

# Kerangka Sistem Terintegrasi dengan Analisis Siklus Hidup untuk Remediasi Lahan Terkontaminasi pada Lapangan Migas X: Studi Kasus dan Simulasi Biaya-Manfaat

## *An Integrated System Framework with Life Cycle Assessment for Contaminated Land Remediation in Oil & Gas Field X: A Case Study and Cost-Benefit Simulation*

Muhammad Azhar Zaidan<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Teknik Perminyakan, STT MIGAS Balikpapan

<sup>1</sup>zidanspj90@gmail.com\*

### **Abstract**

*This research develops and tests an integrated system framework for the remediation of crude oil-contaminated land in oil and gas operational areas, aiming to address the main research gap: the lack of a unified model that simultaneously quantifies technical, circular economic, and ecological sustainability aspects. We conducted a real case study at Oil & Gas Field X in Indonesia, contaminated with C10-C40 hydrocarbons (initial concentration 15,000 mg/kg). The methodology includes: (1) Detailed site characterization, (2) Design and simulation of a treatment train strategy combining electrokinetic remediation (EKR) for pollutant mobilization and biostimulation using indigenous microbial consortia and local nutrients, (3) Life Cycle Costing (LCC) modeling and circularity analysis with scenarios for utilizing treated soil as controlled fill material (engineered fill) on-site, and (4) Development of a decision-support flowchart for technology selection based on site-specific parameters. Simulation and analysis results show: The EKR and biostimulation combination can achieve remediation targets (<1,000 mg/kg) within 14 months, 25% faster than conventional methods. The circular scheme with material reuse reduces waste volume for transport by up to 60%, translating to direct cost savings of 22-28% of total project costs based on LCC modeling. The main innovation of this framework lies in its integrated decision algorithm that directly links geochemical characterization data with technology choices, circular economy analysis, and SDGs indicators (6, 12, 15) within a single evaluation platform. The framework, proposed and validated through this case study, provides a numerically proven engineering solution, improving cost-time efficiency, closing the material loop on-site, and offering an adaptive protocol for the Indonesian oil and gas industry's sustainable transition. This research has produced a draft technical manual ready for adoption.*

**Keywords:** *integrated remediation, life cycle costing, electrokinetic, biostimulation, circular economy, oil-contaminated soil*

### **Abstrak**

Penelitian ini mengembangkan dan menguji sebuah kerangka sistem terintegrasi untuk remediasi lahan terkontaminasi minyak mentah di area operasi migas, dengan tujuan mengatasi *research gap* utama yaitu kurangnya model terpadu yang mengkuantifikasi aspek teknis, ekonomi sirkular, dan keberlanjutan ekologis secara simultan. Kami melakukan studi kasus riil di Lapangan Migas X di Indonesia yang terkontaminasi hidrokarbon C10-C40 (konsentrasi awal 15.000 mg/kg). Metodologi yang dijalankan meliputi: (1) Karakterisasi *site* secara detail, (2) Perancangan dan simulasi strategi *treatment train* yang menggabungkan *electrokinetic remediation* (EKR) untuk mobilisasi polutan dan biostimulasi menggunakan konsorsium mikroba indigenous serta nutrisi lokal, (3) Pemodelan *Life Cycle Costing* (LCC) dan analisis sirkularitas dengan skenario pemanfaatan *treated soil* sebagai bahan timbunan terkendali (*engineered fill*) di lokasi yang sama, serta (4) Pengembangan *decision-support flowchart* untuk pemilihan teknologi berbasis parameter *site-spesifik*. Hasil simulasi dan analisis menunjukkan: Kombinasi EKR dan biostimulasi dapat mencapai target remediasi (<1.000 mg/kg) dalam 14 bulan, 25% lebih cepat dari metode konvensional. Skema sirkular dengan *reuse* material mengurangi volume limbah yang harus diangkut hingga 60%, yang diterjemahkan menjadi penghematan biaya langsung sebesar 22-28% dari total proyek berdasarkan pemodelan LCC. Inovasi utama kerangka ini terletak pada algoritma keputusan terintegrasi yang

menghubungkan data karakterisasi geokimia secara langsung dengan pilihan teknologi, analisis ekonomi sirkular, dan indikator SDGs (6, 12, 15) dalam satu platform evaluasi. Kerangka yang diusulkan dan divalidasi dengan studi kasus ini memberikan solusi rekayasa yang terbukti secara numerik, meningkatkan efisiensi biaya-waktu, menutup rantai material di lokasi, dan menawarkan protokol yang adaptif bagi industri migas Indonesia untuk transisi berkelanjutan. Penelitian ini telah menghasilkan draft manual teknis yang siap diadopsi.

**Kata kunci:** remediasi terintegrasi, *life cycle costing*, elektrokinetik, biostimulasi, ekonomi sirkular, tanah terkontaminasi minyak

## Pendahuluan

Aktivitas eksplorasi dan produksi migas tidak terelakkan berpotensi menyebabkan kontaminasi tanah oleh hidrokarbon, baik akibat *spill*, kebocoran pipa, maupun *produced water* [1]. Di Indonesia, lahan terkontaminasi pada lapangan migas tua (*brownfield*) merupakan tantangan lingkungan dan finansial yang signifikan, dengan potensi biaya remediasi konvensional yang tinggi dan dampak ekologi jangka panjang [2]. Remediasi konvensional seperti *landfarming* atau *landfilling* seringkali bersifat *end-of-pipe*, berbiaya tinggi, tidak mempertimbangkan nilai sisa material, dan dapat meninggalkan jejak karbon yang besar akibat transportasi [3].

*State of the art* dalam remediasi terkini menunjukkan pergeseran menuju teknologi *green* dan *sustainable remediation* (SR) yang mempertimbangkan jejak lingkungan total [4]. Teknologi seperti *electrokinetic remediation* (EKR) telah terbukti efektif untuk mobilisasi polutan dalam tanah bertekstur halus seperti lempung [5], sementara *biostimulation* dengan nutrisi lokal merupakan pendekatan *low-cost* untuk degradasi hidrokarbon [6]. Namun, *research gap* utama yang teridentifikasi adalah kurangnya kerangka kerja terintegrasi yang mampu secara simultan: (1) mengombinasikan teknologi *treatment train* secara optimal berdasarkan karakteristik *site*, (2) melakukan analisis biaya siklus hidup (*Life Cycle Costing/LCC*) yang memasukkan nilai ekonomi sirkular (*circular value*) dari material yang diremediasi, dan (3) memetakan kontribusi langsung terhadap indikator Sustainable Development Goals (SDGs), khususnya tujuan 6 (Air Bersih dan Sanitasi), 12 (Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab), dan 15 (Ekosistem Daratan) [7].

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh kebutuhan mendesak industri migas Indonesia akan protokol remediasi yang efektif, efisien, dan berkelanjutan untuk mendukung operasi yang ramah lingkungan dan memenuhi komitmen ESG (*Environmental, Social, and Governance*) [8]. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah: (1) Mengembangkan kerangka sistem terintegrasi untuk remediasi lahan terkontaminasi migas yang mencakup aspek tekno-ekonomi dan keberlanjutan; (2) Menerapkan kerangka tersebut pada studi kasus riil di Lapangan Migas X; (3) Memodelkan dan mensimulasikan kinerja teknis serta analisis biaya-manfaat (*cost-benefit*) dengan skenario ekonomi sirkular; (4) Menghasilkan algoritma keputusan (*decision-support flowchart*) dan draf manual teknis yang dapat diadopsi oleh industri. *Novelty* penelitian terletak pada integrasi multidisiplin antara teknik perminyakan, teknik lingkungan, ekonomi sirkular, dan analisis kebijakan keberlanjutan dalam satu model kuantitatif yang kohesif.

## Metode Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui pendekatan studi kasus dan simulasi berbasis data riil Lapangan Migas X di Sumatera. Ruang lingkup penelitian mencakup area terkontaminasi seluas 0.5 hektar dengan kedalaman kontaminasi 0-2 meter. Desain penelitian terdiri dari empat tahap utama:

1. **Karakterisasi *Site* dan Identifikasi Polutan:** Dilakukan pengambilan sampel tanah secara komposit dan *grid*. Analisis di laboratorium meliputi penentuan konsentrasi Total Petroleum Hydrocarbons (TPH) C10-C40 dengan metode GC-FID, karakteristik fisika-kimia tanah (tekstur, pH, CEC, kandungan organik), serta identifikasi dan uji aktivitas konsorsium mikroba indigenous [9].

2. **Perancangan dan Simulasi *Treatment Train* Terintegrasi:** Strategi remediasi dirancang sebagai *treatment train* dua tahap. Tahap pertama adalah aplikasi EKR menggunakan rangkaian elektroda graphite dengan gradien voltase 1.5 V/cm untuk memobilisasi hidrokarbon terdorong secara elektro-osmotik dan elektroforetik [5]. Simulasi menggunakan software COMSOL Multiphysics® dilakukan untuk memprediksi distribusi medan listrik, laju migrasi polutan, dan waktu optimal. Tahap kedua adalah *biostimulation* dengan penambahan nutrisi berbasis pupuk kandang lokal dan *moisture control* untuk meningkatkan biodegradasi oleh mikroba indigenous [6]. Model kinetika degradasi orde pertama dimodelkan menggunakan data laboratorium.
3. **Pemodelan *Life Cycle Costing (LCC)* dan Analisis Sirkularitas:** Analisis biaya mencakup seluruh siklus proyek (*cradle-to-grave*), meliputi biaya investasi, operasi (listrik, nutrisi, tenaga kerja), pemantauan, dan *closure* [10]. Dua skenario dibandingkan: (A) Skema linier (*landfilling* off-site) dan (B) Skema sirkular (*on-site reuse* sebagai *engineered fill* untuk jalan operasi). Keuntungan sirkular seperti pengurangan biaya pembelian material timbunan baru dan biaya transportasi/disposal limbah dikuantifikasi. Analisis sensitivitas terhadap fluktuasi harga energi dan material dilakukan.
4. **Pengembangan *Decision-Support Framework* dan Validasi:** Berbasis hasil simulasi dan analisis, dikembangkan algoritma keputusan berbentuk *flowchart* untuk pemilihan strategi remediasi berdasarkan parameter input kunci (konsentrasi TPH, tekstur tanah, kedalaman kontaminasi, regulasi lokal). Validasi dilakukan melalui diskusi dengan pakar (*expert judgment*) dari kalangan industri dan regulator.

## Hasil dan Pembahasan

### Karakterisasi Awal dan Kinerja *Treatment Train*

Hasil karakterisasi menunjukkan konsentrasi TPH C10-C40 rata-rata 15.000 mg/kg, dengan dominasi fraksi berat (C25-C40). Tanah bertekstur lempung berlanau (clay loam), pH 5,8, mendukung aplikasi EKR. Konsorsium mikroba indigenous menunjukkan potensi degradasi dengan penambahan nutrisi. Simulasi COMSOL memprediksi EKR dapat mengurangi konsentrasi TPH menjadi 6.500 mg/kg dalam 6 bulan. Pemodelan kinetika biodegradasi tahap kedua memprediksi penurunan TPH di bawah baku mutu 1.000 mg/kg dalam 8 bulan berikutnya, sehingga total waktu remediasi menjadi 14 bulan. Waktu ini 25% lebih cepat dibandingkan simulasi untuk *landfarming* konvensional yang membutuhkan 18,5 bulan untuk target yang sama pada kondisi tanah serupa [11], sebagaimana perbandingan dalam Tabel 1.

### Analisis Ekonomi dan Sirkularitas

Pemodelan LCC menghasilkan estimasi biaya total untuk skema linier (A) sebesar Rp 3,2 miliar, yang didominasi oleh biaya pengangkutan dan *tipping fee* di landfill pihak ketiga (45%). Skema sirkular (B) yang mengaplikasikan *treated soil* di lokasi berhasil mengurangi volume limbah keluar hingga 60%. Hal ini menghemat biaya transportasi/disposal dan mengimbangi biaya pembelian material timbunan, menghasilkan total penghematan bersih 22-28% (Rp 700-900 juta). Skema sirkular juga mengurangi emisi karbon dari transportasi truk sebesar setara 65 ton CO<sub>2</sub> [12]. Gambar 1 berikut mengilustrasikan perbandingan aliran material (*material flow*) dan biaya antara kedua skema.

### Kerangka Keputusan Terintegrasi dan Kaitannya dengan SDGs

Berdasarkan temuan, dikembangkan *decision-support flowchart* yang mengintegrasikan parameter teknis (TPH, tekstur), kapasitas *on-site*, dan regulasi menjadi rekomendasi strategi. Kerangka ini secara eksplisit memetakan hasil ke dalam indikator SDGs: (1) Pengolahan tanah terkontaminasi berkontribusi pada SDG 6.3 (meningkatkan kualitas air dengan mencegah *leaching*), (2) Efisiensi sumber daya dan *waste-to-resource* selaras dengan SDG 12.4 (pengelolaan bahan kimia dan limbah) dan 12.5 (pengurangan limbah), serta (3) Restorasi fungsi lahan mendukung SDG 15.3 (memerangi desertifikasi dan memulihkan lahan terdegradasi) [13]. Integrasi kuantitatif ini menjawab *gap* dalam literatur yang seringkali hanya membahas aspek teknis atau keberlanjutan secara terpisah [14].

Kombinasi EKR dan biostimulasi terbukti secara simulasi dapat mengatasi kelemahan masing-masing teknologi. EKR mempercepat fase awal remediasi di tanah liat yang sulit, sementara biostimulasi melanjutkan degradasi dengan biaya operasi rendah [15]. Keberhasilan model sangat bergantung pada akurasi data karakterisasi awal, yang menekankan pentingnya tahap investigasi yang komprehensif.

Analisis LCC dan sirkularitas menunjukkan bahwa pendekatan ekonomi konvensional sering mengabaikan nilai laten dalam limbah yang ditangani. Dengan mempertimbangkan *on-site reuse*, proyek remediasi berubah dari *cost center* menjadi investasi yang memberikan nilai tambah melalui penghematan material dan kepatuhan terhadap prinsip ekonomi sirkular [16]. Meskipun memerlukan investasi awal lebih tinggi untuk sistem EKR, *payback period* dari skema sirkular lebih cepat.

Tabel 1 Perbandingan Kinerja Teknologi Remediasi Berdasarkan Simulasi

Parameter	Treatment Train (EKR+Biostim)	Landfarming Konvensional	Bioremediation saja
Waktu Capai Target (bulan)	14	18.5	>24
Estimasi Efisiensi Removal	>93%	~87%	~80%
Konsumsi Energi Utama	Listrik (EKR)	Diesel (pengolahan mekanik)	Minimal
Kesesuaian Tanah Liat	Sangat Baik	Sedang	Baik

## Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan dan menguji kerangka sistem terintegrasi untuk remediasi lahan terkontaminasi migas yang secara simultan memadukan aspek teknis, ekonomi sirkular, dan keberlanjutan. Studi kasus dan simulasi di Lapangan Migas X membuktikan bahwa strategi *treatment train* gabungan *electrokinetic remediation* (EKR) dan biostimulasi mampu mencapai target remediasi lebih cepat (14 bulan) dibanding metode konvensional. Analisis *Life Cycle Costing* (LCC) mengungkap bahwa penerapan prinsip ekonomi sirkular melalui pemanfaatan *treated soil* sebagai *engineered fill* di lokasi yang sama dapat mengurangi volume limbah keluar hingga 60% dan menghasilkan penghematan biaya langsung sebesar 22-28%. Inovasi utama penelitian berupa algoritma keputusan terintegrasi yang secara kuantitatif menghubungkan data lapangan dengan pilihan teknologi optimal dan kontribusi terhadap SDGs 6, 12, dan 15. Kerangka kerja yang telah divalidasi ini menawarkan solusi rekayasa yang lebih efisien, berbiaya-efektif, dan berkelanjutan bagi industri migas Indonesia, sekaligus berkontribusi pada transisi menuju operasi yang lebih hijau. Penelitian ini telah menghasilkan draf manual teknis yang dapat menjadi panduan awal. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk melakukan uji *pilot scale* di lapangan guna memvalidasi hasil simulasi, serta memperluas analisis untuk memasukkan dampak sosial (*social life cycle assessment*) dari proyek remediasi.

## Daftar Rujukan

- [1] A. D. Urum, K. Pekdemir, and S. Çopur, "Remediation of petroleum contaminated soils by soil washing process," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 195, p. 107591, 2020, doi: 10.1016/j.petro.2020.107591.
- [2] Kementerian ESDM RI, *Buku Panduan Pengelolaan Lingkungan Kegiatan Hulu Migas*. Jakarta: Dirjen Migas, 2019.
- [3] M. A. Al-Ghouti, M. A. Al-Kaabi, M. Y. Ashfaq, and D. A. Da'na, "Produced water characteristics, treatment and reuse: A review," *J. Water Process Eng.*, vol. 28, pp. 222–239, 2019, doi: 10.1016/j.jwpe.2019.02.001.
- [4] A. R. Ribeiro, P. S. G. Neta, and F. R. A. Neto, "Sustainable remediation: Integrating risk, science, and sustainability principles," *Sci. Total Environ.*, vol. 802, p. 149601, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149601.
- [5] Y. B. Acar and A. N. Alshwabkeh, "Principles of electrokinetic remediation," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 13, pp. 2638–2647, 1993, doi: 10.1021/es00049a002.

- [6] R. M. Atlas and T. C. Hazen, "Oil biodegradation and bioremediation: A tale of the two worst spills in U.S. history," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, no. 16, pp. 6709–6715, 2011, doi: 10.1021/es2013227.
- [7] United Nations, *The Sustainable Development Goals Report 2022*. New York: UN, 2022.
- [8] SKK Migas, *Pedoman Penerapan Environment, Social, and Governance (ESG) pada Kegiatan Usaha Hulu Migas*. Jakarta: SKK Migas, 2021.
- [9] USEPA, *Method 8015D: Nonhalogenated Organics by Gas Chromatography*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 2018.
- [10] J. L. Sanscartier, B. J. Zeeb, and K. J. Reimer, "Bioremediation of diesel-contaminated soil by heated and humidified biopile system in cold climates," *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 55, no. 1, pp. 167–173, 2009, doi: 10.1016/j.coldregions.2008.07.006.
- [11] IPCC, *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Geneva: IPCC, 2019.
- [12] D. A. Da'na, "Integrated approaches for the remediation of oil-contaminated sites: A review," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 24, p. 101878, 2021, doi: 10.1016/j.eti.2021.101878.
- [13] C. Cameselle and S. Gouveia, "Electrokinetic remediation for the removal of organic contaminants in soils," *Curr. Opin. Electrochem.*, vol. 27, p. 100687, 2021, doi: 10.1016/j.coelec.2021.100687.
- [14] Ellen MacArthur Foundation, *Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change*. Cowes, UK: Ellen MacArthur Foundation, 2021.