi, yaitu teknik *biostimulation* dengan menambahkan nutrisi tertentu yang bertujuan merangsang aktivitas mikroorganisma setempat (*indigenous*); dan yang kedua teknik *bioaugmentasi*, dengan mengintroduksi mikroorganisma tertentu pada daerah yang akan diremediasi. Dalam beberapa hal, teknik *bioaugmentasi* juga diikuti dengan penambahan nutrisi tertentu. Tantangan dalam proses bioremediasi selain senyawa yang didegradasi merupakan senyawa kompleks juga mengandung senyawa *recalcitrant* yang sulit didegradasi dan bersifat toksik, sehingga menyebabkan laju degradasinya berjalan lambat. Lambatnya laju degradasi limbah organik dipengaruhi oleh enzim-enzim degradatif mikroba yang tidak mampu mengkatalis reaksi degradasi limbah yang tidak alami /

xenobiotik, sifat kelarutan polutan dalam air sangat rendah, dan limbah organik tersebut bersifat toksik bagi mikroorganisma (Polyak dkk., 2018). Selain itu, pengaruh lingkungan seperti pH, temperatur, dan kelembaban tanah juga sangat berperan dalam menentukan kesuksesan proses bioremediasi pada tanah terkontaminasi. Meskipun telah banyak penelitian tentang bioremediasi tanah yang terkontaminasi hidrokarbon dengan memanfaatkan spesies mikroba *endogenous* atau konsorsium mikroba *endogenous*, namun untuk aplikasinya yang luas masih dibatasi oleh kemampuan adaptasi mikroorganisme. Mikroorganisme memerlukan adaptasi terhadap kondisi ekologi yang beragam di berbagai wilayah di dunia (Patowary dkk., 2018).

3. 3. Bioavailibilitas

Bioavailibitas polutan sangat menentukan laju degradasi pada proses bioremediasi. Bioavailibilitas yang rendah dapat memperlambat laju degradasi. Penggunaan biosurfaktan dapat meningkatkan bioavailibilitas polutan pada proses degradasi (Patowary dkk. , 2018).

Biosurfaktan adalah biomolekul amfifilik yang memiliki komposisi heterogen seperti glikolipid, asam lemak, lipida, polisakarida, serta polimer kompleks. Biosurfaktan bersifat tidak beracun, biodegradable dan sangat stabil pada rentang kondisi lingkungan yang luas bila dibandingkan dengan surfaktan sintesis. Pada proses bioremediasi, biosurfaktan berperan sebagai precursor distribusi kontaminan minyak yang bersifat hidrofobik menjadi lebih larut dalam air, sehingga meningkatkan bioavailibilitasnya yang menjadi faktor pembatas dan mengendalikan laju biodegradasi untuk sebagian besar senyawa hidrofobik. Biosurfaktan juga diharapkan dapat meningkatkan efisiensi bioremediator yang mencakup mikroorganisme hidup dengan meningkatkan hidrofobisitas membran selnya dan mengubah permeabilitas membran yang meningkatkan kemampuannya untuk menyerap senyawa hidrokarbon dan memanfaatkannya, sehingga mengarah pada biodegradasinya. Dengan demikian, penggunaan biosurfaktan dalam proses bioremediasi dapat mempermudah dan mempercepat laju biodegradasi (Patowary dkk. , 2018).

Biosurfaktan dapat dihasilkan secara *in situ* dengan dirangsang oleh kontaminan organik seperti substrat yang tidak mengabaikan toleransinya terhadap berbagai kondisi ekstrim dari pH, suhu, dan kekuatan ionik di lingkungan. Teknik bioremediasi dapat digabungkan dengan remediasi elektrokimia untuk meningkatkan proses remediasi. Sebelumnya belum ada penelitian yang menggabungkan bioremediasi dan penggunaan biosurfaktan untuk meningkatkan proses remediasi elektrokimia (Gidudu & Chirwa, 2020)

Penelitian *Gidudu & Chirwa, (2020) tentang Biosurfactants as demulsification enhancers in bio-electrokinetic remediation of petroleum contaminated soil* hasilkan bahwa biosurfaktan dapat meningkatkan proses remediasi elektrokinetik tanah yang terkontaminasi minyak bumi. Peningkatan konsentrasi biosurfaktan berpengaruh signifikan terhadap remediasi minyak. Kosentrasi optimal penggunaan biosurfaktan yaitu 84 g/L menyebabkan biodegradasi tertinggi, sementara itu kosentrasi biosurfaktan 56 g/L menyebabkan ekstraksi minyak tertinggi dari lapisan tanah. Biosurfaktan dapat meningkatkan *bioavailability* dari kontaminan hidrokarbon bagi mikroba dalam reaktor elektrokinetik yang dibuktikan oleh kandungan karbon yang rendah di dalam tanah setelah percobaan. Kondisi pH yang tidak konstan mempengaruhi pertumbuhan mikroba dan biodegradasi kontaminan, namun kondisi ini tidak berpengaruh terhadap muatan permukaan biosurfaktan. Hasil penelitian menunjukkan terdapat potensi yang besar untuk biosurfaktan *in situ* dalam remediasi bio-elektrokinetik di lokasi yang terkontaminasi. Kehadiran biosurfaktan secara signifikan membantu dalam pemulihan minyak dan biodegradasi dalam 96 jam pertama percobaan. Penelitian lebih lanjut terkait studi kinetika proses perlu dikembangkan, dan dapat dilakukan

kuantifikasi biosurfaktan yang dapat diperoleh kembali, penggunaan energi selama proses remediasi dan produksi biosurfaktan dalam reaktor (*in situ*) juga dapat dipelajari lebih lanjut (Gidudu & Chirwa, 2020)

3. 4. Elektrokinetik Remediasi

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 logam berat dan senyawa organik, karena aplikasinya yang spesifik, dalam kemampuannya untuk dioperasikan dalam matriks yang halus dan permeabilitas rendah. Saat ini perhatian khusus aplikasi elektrokinetik diberikan pada peningkatan kemampuannya dan pengurangan konsumsi energi listrik dengan integrasi energi terbaru (Cabral dkk., 2022)

Ektrokinetik remediasi pada tanah terkontaminasi merupakan teknologi yang sangat direkomendasikan untuk meremediasi secara *in-situ* pada tanah dengan permeabilitas rendah dengan nilai konduktivitas hidraulik rendah (yaitu, lokasi tercemar di mana transpor hidrodinamik tidak sesuai). Remediasi dengan teknik elektrokinetik 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 superfisial). 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 Elektrokinetik remediasi telah berhasil dan menghemat biaya dalam menghilangkan berbagai jenis kontaminan di tanah dengan permeabilitas rendah (Cabral dkk., 2022; Mena dkk., 2016).

Elektrokinetik (EK) remediasi berdasarkan proses elektrokimia di mana arus listrik digunakan untuk mengekstraksi spesies kimia dari tanah. Biasanya, arus langsung dengan intensitas rendah atau gradien potensial rendah diterapkan pada beberapa elektroda inert yang dimasukkan ke dalam tanah sehingga polutan dalam medan listrik bergerak menuju anoda atau katoda. Air atau fluida interstisial yang dimasukkan disebut fluida proses, digunakan sebagai konduktif. Tersedianya 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)

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. Lebih lanjut, teknik elektrokinetik remediasi melibatkan fenomena tambahan tertentu di dalam tanah, seperti pemanasan listrik karena penurunan ohmik terkait dengan konduktivitas ionik tanah yang rendah, kehilangan nutrisi dari tanah karena proses transpor elektrokinetik, dan gradien

pH yang kuat pada elektroda yang dekat. Fenomena ini dapat menjadi ketidaknyamanan yang kuat bagi kinerja proses biologis di dalam tanah. Strategi pembalikan polaritas (yaitu, perubahan periodik dalam polaritas medan listrik dapat diterapkan ke tanah) telah direkomendasi sebagai cara sederhana dalam mengatasinya (Mena dkk., 2016).

Hasil tinjauan komprehensif dari penelitian terbaru terkait proses Elektrokinetik (EK) yang terintegrasi untuk menghilangkan polutan organik di tanah telah dilakukan, teknologi yang paling umum digunakan, diantaranya *EK soil washing*, Pegabungan 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 dan karakteristik yang berbeda pada tanah yang terkontaminasi memerlukan evaluasi awal untuk menentukan kondisi operasional terbaik. Tren terbaru dalam remediasi EK tanah terkontaminasi, dengan mempertimbangkan pengurangan biaya energi melalui penerapan sumber energi terbarukan sebagai pendekatan baru terkait perkembangannya (Fdez-Sanromán dkk., 2021).

4. KESIMPULAN

Industri minyak dan gas bumi (Migas) memegang peran penting dalam pertumbuhan ekonomi, rangkaian kegiatan industri migas dapat menimbulkan pencemaran lingkungan, limbah migas harus dikelola untuk menghindari degradasi kualitas lingkungan dan sumber daya alam. Hidrokarbon minyak bumi bersifat hidrofobik, recalcitrant dan persisten di lingkungan. Remediasi tanah terkontaminasi minyak masih menjadi topik hangat studi lingkungan dan reservasi ekologi. Teknik bioremediasi telah banyak digunakan dalam remediasi tanah dengan alasan; konsumsi energinya rendah, biayanya murah, dan tidak menimbulkan polusi sekunder namun aplikasinya yang luas masih dibatasi oleh karakteristik polutan dan karakteristik mikroba yg memerlukan adaptasi berbeda terhadap kondisi lingkungan berbeda yang mempengaruhi laju degradasi. Teknologi remediasi tunggal bukan solusi terbaik untuk remediasi tanah yang terkontaminasi minyak bumi yang bersifat kompleks. Penggabungan teknik remediasi (elektrokinetik remediasi) dan bioremediasi yang dapat meningkatkan biostimulasi, mempercepat waktu degradasi, meningkatkan efektifitas remediasi hidrokarbon minyak bumi dengan aplikasi sinergis; biosurfaktan, bioremediasi, dan elektrokinetik remediasi. Namun evaluasi awal diperlukan untuk menentukan kondisi operasional terbaik di lapangan. Perkembangan remediasi yang melibatkan elektrokinetik remediasi pada tanah terkontaminasi adalah dengan mempertimbangkan pengurangan biaya energi melalui penerapan sumber energi terbarukan sebagai pendekatan baru terkait perkembangannya.

DAFTAR PUSTAKA

- Asiah, N., David, W., Ardiansyah, and Madonna, S. (2019): Review on pesticide residue on rice, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 379(1).
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/379/1/012008>
- 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>
- Chen, F. Xiaoxiao Li, F. Qianlin Zhu, Jing Ma, Huping Hou, Shaoliang Zhang (2019): Bioremediation of petroleum-contaminated soil enhanced by aged refuse, *Journal of*

- Chemosphere 222, 98–105
- Crognale, S., Cocarta, D. M., Streche, C., and D'Annibale, A. (2020): Development of laboratory-scale sequential electrokinetic and biological treatment of chronically hydrocarbon-impacted soils, *New Biotechnology*, 58, 38–44. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.04.002>
- Fan, R., Ma, W., dan Zhang, H. (2020): Microbial community responses to soil parameters and their effects on petroleum degradation during bio-electrokinetic remediation. *Science of the Total Environment*, 748. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142463>
- Fdez-Sanromán, A., Pazos, M., Rosales, E., & Sanromán, M. A. (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., dan Chirwa, E. M. N. (2020): The combined application of a high voltage, low electrode spacing, and biosurfactants enhances the bio-electrokinetic remediation of petroleum contaminated soil, *Journal of Cleaner Production*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122745>
- Gidudu, B., dan 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>
- Gu, J. D. (2020): On environmental biotechnology of bioremediation. *Applied Environmental Biotechnology*, 5(2), 3–8. <https://doi.org/10.26789/AEB.2020.02.002>
- Jia, H., Zhang, Y., Zhang, G., Zou, L., and Zhang, B. (2021): The effects of electrical heating and additives on the microbial remediation of petroleum-contaminated soils, *Journal of Forestry Research*, 32(6), 2609–2618. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01237-0>
- Ma, J., Zhang, Q., Chen, F., Zhu, Q., Wang, Y., & Liu, G. (2020): Remediation of resins-contaminated soil by the combination of electrokinetic and bioremediation processes. *Environmental Pollution*, 260. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114047>
- Mena, E., Villaseñor, J., Rodrigo, M. A., & Cañizares, P. (2016): Electrokinetic remediation of soil polluted with insoluble organics using biological permeable reactive barriers: Effect of periodic polarity reversal and voltage gradient. *Chemical Engineering Journal*, 299, 30–36. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.049>
- Paixão, I. C., López-Vizcaíno, R., Solano, A. M. S., Martínez-Huitle, C. A., Navarro, V., Rodrigo, M. A., and dos Santos, E. V. (2020): Electrokinetic-Fenton for the remediation low hydraulic conductivity soil contaminated with petroleum, *Chemosphere*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126029>
- Patowary, R., Patowary, K., Kalita, M. C., & Deka, S. (2018): Application of biosurfactant for enhancement of bioremediation process of crude oil contaminated soil. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 129(November 2017), 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.01.004>
- Polyak, Y. M., Bakina, L. G., Chugunova, M. V, Mayachkina, N. V, Gerasimov, A. O., & Bure, V. M. (2018): Effect of remediation strategies on biological activity of oil-contaminated soil - A field study. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 126, 57–68. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.10.004>
- Prakash, A. A., Prabhu, N. S., Rajasekar, A., Parthipan, P., AlSalhi, M. S., Devanesan, S., & Govarthanan, 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>
- 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.2018.04.065>

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>