

# Pengembangan Model Keputusan LCA-TEA Terintegrasi untuk Optimalisasi *Produced Water Reuse* pada *Hydraulic Fracturing* di Cekungan Sumatera Selatan: Strategi Inovatif Menuju Ekonomi Sirkular dan SDGs 2030

## *Integrated LCA-TEA Decision Model for Optimizing Produced Water Reuse in Hydraulic Fracturing in the South Sumatra Basin: An Innovative Strategy Towards Circular Economy and 2030 SDGs*

Rizki Zulfian Istiansyah<sup>1\*</sup>

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

<sup>1</sup>zulfianrizki35@gmail.com\*

### **Abstract**

*The integrated decision model combining Life Cycle Assessment (LCA) and Techno-Economic Analysis (TEA) is crucial for evaluating sustainable produced water (PW) management in hydraulic fracturing operations. This study addresses the research gap concerning the lack of a holistic framework that explicitly quantifies the trade-offs between economic and environmental aspects for PW reuse strategies in Indonesia. A hybrid simulation model was developed and applied to PW characteristics from Field "X" in the South Sumatra Basin (TDS ~120,000 mg/L), comparing three scenarios: freshwater baseline, conventional pretreatment reuse, and advanced membrane-based reuse (Ultrafiltration + Vibratory Shear Enhanced Processing/ VSEP). Quantitative results indicate that the membrane scenario, despite requiring an additional initial investment of USD 800,000 per facility, can reduce life cycle costs (LCC) by USD 2.3 million over 5 years of operation and lower carbon footprint by 1,200 tons of CO<sub>2</sub>-equivalent per well, while saving 240,000 barrels of freshwater per well. The research novelty lies in the development of a technology selection algorithm sensitive to local water quality variations, which provides specific operational policy recommendations to reduce costs by 28% and environmental impacts by 35% compared to standard practices. These findings offer a technically and economically viable roadmap directly applicable to industry and regulators, significantly supporting the achievement of SDG 6 (water conservation), SDG 9 (innovative industry), SDG 12 (resource efficiency), and SDG 13 (climate action) through a rigorous and sustainable systems engineering approach.*

**Keywords:** *produced water, hydraulic fracturing, life cycle assessment, techno-economic analysis, circular economy, sustainable development goals*

### **Abstrak**

Model keputusan terintegrasi yang menggabungkan *Life Cycle Assessment* (LCA) dan *Techno-Economic Analysis* (TEA) sangat penting untuk mengevaluasi pengelolaan *Produced Water* (PW) yang berkelanjutan dalam operasi *hydraulic fracturing*. Penelitian ini menjawab kesenjangan literatur mengenai kurangnya kerangka kerja holistik yang mengkuantifikasi secara eksplisit trade-off antara aspek ekonomi dan lingkungan untuk strategi daur ulang PW di Indonesia. Model simulasi hibrida dikembangkan dan diterapkan pada karakteristik PW dari Lapangan "X" di Cekungan Sumatera Selatan (TDS ~120.000 mg/L), dengan membandingkan tiga skenario: baseline air tawar, reuse dengan *pretreatment* konvensional, dan reuse dengan sistem membran khusus (Ultrafiltrasi + Vibratory Shear Enhanced Processing/VSEP). Hasil kuantitatif menunjukkan bahwa skenario membran, meski membutuhkan investasi awal tambahan sebesar USD 800.000 per fasilitas, mampu menurunkan biaya siklus hidup (LCC) sebesar USD 2,3 juta selama 5 tahun beroperasi dan mengurangi jejak karbon hingga 1.200 ton CO<sub>2</sub>-ekivalen per sumur, sekaligus menghemat 240.000 barel air tawar per sumur. Inovasi penelitian terletak pada model algoritma pemilihan teknologi yang peka terhadap variasi kualitas air

lokal, yang menghasilkan rekomendasi kebijakan operasional spesifik untuk mengurangi biaya hingga 28% dan dampak lingkungan hingga 35% dibandingkan praktik standar. Simpulan ini memberikan peta jalan teknis-ekonomis yang langsung dapat diadopsi oleh industri dan regulator, secara nyata mendukung pencapaian SDG 6 (penghematan sumber air), SDG 9 (industri inovatif), SDG 12 (efisiensi sumber daya), dan SDG 13 (aksi iklim), melalui pendekatan rekayasa sistem yang ketat dan berkelanjutan.

**Kata kunci:** air terproduksi, perekahan, analisis siklus hidup, analisis tekno-ekonomi, ekonomi sirkular, tujuan pembangunan berkelanjutan

## Pendahuluan

Operasi hydraulic fracturing pada industri minyak dan gas bumi membutuhkan volume air yang sangat besar, dengan rata-rata konsumsi mencapai 15-20 juta liter per sumur [1]. Di sisi lain, kegiatan ini menghasilkan limbah cair berupa *produced water* (PW) dalam volume yang signifikan, dengan karakteristik kompleks seperti kandungan padatan terlarut tinggi (TDS), logam berat, dan senyawa organik [2]. Di Cekungan Sumatera Selatan, sebagai salah satu basin produktif di Indonesia, isu pengelolaan PW menjadi tantangan serius mengingat keterbatasan sumber air tawar dan regulasi lingkungan yang semakin ketat [3]. Praktik injeksi PW ke dalam sumur injeksi (*deep well injection*) masih dominan, namun pendekatan ini memiliki risiko lingkungan jangka panjang dan tidak sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular dan Sustainable Development Goals (SDGs) 2030 [4].

Tinjauan literatur menunjukkan bahwa penelitian terkait daur ulang PW untuk *hydraulic fracturing* telah berkembang, terutama di Amerika Utara [5,6]. Namun, model evaluasi yang ada sering kali terpisah antara analisis ekonomi (TEA) dan analisis lingkungan (LCA). Integrasi keduanya dalam satu kerangka keputusan yang mampu mengkuantifikasi *trade-off* antara biaya dan dampak lingkungan secara eksplisit masih sangat terbatas, khususnya untuk konteks geologi dan regulasi Indonesia [7]. *State of the art* dalam pemrosesan PW saat ini melibatkan teknologi membran seperti ultrafiltrasi (UF), reverse osmosis (RO), dan teknologi berbasis vibrasi seperti VSEP (*Vibratory Shear Enhanced Processing*) [8,9]. Namun, pemilihan teknologi yang optimal sangat bergantung pada kualitas air masukan dan kondisi operasional lokal [10].

*Gap analysis* mengidentifikasi kurangnya model keputusan terintegrasi LCA-TEA yang dapat memberikan rekomendasi operasional spesifik berdasarkan karakteristik PW di Indonesia. *Novelty* penelitian ini terletak pada pengembangan model algoritma simulasi yang mengintegrasikan aspek tekno-ekonomi dan siklus hidup secara dinamis, dengan sensitivitas terhadap variasi kualitas air dan parameter ekonomi lokal. Penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengembangkan model keputusan hibrida LCA-TEA untuk evaluasi strategi daur ulang PW, (2) mengaplikasikan model pada kasus PW di Cekungan Sumatera Selatan, dan (3) memberikan rekomendasi kebijakan dan operasional yang mendukung ekonomi sirkular dan pencapaian SDGs 2030.

## Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan rekayasa sistem dengan desain penelitian kuantitatif dan simulasi berbasis kasus. Ruang lingkup penelitian terbatas pada operasi *hydraulic fracturing* di Lapangan "X", Cekungan Sumatera Selatan, dengan karakteristik PW memiliki TDS rata-rata 120.000 mg/L, kandungan minyak & lemak 250 mg/L, dan total suspended solids (TSS) 500 mg/L [11]. Objek penelitian adalah tiga skenario pengelolaan PW: (S1) Baseline: penggunaan air tawar dengan disposisi PW melalui injeksi, (S2) Reuse Konvensional: pretreatment kimia-fisik (koagulasi-flokulasi, dissolved air flotation) dan filtrasi multimedia, dan (S3) Reuse Inovatif: pretreatment awal diikuti sistem membran hibrid (Ultrafiltrasi + VSEP).

Teknik pengumpulan data meliputi studi literatur, wawancara dengan ahli industri, dan data sekunder dari operator lapangan. Analisis Tekno-Ekonomi (TEA) dilakukan dengan menghitung *Capital Expenditure* (CAPEX) dan *Operational Expenditure* (OPEX) untuk setiap skenario, dengan asumsi umur proyek 5 tahun dan tingkat diskonto 10%. Parameter ekonomi meliputi biaya kimia, energi, maintenance,

dan biaya pembuangan [12]. *Life Cycle Assessment* (LCA) dilaksanakan sesuai standar ISO 14040/44, dengan batas sistem *cradle-to-gate* mulai dari penyediaan bahan kimia hingga air hasil olahan siap digunakan untuk *fracking*. Kategori dampak yang dinilai adalah potensi pemanasan global (*global warming potential*), ekotoksikasi air tawar, dan penggunaan sumber daya air [13].

Model integrasi LCA-TEA dikembangkan dalam perangkat lunak simulasi dengan algoritma *multi-criteria decision analysis* (MCDA) berbobot. Bobot kriteria ditentukan melalui *Analytical Hierarchy Process* (AHP) yang melibatkan stakeholder dari industri, akademisi, dan regulator. Simulasi sensitivitas dilakukan terhadap variabel kunci seperti harga energi, efisiensi membran, dan kualitas influen PW.

## Hasil dan Pembahasan

Hasil perhitungan CAPEX menunjukkan bahwa Skenario S3 (membran) memerlukan investasi awal tertinggi sebesar USD 3,2 juta per fasilitas, dibandingkan S2 (USD 2,4 juta) dan S1 (USD 1,5 juta, terutama untuk sumur injeksi). Namun, analisis LCC selama 5 tahun mengungkapkan bahwa S3 justru menghasilkan total biaya terendah (USD 8,1 juta), diikuti S2 (USD 9,8 juta), dan S1 (USD 10,4 juta). Penghematan pada S3 terutama berasal dari pengurangan biaya pembelian air tawar (USD 1,2 juta/tahun) dan biaya disposisi injeksi (USD 0,5 juta/tahun). Perbandingan ini disajikan pada Tabel 1.

Dari perspektif lingkungan, LCA menunjukkan bahwa S3 memberikan penurunan dampak terbesar. Dibandingkan dengan baseline, S3 mengurangi jejak karbon sebesar 1.200 ton CO<sub>2</sub>-ekivalen per sumur, terutama dari penghematan energi transportasi air dan pengurangan aktivitas injeksi. Potensi ekotoksikasi air tawar juga turun 40% karena minimnya limbah yang dibuang ke lingkungan. Penggunaan sumber daya air tawar berkurang drastis hingga 240.000 barel per sumur, yang secara langsung selaras dengan target SDG 6. Hasil ini diperkuat oleh studi [14] yang menyatakan bahwa daur ulang PW dapat mengurangi *water footprint* operasi hulu minyak hingga 70%.

Pembahasan mendalam mengungkap bahwa keunggulan S3 sangat sensitif terhadap kualitas PW. Algoritma pemilihan teknologi yang dikembangkan mampu mengidentifikasi *break-even point* dimana investasi membran menjadi layak, yaitu ketika TDS PW > 100.000 mg/L dan biaya air tawar lokal melebihi USD 5/barel. Model ini juga mengintegrasikan faktor ketidakpastian seperti fluktuasi harga energi, di mana S3 tetap robust karena konsumsi energinya yang efisien akibat teknologi vibrasi VSEP yang mengurangi fouling membran [15]. Temuan ini mendukung SDG 9 (industri inovatif) dengan mendorong adopsi teknologi bersih, dan SDG 12 melalui optimasi efisiensi sumber daya.

Tabel 1 Analisis Biaya Siklus Hidup (LCC) untuk Tiga Skenario (dalam USD juta)

Komponen Biaya	Skenario 1 (Baseline)	Skenario 2 (Konvensional)	Skenario 3 (Membran)
CAPEX Awal	1.5	2.4	3.2
OPEX Tahunan (rata-rata)	1.78	1.48	0.98
Biaya Air Tawar	0.75	0	0
Biaya Disposisi	0.65	0.3	0.1
Biaya Energi & Kimia	0.38	0.98	1.08
Total LCC (5 tahun)	10.4	9.8	8.1

## Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan dan mengaplikasikan model keputusan terintegrasi LCA-TEA untuk optimalisasi pemanfaatan kembali *produced water* pada operasi *hydraulic fracturing* di Cekungan Sumatera Selatan. Model simulasi berbasis algoritma ini secara kuantitatif membuktikan bahwa skenario reuse dengan teknologi membran hibrid (Ultrafiltrasi+VSEP), meskipun memerlukan investasi awal lebih tinggi, mampu

menurunkan biaya siklus hidup sebesar 22% dan mengurangi jejak karbon hingga 35% dibandingkan praktik baseline. Model ini juga menghasilkan rekomendasi kebijakan operasional yang spesifik, termasuk kondisi ambang (*threshold*) kualitas air dan ekonomi dimana investasi teknologi daur ulang menjadi optimal. Implementasi hasil penelitian ini memberikan peta jalan yang jelas bagi industri untuk beralih menuju ekonomi sirkular, sekaligus secara langsung berkontribusi pada pencapaian beberapa target SDGs 2030, khususnya SDG 6, 9, 12, dan 13. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk menguji model ini pada cekungan lain dengan karakteristik geokimia PW yang berbeda serta mengintegrasikan analisis risiko sosial (*social life cycle assessment*) untuk pendekatan yang lebih holistik.

## Daftar Rujukan

- [1] J. M. Ratliff, "Water Use in the Hydraulic Fracturing Process: A Comprehensive Review," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 215, p. 110717, 2022, doi: 10.1016/j.petrol.2022.110717.
- [2] K. B. Gregory and R. D. Vidic, "Produced Water: Challenges and Opportunities," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 55, no. 1, pp. 3–10, 2021, doi: 10.1021/acs.est.0c03736.
- [3] A. S. H. Prativi and D. S. Pambudi, "Regulatory Framework and Challenges of Produced Water Management in Indonesia's Oil and Gas Fields," *Indones. J. Energy Environ.*, vol. 4, no. 2, pp. 45–56, 2021.
- [4] M. J. B. Alam and M. S. Islam, "Circular Economy in the Oil and Gas Sector: A Systematic Literature Review," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 180, p. 106175, 2022, doi: 10.1016/j.resconrec.2022.106175.
- [5] S. D. Shih et al., "Life Cycle Assessment of Produced Water Treatment and Reuse Options in the Permian Basin," *J. Clean. Prod.*, vol. 276, p. 124277, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124277.
- [6] T. Chen and L. F. Carter, "Techno-Economic Analysis of Advanced Treatment Technologies for Produced Water Reuse," *Desalination*, vol. 517, p. 115259, 2021, doi: 10.1016/j.desal.2021.115259.
- [7] R. K. Putra and E. Wijaya, "The Gap of Integrated Environmental-Economic Assessment for Upstream Oil and Gas Operations in Southeast Asia," *ASEAN J. Chem. Eng.*, vol. 21, no. 1, pp. 78–92, 2021.
- [8] A. J. Karabelas et al., "Membrane-Based Desalination and Treatment of Produced Water: Recent Developments," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 256, p. 117823, 2021, doi: 10.1016/j.seppur.2020.117823.
- [9] P. M. Williams, "Vibratory Shear Enhanced Processing (VSEP) for Produced Water Treatment: A Pilot Study," *Water Res.*, vol. 189, p. 116666, 2021, doi: 10.1016/j.watres.2020.116666.
- [10] N. Hilal et al., "A Comprehensive Review of Membrane Technology for Produced Water Treatment: Performance, Challenges, and Future Directions," *J. Memb. Sci.*, vol. 635, p. 119503, 2021, doi: 10.1016/j.memsci.2021.119503.
- [11] Data Internal, "Karakterisasi Produced Water Lapangan X, Cekungan Sumatera Selatan," PT. Pertamina Hulu Rokan, 2023.
- [12] M. S. Peters et al., *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2020.
- [13] ISO 14040:2006, "Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework," International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2006.
- [14] G. A. F. A. Santos and M. H. M. P. Souza, "Water Footprint Reduction in Unconventional Oil Production through Produced Water Reuse: A Case Study," *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 28, pp. 1123–1134, 2021, doi: 10.1016/j.spc.2021.07.032.
- [15] E. M. V. Hoek and A. R. D. Verliefe, "Fouling-Resistant Membranes for Produced Water Treatment: The Role of Vibratory Systems," *J. Water Process Eng.*, vol. 41, p. 102085, 2021, doi: 10.1016/j.jwpe.2021.102085.