

Evaluasi Holistik Keberlanjutan *Chemical Enhanced Oil Recovery (CEOR)* dengan *Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA)*: Studi Konseptual Berbasis Data Industri Indonesia untuk Mendukung SDGs 2030

A Holistic Sustainability Assessment of Chemical Enhanced Oil Recovery (CEOR) using Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA): A Conceptual Study Based on Indonesian Industry Data to Support the 2030 SDGs

Muhammad Rayhan Alvito Fahrezy^{1*}

¹Teknik Perminyakan, STT MIGAS Balikpapan

¹rayhanalvitof@gmail.com*

Abstract

This study develops a conceptual and quantitative framework to assess the sustainability performance of Chemical Enhanced Oil Recovery (CEOR) using an integrated Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) methodology. Addressing the research gap regarding the lack of a contextual triple-bottom-line (environmental-economic-social) assessment model for the Indonesian upstream oil and gas industry, this study does not employ a single case study but constructs a parametric model based on secondary operational data from "X" field (sandstone, mature) and life cycle inventory databases (Ecoinvent). The applied methodology is a cradle-to-gate simulation for a polymer-surfactant injection scenario, with explicit system boundaries encompassing: chemical production, logistics transportation, injection operations, and produced water management. LCA analysis uses OpenLCA software to calculate carbon footprint (kg CO₂-eq/bbl) and freshwater ecotoxicity; LCC calculates levelized cost; while sLCA adopts qualitative indicators from UNEP guidelines to assess potential social risk in "worker health" and "local community acceptance" categories. Preliminary simulation results identify critical sustainability hotspots: commercial chemical production phase dominantly contributes (>65%) to the carbon footprint, while operational energy cost is the main cost driver. The innovative contribution of this research is a structured LCSA roadmap adoptable for preliminary CEOR project screening, which explicitly links each hotspot to specific SDG targets—primarily SDG 9 (low-carbon industrial innovation) and SDG 12 (resource efficiency). Resulting policy recommendations focus on the importance of holistic sustainability criteria in chemical tendering and proactive communication-based social mitigation strategies. The engineering conclusion affirms that the LCSA approach serves not only as an assessment tool but as a front-end loading design framework to achieve economically viable and socially accountable CEOR.

Keywords: *chemical EOR, sustainability, life cycle assessment, LCC, social LCA, SDGs*

Abstrak

Penelitian ini menyusun kerangka kerja konseptual dan kuantitatif untuk mengevaluasi kinerja keberlanjutan *Chemical Enhanced Oil Recovery (CEOR)* dengan metode *Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA)* terpadu. Untuk mengisi celah penelitian yaitu kurangnya model penilaian triad (lingkungan-ekonomi-sosial) yang kontekstual bagi industri hulu migas Indonesia, penelitian ini tidak menggunakan studi kasus tunggal, melainkan membangun model parametrik berdasarkan data operasional sekunder dari Lapangan "X" (batupasir, lapangan matang) dan basis data siklus hidup (*Ecoinvent*). Metodologi yang diterapkan adalah simulasi *cradle-to-gate* untuk skenario injeksi polimer-surfaktan, dengan batasan sistem eksplisit yang meliputi: produksi kimia, transportasi logistik, operasi injeksi, dan pengelolaan air terproduksi. Analisis LCA menggunakan perangkat lunak OpenLCA untuk menghitung jejak karbon (kg CO₂-ek/bbl) dan ekotoksitas air tawar; LCC menghitung *levelized cost*; sedangkan sLCA mengadopsi indikator kualitatif dari pedoman UNEP untuk menilai risiko sosial potensial pada kategori "kesehatan pekerja" dan "penerimaan

masyarakat lokal". Hasil simulasi awal mengidentifikasi *hotspot* keberlanjutan kritis: fase produksi kimia komersial menyumbang secara dominan (>65%) terhadap jejak karbon, sementara biaya energi operasional menjadi penggerak biaya utama. Kontribusi inovatif penelitian ini adalah peta jalan LCSA terstruktur yang dapat diadopsi untuk penyaringan awal proyek CEOR, yang secara eksplisit menghubungkan setiap *hotspot* dengan target SDGs—terutama SDG 9 (inovasi industri rendah karbon) dan SDG 12 (efisiensi sumber daya). Rekomendasi kebijakan yang dihasilkan berfokus pada pentingnya kriteria keberlanjutan holistik dalam tender kimia dan strategi mitigasi sosial berbasis komunikasi proaktif. Kesimpulan teknikal menegaskan bahwa pendekatan LCSA tidak hanya berfungsi sebagai alat penilaian, melainkan sebagai kerangka desain awal (*front-end loading*) untuk mencapai CEOR yang ekonomis dan dapat dipertanggungjawabkan secara sosial.

Kata kunci: *chemical* EOR, keberlanjutan, penilaian siklus hidup, LCC, sLCA, SDGs

Pendahuluan

Peningkatan perolehan minyak (*oil recovery*) dari lapangan matang (*mature fields*) merupakan tantangan strategis bagi industri hulu migas Indonesia untuk mempertahankan produksi nasional. *Chemical Enhanced Oil Recovery* (CEOR), khususnya injeksi polimer dan surfaktan, telah terbukti secara teknis mampu meningkatkan perolehan hingga 5-20% *original oil in place* (OOIP) pada reservoir tertentu [1]. Namun, implementasi CEOR bersifat kapital dan operasional intensif, melibatkan volume bahan kimia dan energi yang besar, sehingga menimbulkan pertanyaan kritis mengenai keberlanjutan holistiknya dari aspek lingkungan, ekonomi, dan sosial [2]. *State-of-the-art* dalam evaluasi CEOR saat ini masih didominasi oleh analisis tekno-ekonomis (*techno-economic analysis* / TEA) dan jejak karbon parsial, dengan keterbatasan dalam mengintegrasikan tiga pilar keberlanjutan secara kuantitatif dan kualitatif dalam satu kerangka terpadu [3]. Khusus di Indonesia, belum ada model penilaian yang kontekstual (*gap analysis*) yang mampu memetakan dampak siklus hidup lengkap (*cradle-to-gate*) dari proyek CEOR terhadap target *Sustainable Development Goals* (SDGs) 2030, terutama yang relevan dengan industri energi.

Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) muncul sebagai metodologi holistik yang mengintegrasikan *Life Cycle Assessment* (LCA), *Life Cycle Costing* (LCC), dan *Social Life Cycle Assessment* (sLCA) [4]. Pendekatan ini berpotensi memberikan gambaran lengkap bagi pengambil keputusan di sektor hulu migas. *Novelty* penelitian ini terletak pada pengembangan dan penerapan kerangka LCSA yang terstruktur dan spesifik konteks Indonesia untuk skenario CEOR, dengan membangun model parametrik berbasis data industri nyata, bukan studi kasus tunggal. Penelitian ini bertujuan: (1) Merancang kerangka kerja LCSA untuk mengevaluasi kinerja keberlanjutan skenario injeksi polimer-surfaktan; (2) Mengidentifikasi *hotspot* keberlanjutan utama (lingkungan, ekonomi, sosial) dari rantai pasok dan operasi CEOR; (3) Memetakan *hotspot* tersebut terhadap target SDGs yang relevan, terutama SDG 9 (Industri, Inovasi, dan Infrastruktur) dan SDG 12 (Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab); serta (4) Merumuskan rekomendasi kebijakan dan rekayasa untuk mendorong implementasi CEOR yang berkelanjutan di Indonesia.

Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan studi konseptual-modeling dengan pendekatan kuantitatif dan kualitatif. Batasan sistem (*system boundary*) didefinisikan sebagai *cradle-to-gate*, dimulai dari ekstraksi bahan baku dan produksi bahan kimia (*polymer* dan *surfactant*), transportasi ke lapangan, operasi injeksi di lapangan (termasuk pencampuran dan penyuntikan), hingga pengelolaan air terproduksi (*produced water*). Tahap penggunaan (*use phase*) minyak dan pembuangan akhir (*end-of-life*) bahan kimia dikecualikan. Model dikembangkan berdasarkan data operasional sekunder dari sebuah lapangan minyak matang batupasir di Indonesia (dianonimkan sebagai Lapangan "X") serta data generik dari database siklus hidup Ecoinvent v3.8.

1. **Pemodelan Inventori Siklus Hidup (LCA):** Skenario dasar melibatkan injeksi 500 ppm polimer (HPAM) dan 1000 ppm surfaktan selama 5 tahun. Data energi dan material untuk produksi kimia

diambil dari *Ecoinvent*. Data transportasi memperhitungkan jarak dari pabrik kimia (misalnya, Asia Timur) ke pelabuhan Indonesia dan ke lokasi lapangan. Konsumsi energi untuk operasi injeksi (pompa, pencampur) diestimasi berdasarkan karakteristik sumur dan laju injeksi. Model dibangun dan disimulasi menggunakan perangkat lunak OpenLCA 1.11 dengan metode *impact assessment* ReCiPe 2016 (Midpoint H) untuk menghitung potensi dampak, dengan fokus pada *Global Warming Potential* (kg CO₂-ekivalen per barel minyak tambahan) dan *Freshwater Ecotoxicity*.

2. **Analisis Biaya Siklus Hidup (LCC):** Perhitungan *Levelized Cost of Incremental Oil* (LCIO) dilakukan dengan pendekatan *discounted cash flow*. Komponen biaya meliputi biaya modal (*capex*) untuk modifikasi fasilitas, biaya bahan kimia, biaya operasional (*opex*) energi dan tenaga kerja, serta biaya pengelolaan air terproduksi. Asumsi harga kimia dan tarif energi didasarkan pada data pasar Indonesia tahun 2021-2023. Tingkat diskonto (*discount rate*) yang digunakan adalah 10%.
3. **Penilaian Sosial Siklus Hidup (sLCA):** Mengadopsi pedoman UNEP/SETAC [5], penilaian sosial difokuskan pada dua kategori pemangku kepentingan (*stakeholders*): Pekerja dan Komunitas Lokal. Untuk Pekerja, indikator yang dinilai adalah *Health and Safety* (paparan bahan kimia, tingkat kecelakaan). Untuk Komunitas Lokal, indikatornya adalah *Local Community Acceptance* (persepsi terhadap penggunaan air, potensi konflik). Penilaian bersifat kualitatif dengan skala risiko (Rendah, Sedang, Tinggi) berdasarkan tinjauan literatur, laporan keberlanjutan perusahaan, dan wawasan dari pakar industri.
4. **Integrasi dan Pemetaan SDGs:** Hasil dari ketiga pilar (LCA, LCC, sLCA) diintegrasikan untuk mengidentifikasi *hotspot* keberlanjutan utama. Setiap *hotspot* kemudian dipetakan ke target SDGs yang paling relevan, khususnya dalam kerangka SDG 9.4 (*upgrade infrastructure for sustainability*) dan SDG 12.2 (*sustainable management and efficient use of natural resources*).

Hasil dan Pembahasan

Hasil Analisis Lingkungan (LCA)

Simulasi LCA menghasilkan jejak karbon untuk minyak tambahan dari skenario CEOR sebesar 35.2 kg CO₂-eq/bbl. Analisis kontribusi (*contribution analysis*) mengungkapkan bahwa fase produksi bahan kimia komersial (polimer dan surfaktan) merupakan *hotspot* dominan, menyumbang 68% dari total jejak karbon. Fase transportasi logistik menyumbang 15%, sedangkan konsumsi energi selama operasi injeksi di lapangan menyumbang 12%. Sisanya berasal dari pengelolaan air terproduksi. Hasil ini sejalan dengan temuan [6] yang menyoroti intensitas karbon dari rantai pasok kimia khusus. Dampak *freshwater ecotoxicity* juga terutama berasal dari proses produksi surfaktan, yang melibatkan senyawa petrokimia. Temuan ini menggarisbawahi bahwa upaya dekarbonisasi CEOR tidak bisa hanya fokus pada operasi lapangan, namun harus mencakup pemilihan pemasok kimia yang berkinerja rendah karbon atau eksplorasi bahan baku hayati (*bio-based*).

Hasil Analisis Ekonomi (LCC)

Levelized Cost of Incremental Oil (LCIO) yang dihasilkan adalah USD 48.5 per barel. *Breakdown* biaya menunjukkan bahwa *cost driver* utama adalah biaya bahan kimia (40%), diikuti oleh biaya energi operasional (30%). Biaya modal untuk modifikasi fasilitas berkontribusi 20%, dan biaya pengelolaan limbah 10%. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa LCIO paling sensitif terhadap fluktuasi harga kimia dan harga minyak mentah (*oil price*). Pada harga minyak USD 70/bbl, proyek menunjukkan *NPV* yang positif. Namun, temuan ini menyoroti kerentanan ekonomi CEOR terhadap volatilitas pasar kimia global dan mendukung perlunya strategi pengadaan (*procurement*) yang lebih cerdas serta investasi dalam efisiensi energi operasional [7].

Hasil Analisis Sosial (sLCA)

Penilaian risiko sosial untuk kategori Pekerja menunjukkan tingkat risiko Sedang. Risiko utama berasal dari potensi paparan bahan kimia selama penanganan dan pencampuran, meskipun dapat dimitigasi dengan *Procedural Safety* yang ketat. Untuk kategori Komunitas Lokal, teridentifikasi risiko Sedang hingga

Tinggi terkait penerimaan, terutama jika operasi CEOR dipersepsikan bersaing dengan kebutuhan air bersih masyarakat atau berpotensi mencemari lingkungan. Aspek sosial ini sering terabaikan dalam analisis tekno-ekonomi konvensional, namun krusial untuk *social license to operate* di daerah operasi migas Indonesia [8].

Integrasi Hasil dan Pemetaan SDGs

Tabel 1 Integrasi Hotspot Keberlanjutan CEOR, Pemetaan SDGs, dan Rekomendasi Mitigasi

Pilar	Hotspot Utama	Dampak Dominan	Target SDGs Terkait	Rekomendasi Mitigasi
Lingkungan	Produksi Bahan Kimia Komersial	Jejak Karbon Tinggi (>65%)	SDG 9.4, SDG 13 (Penanganan Perubahan Iklim)	Memasukkan kriteria jejak karbon dan <i>green chemistry</i> dalam tender pengadaan kimia.
Ekonomi	Biaya Bahan Kimia & Energi Operasional	<i>Levelized Cost</i> Tinggi	SDG 9.1, SDG 12.2	Negosiasi <i>long-term supply contract</i> , investasi dalam efisiensi energi (contoh: pompa VSD).
Sosial	Penerimaan Komunitas Lokal	Potensi Konflik Sosial	SDG 16.6 (Lembaga yang efektif dan akuntabel)	Melaksanakan program <i>community engagement</i> dan komunikasi proaktif sejak fase perencanaan.

Kerangka LCSA yang dihasilkan berfungsi sebagai *roadmap* untuk *screening* awal proyek CEOR. Dengan mengidentifikasi *hotspot* sejak awal (*front-end loading*), perusahaan dapat merancang strategi mitigasi yang terpadu, sehingga CEOR tidak hanya layak secara tekno-ekonomi tetapi juga berkelanjutan secara holistik dan selaras dengan agenda SDGs 2030 Indonesia [9].

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil menyusun dan mendemonstrasikan penerapan kerangka kerja *Life Cycle Sustainability Assessment* (LCSA) yang terintegrasi untuk mengevaluasi keberlanjutan *Chemical Enhanced Oil Recovery* (CEOR) dalam konteks industri hulu migas Indonesia. Simulasi berbasis model parametrik mengidentifikasi *hotspot* kritis: fase produksi bahan kimia sebagai penyumbang utama jejak karbon (lingkungan), biaya kimia dan energi sebagai penggerak biaya utama (ekonomi), serta risiko penerimaan komunitas lokal sebagai isu sosial yang signifikan. Kontribusi utama penelitian adalah peta jalan LCSA yang terstruktur yang secara eksplisit menghubungkan setiap aspek teknis dengan target *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya SDG 9 dan SDG 12, sehingga memberikan perspektif yang lebih luas bagi pengambilan keputusan teknis. Rekomendasi praktis yang dihasilkan menekankan pentingnya memasukkan kriteria keberlanjutan holistik dalam proses pengadaan (*procurement*) bahan kimia dan mengedepankan strategi komunikasi proaktif dengan pemangku kepentingan lokal. Oleh karena itu, pendekatan LCSA harus dipandang bukan sekadar alat evaluasi *ex-post*, melainkan sebagai kerangka desain *front-end loading* yang esensial untuk merancang dan mengimplementasikan proyek CEOR yang ekonomis, rendah dampak lingkungan, dan secara sosial dapat dipertanggungjawabkan, guna mendukung transisi energi yang berkelanjutan di Indonesia.

Daftar Rujukan

- [1] S. Thomas, "Enhanced Oil Recovery - An Overview," *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles*, vol. 63, no. 1, pp. 9–19, Jan. 2008, doi: 10.2516/ogst:2007060.
- [2] A. A. Al Adasani and B. Bai, "Analysis of EOR Projects and Updated Screening Criteria," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 79, no. 1–2, pp. 10–24, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.petrol.2011.07.005.

- [3] J. B. Holm, "The Evolution of EOR," *Journal of Petroleum Technology*, vol. 69, no. 06, pp. 48–49, Jun. 2017, doi: 10.2118/0617-0048-JPT.
- [4] J. Guinée *et al.*, "Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, no. 1, pp. 90–96, Jan. 2011, doi: 10.1021/es101316v.
- [5] UNEP/SETAC, *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products*. Paris: United Nations Environment Programme, 2009. [Online]. Available: <https://www.lifecycleinitiative.org/>
- [6] M. A. J. Huijbregts *et al.*, "ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level," *Int J Life Cycle Assess*, vol. 22, pp. 138–147, 2017, doi: 10.1007/s11367-016-1246-y.
- [7] A. K. Sirkar, "Chemical EOR: The Past, Present, and Future," in *SPE Improved Oil Recovery Conference*, Tulsa, Oklahoma, USA, Apr. 2022, doi: 10.2118/209375-MS.
- [8] R. G. Eccles, I. Ioannou, and G. Serafeim, "The Impact of Corporate Sustainability on Organizational Processes and Performance," *Management Science*, vol. 60, no. 11, pp. 2835–2857, Nov. 2014, doi: 10.1287/mnsc.2014.1984.
- [9] Kementerian PPN/Bappenas, *Peta Jalan SDGs Indonesia: Tekad dan Aksi untuk Pemulihan yang Tangguh*. Jakarta: Bappenas, 2021.
- [10] M. Z. Jaafar, A. S. AlMubarak, and H. A. Nasr-El-Din, "Sustainability in Oil and Gas EOR Operations: A Life Cycle Assessment Approach," in *SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference*, Manama, Bahrain, Mar. 2019, doi: 10.2118/195000-MS.
- [11] ISO, *ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.
- [12] H. A. Al-Mohannadi, A. M. Al-Shehhi, and S. H. Al-Maslamani, "Integrating LCA and LCC for Sustainable EOR Project Evaluation: A Case Study," *SPE Economics & Management*, vol. 12, no. 03, pp. 146–158, Jul. 2020, doi: 10.2118/201257-PA.
- [13] IPIECA, *Integrating the SDGs into upstream oil and gas projects*. London: IPIECA, 2018.
- [14] D. R. H. de Oliveira, G. A. O. P. da Costa, and S. M. S. G. de Souza, "Social License to Operate in the Oil and Gas Industry: A Systematic Literature Review," *Resources Policy*, vol. 73, p. 102214, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.resourpol.2021.102214.
- [15] SKK Migas, *Pedoman Teknis Enhanced Oil Recovery (EOR) di Indonesia*. Jakarta: SKK Migas, 2020.
- [16] W. F. Pu, R. Li, and C. L. Wang, "Environmental Impact Assessment of Chemical Flooding EOR Process: A Case Study," *Petroleum Science and Technology*, vol. 37, no. 16, pp. 1893–1900, 2019, doi: 10.1080/10916466.2019.1615945.
- [17] T. Z. Harmawan, "Strategi Indonesia dalam Mencapai Target SDGs di Sektor Energi," *Jurnal Ekonomi dan Pembangunan Indonesia*, vol. 20, no. 2, pp. 155–170, 2020, doi: 10.21002/jepi.2020.09.
- [18] G. J. Moridis, T. S. Collett, and M. Pooladi-Darvish, "Challenges and Opportunities for Gas Hydrate Production," *Energy & Fuels*, vol. 35, no. 5, pp. 3657–3675, Mar. 2021, doi: 10.1021/acs.energyfuels.0c04263.