



## Tinjauan Literatur Sistematis Optimalisasi *Steam Flooding* untuk Peningkatan Produksi pada Lapangan Minyak

Diandra Chaswatul Chanaya<sup>1</sup>✉, Baiq Maulinda Ulfah<sup>1</sup>

<sup>(1)</sup>Program Studi Teknik Perminyakan, Sekolah Tinggi Teknologi Migas Balikpapan, Indonesia

DOI: 10.31004/jutin.v8i4.50720

✉ Corresponding author:  
[diandrachanayaaa@gmail.com]

### Article Info

### Abstrak

*Kata kunci:*  
*Steam Flooding;*  
*Enhanced Oil Recovery;*  
*Optimalisasi Injeksi;*  
*Heavy oil;*

Tinjauan literatur sistematis ini membahas optimalisasi *steam flooding* sebagai salah satu metode *Enhanced Oil Recovery* (EOR) yang penting untuk produksi minyak berat. *Steam flooding* terbukti mampu menurunkan viskositas minyak, meningkatkan mobilitas fluida, dan memperbaiki sweep efficiency. Namun, tantangan utama meliputi tingginya *steam-oil ratio* (SOR), kebutuhan energi yang besar, heterogenitas reservoir, dan biaya operasional. Melalui *Systematic Literature Review* (SLR) terhadap 5 jurnal terpilih yang diterbitkan pada tahun 2023–2025, penelitian ini mengidentifikasi strategi optimasi berupa desain pola injeksi, kontrol kualitas uap, penggunaan teknologi pendukung seperti sumur *horizontal* dan *solvent injection*, serta integrasi energi terbarukan. Hasil kajian menunjukkan bahwa optimasi teknis mencakup desain pola injeksi, pengaturan laju dan kualitas uap, konfigurasi sumur (termasuk penggunaan *horizontal wells*), serta stimulasi remedial melalui acidizing. Di sisi keekonomian, fokus diarahkan pada pengurangan Capex dan Opex, peningkatan *Net Present Value* (NPV) serta *Internal Rate of Return* (IRR), dan sensitivitas terhadap harga minyak. Selain itu, inovasi berupa *Solar Enhanced Oil Recovery* (S-EOR) menawarkan solusi berkelanjutan dalam menekan biaya energi dan mengurangi emisi karbon.

### Abstract

*Keywords:*  
*Steam Flooding;*  
*Enhanced Oil Recovery;*  
*Injection Optimization;*  
*Heavy Oil;*

*This systematic literature review discusses the optimisation of steam flooding as one of the important enhanced oil recovery (EOR) methods for heavy oil production. Steam flooding is proven to reduce oil viscosity, increase fluid mobility, and improve sweep efficiency. However, the main challenges include high steam-oil ratio (SOR), large energy requirements, reservoir heterogeneity, and operational costs. Through a Systematic Literature Review (SLR) of 5 selected journals published in 2023-2025, this study identifies optimisation strategies such as injection pattern design, steam quality control, use of supporting technologies such as horizontal wells and solvent injection, and renewable energy integration. The results show that technical*

*optimisation includes injection pattern design, steam rate and quality control, well configuration (including the use of horizontal wells), and remedial stimulation through acidising. On the economic side, the focus was on reducing Capex and Opex, increasing Net Present Value (NPV) and Internal Rate of Return (IRR), and oil price sensitivity. In addition, innovation in the form of Solar Enhanced Oil Recovery (S-EOR) offers a sustainable solution in reducing energy costs and reducing carbon emissions.*

## 1. PENDAHULUAN

*Steam flooding* telah lama dikenal sebagai salah satu teknik (EOR) yang paling efisien untuk membuka sumber daya minyak berat (Putra & Kiono, 2021). Dengan menginjeksikan panas kedalam reservoir, viskositas dari *heavy oil* akan berkurang secara signifikan, hal ini memungkinkan peningkatan mobilitas dan tingkat produksi yang lebih baik. Metode ini telah lama digunakan untuk menurunkan nilai viskositas dari minyak sehingga lebih mudah diangkat ke permukaan. Contoh implementasinya adalah Lapangan Duri di Riau yang sejak 1985 telah menjadi salah satu proyek steamflood terbesar di dunia, dan masih berperan penting dalam menjaga produksi nasional. (Pramana & Ramadhani, 2022). Meskipun demikian, penerapan *steam injection* menghadapi tantangan serius, di antaranya tingginya *steam-oil ratio* (SOR), kebutuhan energi yang besar, heterogenitas reservoir, serta permasalahan scale yang dapat menurunkan produktivitas sumur.

Meskipun terbukti efektif, penerapan *steam flooding* menghadapi tantangan serius. Permasalahan yang sering muncul antara lain nilai *steam-oil ratio* (SOR) yang tinggi, kebutuhan energi yang besar, heterogenitas reservoir, serta terbentuknya scale yang menurunkan produktivitas sumur (Silalahi et al., 2019). Selain itu, keekonomian proyek *steamflood* sangat dipengaruhi oleh perubahan harga minyak dan biaya energi, sehingga diperlukan strategi optimasi teknis yang sekaligus mempertimbangkan aspek keberlanjutan dan biaya operasi.

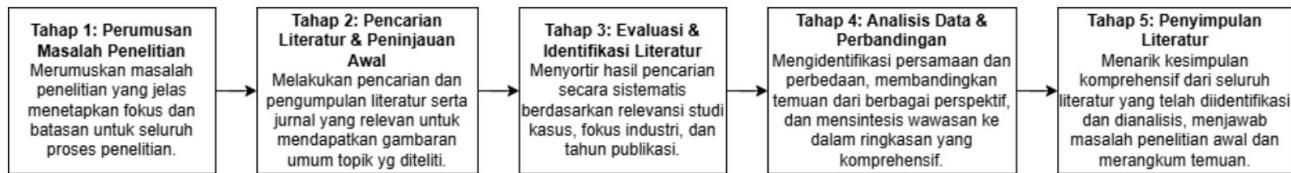
Dalam praktiknya, metode pemulihan termal seperti *steam flooding* dan *cyclic steam stimulation* (CSS) telah menjadi teknik yang paling banyak diterapkan di lapangan minyak berat (Kusumastuti et al, 2019). Keduanya bekerja berdasarkan prinsip injeksi panas melalui uap untuk menurunkan viskositas minyak. Perbedaan strategi operasional, desain reservoir, serta efisiensi energi menjadikan pemahaman tentang konfigurasi *steam injection* sangat penting bagi insinyur perminyakan maupun pengambil keputusan dalam memilih metode yang sesuai untuk kondisi reservoir tertentu. Secara industri, *steamflood* masih dianggap sebagai tulang punggung produksi minyak berat di Indonesia. Misalnya, PT Pertamina Hulu Rokan (PHR) berhasil melakukan *Put On Injection* (POI) pertama untuk proyek *steamflood* di Lapangan North Duri Development (NDD) A14 pada Januari 2025, lebih cepat dari jadwal (Winderasta et al., 2021). Proyek ini menargetkan pembangunan 15 injector pattern hingga pertengahan 2025, yang menunjukkan bahwa selain aspek teknis, dukungan operasional dan manajerial juga menjadi faktor penting dalam menjaga ketahanan energi nasional.

Melihat konteks teknis, industri, dan kebijakan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan *Systematic Literature Review* (SLR) terhadap artikel ilmiah terpilih periode 2023–2025 yang membahas strategi optimisasi *steam injection* di Indonesia. Fokus utama mencakup: (i) metode optimasi teknis (parameter injeksi, desain pola, stimulasi sumur), (ii) pemantauan reservoir dan manajemen panas/energi, serta (iii) analisis keekonomian dari penerapan optimasi tersebut. Melalui studi ini diharapkan diperoleh gambaran komprehensif mengenai strategi optimisasi terkini, kesenjangan penelitian, serta rekomendasi praktis untuk implementasi di lapangan. Literatur juga menegaskan bahwa keberhasilan *steam injection* di Indonesia hanya dapat dicapai melalui sinergi desain teknis yang tepat, pengendalian operasional yang efektif, serta integrasi analisis keekonomian yang matang. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya merangkum temuan-temuan terbaru, tetapi juga menyajikan kerangka teoretis dan arah inovasi untuk meningkatkan efisiensi teknis dan keekonomian *steamflooding* di masa depan.

## 2. METODE

Metode yang digunakan dalam study ini adalah *Systematic Literature Review* (SLR). SLR merupakan istilah yang digunakan untuk merujuk pada metodologi penelitian atau riset tertentu dan pengembangan yang dilakukan untuk mengumpulkan serta mengevaluasi penelitian yang terkait pada fokus topik tertentu (Hiebl, 2023). Dengan fokus pada mengetahui optimalisasi dari penggunaan *steam flooding* untuk meningkatkan produktifitas dari reservoir. Proses pencarian literatur dilakukan secara komprehensif pada publikasi internasional, mencakup jurnal dari tahun 2023 hingga 2025. Basis data terkemuka yang digunakan meliputi *Google Scholar*,

Elsevier, Science Direct, dan penerbit lainnya, guna memastikan cakupan yang luas dan relevan untuk mendapatkan kebutuhan data serta hasil optimisasi penggunaan dari *steam flooding*. Metodologi tinjauan literatur ini mengikuti tahapan sistematis yang digambarkan pada Gambar 1 berikut.



**Fig. 1. Kerangka Penelitian**

Metodologi dari studi literatur ini adalah sebagai berikut:

- Tahap 1: Perumusan Masalah Penelitian untuk menetapkan fokus dan batasan studi.
- Tahap 2: Pencarian kurang lebih 10 Literatur & Peninjauan Awal dilakukan untuk mengumpulkan dan mendapatkan gambaran umum topik dari sumber-sumber relevan.
- Tahap 3: Evaluasi & Identifikasi Literatur, di mana hasil pencarian disortir secara sistematis berdasarkan relevansi dan konteks menjadi 5 Literatur.
- Tahap 4: Analisis Data & Perbandingan dilakukan untuk mengidentifikasi persamaan, perbedaan, dan mensintesis wawasan menjadi ringkasan komprehensif.
- Tahap 5: Penyimpulan Literatur menarik kesimpulan menyeluruh dari seluruh literatur yang telah dianalisis, menjawab masalah penelitian awal, dan merangkum temuan.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Studi Literatur Jurnal

Penelitian ini mengidentifikasi 5 jurnal yang terkait dengan penggunaan *steam flooding* untuk meningkatkan produktifitas dari reservoir khususnya pada wilayah Indonesia. Penelitian-penelitian terkini (tahun 2023-2025) tentang optimisasi steam injection di Indonesia menekankan bahwa keberhasilan teknik ini sangat bergantung pada keseimbangan antara parameter teknis dan aspek keekonomian. Beberapa aspek teknis yang sering dioptimalkan meliputi: pola injeksi (jarak antar sumur atau spacing), kualitas uap (tekanan/temperatur), stimulasi sumur, dan konfigurasi sumur. Di sisi ekonomi, fokusnya adalah pada pengurangan biaya operasi (Capex & Opex), peningkatan *Net Present Value* (NPV) atau *Internal Rate of Return* (IRR), serta sensitivitas terhadap harga minyak dan biaya energi. Hal ini sejalan dengan teori yang menyatakan bahwa injeksi uap yang menyatakan bahwa distribusi uap yang merata dan pengendalian kanal uap sangat penting untuk menjaga efektivitas injeksi. Selain itu, kualitas uap juga berpengaruh besar terhadap kinerja produksi (I. S. Budi, 2025). Hasil dari jurnal yang telah dikumpulkan ditampilkan pada Tabel 1 berikut.

**Table 1. Studi Literatur Jurnal**

N o	Peneliti dan o Tahun	Judul Jurnal	Hasil Penelitian
1	Shidqi et al., (2024)	Trade Off Deploying Pattern (TOP): A Stochastic Integrated Subsurface and Non-Subsurface Approach for Enhanced Economics of New Steamflood Project	Pola spacing 11.6 acres lebih optimal dibandingkan dengan 5.5 acres, yang dimana nilai NPV naik 108%, dan Capex turun 55%, produksi naik +12%
2	Itsaini et al., (2024)	Perbandingan Performa Antara Treatment Hydrochloric Acid dan Carboxylic Acid Terhadap Kenaikan Produksi pada Sumur Minyak Berat	HCl: Produksi naik +42% (dari 19 → 27 BOPD), NPV \$48,002/tahun; Carboxylic Acid: Produksi naik +24% (dari 12 → 15 BOPD), NPV \$22,554/tahun

N o	Peneliti dan Tahun	Judul Jurnal	Hasil Penelitian
3	I. S. Budi, (2025)	Numerical Simulation of Solvent Injection for Late-Stage Steamflood	Kualitas uap 80% → recovery naik +6% dibanding uap 60%; tekanan injeksi optimal 450 psi menghasilkan steam breakthrough lebih lambat (tertunda ±30 hari)
4	I. Budi & Oktaviani, (2023)	Numerical Simulation Study of Steam Injection Optimization in Shallow Reservoir	Optimisasi steam injection rate → SOR turun dari 5.2 → 3.8, oil recovery naik +8%; penggunaan horizontal wells meningkatkan distribusi uap
5	Shafa Alifia Salsabila et al., (2023)	Solar Enhanced Oil Recovery as the Solution to Enhance Oil and Gas Production for Mature Fields in Indonesia	Skenario harga minyak \$60/bbl → IRR proyek 14%; pada harga \$40/bbl IRR turun 6% → hampir tidak ekonomis; biaya energi menyumbang >40% Opex

Berdasarkan dari Tabel 1. terlihat bahwa penelitian mengenai optimisasi *steam injection* mencakup beragam fokus kajian. Studi oleh Shidqi et al., (2024) menekankan aspek desain pola injeksi untuk meningkatkan keekonomian proyek, sedangkan Itsnaini et al. (2024) lebih berfokus pada efektivitas *acidizing* dalam mengatasi permasalahan scale di Lapangan Duri. Sementara itu, Budi (2025) serta Budi & Oktaviani (2023) menyoroti pentingnya pengaturan kualitas uap, laju injeksi, dan penggunaan *horizontal wells* untuk meningkatkan efisiensi teknis. Di sisi lain, Salsabila et al. (2023) memberikan perspektif baru dengan menilai kelayakan proyek *Solar Enhanced Oil Recovery* (S-EOR) dalam konteks perubahan harga minyak dan biaya energi.

### 3.2 Hasil Tinjauan Jurnal

Untuk mencapai tujuan dari SLR, variabel yang ingin dibahas diorganisasikan menjadi satu berdasarkan dengan parameter dan output dari jurnal yang digunakan. Informasi yang digunakan dari jurnal termasuk pada tahun penerbitan, wilayah tempat penelitian dilakukan, metode yang digunakan, dan output dari penelitian. Oleh karena itu, studi SLR ini menggunakan lima variabel yang diidentifikasi dan disajikan pada Tabel 1. Tahap klasifikasi melibatkan klasifikasi metode dan optimalisasi yang dilakukan untuk meningkatkan produktifitas dari sumur produksi. Dengan menggunakan kajian diskriptif untuk menarasikan hasil, membuat diskusi, menunjukkan arah untuk pekerjaan penelitian di masa depan, dan merangkum kesimpulan.

Tabel 2 adalah tabel yang berisi hasil dari total lima ulasan dengan semua topik dan kesimpulan yang bertujuan untuk menemukan referensi yang tepat untuk bias membuat latar belakang penelitian yang sesuai.

Table 2. Review Artikel

Number	Artikel
Artikel 1	Mengevaluasi pola steamflood dengan metode Trade Off Deploying Pettern (TOP), dengan evaluasi integrasi subsurface (permeabilitas, tekanan reservoir) dan non-subsurface (Capex, footprint, fasilitas).
Artikel 2	Stimulasi pengasaman (acidizing) dengan HCl vs Carboxylic Acid pada sumur lapangan Duri (pumping pressure 400 psi, laju injeksi 2 bbl/min, volume asam 600 gal). Menggunakan analisis stabilitas scale dengan metode Stiff & Davis. Dan hasilnya adalah HCl lebih efektif & ekonomis, memberi insight optimalisasi perawatan sumur steamflood.
Artikel 3	Simulasi numerik injeksi solvent pada tahap akhir steamflood (pola inverted 9-spot, sumur vertikal). Dibandingkan 3 skenario penggunaan solvent. Solvent dapat memperpanjang umur steamflood dengan efisiensi energi lebih baik.
Artikel 4	Simulasi numerik injeksi uap pada reservoir dangkal dengan CMG Builder dan CMOST. Dengan membandingkan tiga opsi pengembangan: pola inverted 7-spot, penggunaan sumur horizontal, dan pattern size reduction (PSR).

Number	Artikel
Artikel 5	Implementasi teknologi Ayman Solar Concentrator (ASC) dengan basalt-packed bed thermal storage untuk menggantikan boiler gas pada proyek steamflood Duri.

Artikel 1 menjelaskan mengenai perbandingan kinerja dari dua spacing yaitu 5.5 acre dan 11.6 acre. Kegunaan dari studi ini adalah untuk memberikan kerangka keputusan yang menggabungkan aspek teknis dan ekonomi untuk memilih pola pengembangan steamflood. Hal ini berguna untuk *trade-off* antara *recoverable oil* dengan biaya, yang akan memberi rujukan untuk mengkuantifikasi resiko atau ketidak pastian dalam desain pola. Lokasi yang berada di Tanjung Field pada blok Rokan, yang menargetkan Delima 690 send sebagai target *steamflood* dengan kondisi reservoir yang memiliki permeabilitas sangat baik yaitu di antara 2-5 darcy, tanpa adanya gas cap dan *underlying water*. TOP sendiri merupakan metode integrasi *subsurface* dan *non-subsurface* untuk membandingkan desain pola injeksi, dengan menganalisa produktivitas, injektivitas, jumlah sumur, waktu *steam breakthrough*, kebutuhan fasilitas dan footprint lahan yang biasa digabungkan menjadi CBA/NPV.

Hasil yang didapatkan dalam study ini adalah spacing dekat (5.5 acre) memberi *recovery* dan *peak* produksi lebih tinggi, tetapi Capex jauh lebih besar sehingga secara ekonomi *pattern* 11.6 acre lebih optimal (menurunkan Capex 55% dan meningkatkan NPV sampai 108%) (Shidqi et al., 2024). Maka, pola injeksi dan spacing sangat menentukan keberhasilan ekonomi dan teknis *steamflood* yang berupa pola lebih rapat akan meningkatkan *sweep* tapi dapat merusak kelayakan ekonomi jika nilai Capex terlalu bear.

Artikel 2 menjelaskan mengenai perbandingan performa antara dua *treatment* dari hydrochloric acid dan carboxylic acid terhadap kenaikan jumlah produksi pada sumur minyak berat. Studi ini mengambil data lapangan pada sumur di lapisan x,yz pada Lapangan Duri yang dimana ini menjadi salah satu lapangan *steamflood* terbesar di Indonesia. Permasalahan utama yang dialami pada lapangan ini adalah scaling yang menurunkan jumlah produksi. Di lapangan *steamflood* pada lapangan ini memiliki masalah scale yang timbul karena perubahan suhu/tekanan akibat *steam*. Dalam study ini menunjukkan *acidizing* dapat memulihkan aliran dan produksi pada sumur terpengaruh *steam* yang artinya *acidizing* adalah solusi remedial yang berhasil meningkatkan efektivitas keseluruhan program *steamflood* (Itsnaini et al., 2024).

Artikel 3 ini menunjukkan strategi transisi, setelah SBT atau pada fase akhir yang mengganti sebagian *steam* dengan *solvent* atau *solvent-assisted schemes* dapat mempertahankan *recovery* sambil mengurangi konsumsi energi dan emisi (I. S. Budi, 2025). Metode yang dilakukan adalah simulasi reservoir 3D pada pola *inverted 9-spot* dengan menggunakan model area 15.5 acre. Dalam studi ini membandingkan 3 skenario: (1) *continuous steam*, (2) *reduced steam after SBT*, (3) *continuous solvent injection* (mis. propane) pada fase akhir steamflood. Parameter yang diamati adalah *recovery factor* (RF), *cumulative production*, *temperature*, *viscosity*, SOR, dan energi. Model ini disusun untuk kondisi khas pada lapangan pada daerah sumatra yaitu memiliki kedalaman dangkal, permeabilitas tinggi, *initial pressure* 120 psi, porositas/ketebalan sesuai pola 15.5 acre.

Dengan hasil studi yang dilakukan menunjukkan *solvent injection* (skenario 3) menghasilkan *cumulative oil recovery* yang hampir setara dengan *continuous steam* yaitu RF sedikit lebih rendah. Tetapi dengan kebutuhan energi jauh lebih kecil sehingga ekonomi lebih baik. SOR meningkat setelah SBT pada steam-only case, solvent dapat menurunkan energi per barrel di *late-stage*. Maka hal ini menunjukkan mengganti sebagian *steam* dengan *solvent* atau *solvent-assisted schemes* dapat mempertahankan *recovery* sambil mengurangi konsumsi energi dan emisi. Memberi dasar pemodelan untuk desain *slug size*, laju injeksi solvent, dan timing transisi. Berguna untuk pengambilan keputusan biaya-energi dalam pengoperasian *steamflood*.

Artikel 4 menunjukkan bahwa dengan optimasi laju injeksi dan konfigurasi sumur pada metode *steam injection* tetap dapat efektif di reservoir dangkal tanpa menyebabkan *overpressure/fracture*, yang artinya optimasi numerik ini efektif meningkatkan keberhasilan operasional *steamflood* di kondisi sulit (I. Budi & Oktaviani, 2023). Dalam studi ini didesain untuk kondisi *shallow heavy-oil* dengan pembatasan tekanan fraktur yang ketat, ini dapat diimplementasikan pada lapangan Duri. Metode yang digunakan pada studi ini adalah metode pemodelan reservoir dengan menggunakan CMG, pada model 15.5-acre *inverted-7-spot*. Variasi skenario yang digunakan adalah pola *reguler inverted 7*, penggunaan sumur horizontal, dan *pattern-size reduction* (PSR). Sensitivitas terhadap *injection rate* diuji (*ramp-up* dan *maintenance*), *objective function* untuk meminimalkan *Cumulative SOR* sambil menjaga tekanan di bawah batas fraktur.

Temuan yang didapat dalam studi ini adalah skenario optimum yaitu dengan injeksi *rate ramp-up* sampai dengan tekanan 250–300 BSPD dalam 6–7 tahun lalu *wind-down* untuk mencapai CSOR target 3–4. Hal ini menjadi opsi terbaik mencakup *pattern size reduction* atau penggunaan sumur horizontal untuk meningkatkan *injectivity*

dan *sweep* tanpa melebihi tekanan fraktur. Maka, memberi panduan operasi (*ramp-up schedule, maintenance rate*), serta solusi desain (PSR, *horizontal wells*) untuk reservoir dangkal yang rentan terhadap fraktur *cap-rock*. CMOST digunakan untuk menemukan *trade-off* antara produksi puncak dan SOR atau tekanan yang tepat dipakai di fase desain dan manajemen lapangan.

Artikel 5 membahas mengenai Solar EOR yang tidak mengubah mekanisme *downhole steamflooding*, tetapi mengoptimalkan sumber steam (mengurangi biaya & emisi) sehingga meningkatkan keberlanjutan dan ekonomika proyek *steamflood* (Shafa Alifia Salsabila et al., 2023). Terutama relevan untuk lapangan *mature* yang butuh optimalisasi biaya energi. Studi menunjukkan potensi tinggi, namun bersifat perencanaan atau kelayakan butuh pilot dan implementasi lapangan untuk verifikasi penuh. Implementasinya pada lapangan duri *steamflood* yang memanfaatkan potensi surya Indonesia (DNI tinggi) untuk memenuhi kebutuhan steam besar ladang-ladang *mature*. Metodenya adalah dengan menganalisa dari kelayakan teknologi Solar EOR untuk menghasilkan *steam* sebagai substitusi *boiler gas-fired*. Dengan menganalisa teknis (DNI, ASC+TES), keekonomian, pengurangan emisi, dan potensi pasokan steam untuk proyek seperti Duri.

Temuan dalam studi ini ialah Desain ASC + TES yang mampu menyediakan *steam* selama 24-jam. Hal ini dapat memberi potensi penghematan bahan bakar yaitu penghematan MMBTU/tahun dan pengurangan emisi CO<sub>2</sub> secara signifikan. Dan secara analisis ekonomi menunjuk operasi OPEX rendah dan manfaat strategi energi bersih untuk proyek-proyek *steamflood*. Hal ini sangat berguna sebagai alternatif pasokan *steam* yang mengurangi konsumsi gas (menurunkan OPEX/CO<sub>2</sub>). Memberikan *pathway* implementasi teknologi permukaan yang dapat membuat proyek *steamflood* lebih berkelanjutan dan menurunkan biaya energi. Hal ini merupakan faktor penting saat merancang jangka panjang operasi *steam*.

Dari kelima artikel yang ditinjau, keberhasilan dari *steamflood* tidaklah hanya diperoleh dari faktor teknis yang dimana ini meliputi pola injeksi, laju injeksi, atau konfigurasi sumur. Namun juga dipengaruhi oleh strategi transisi pada fase akhir serta pemilihan sumber energi yang efisien dan berkelanjutan. Studi-studi ini menunjukkan bahwa integrasi pendekatan *subsurface* dan *non-subsurface* (teknologi, ekonomi, dan lingkungan) menjadi kunci untuk mencapai produksi optimal dengan biaya yang terkendali. Dari kelima artikel tersebut, hasil penelitian memberikan arah bahwa optimasi *steamflood* ke depan harus berfokus pada kombinasi teknik injeksi yang tepat, pengelolaan sumur yang adaptif, pemanfaatan teknologi numerik untuk mengurangi risiko, serta penerapan energi terbarukan guna mendukung keberlanjutan operasional lapangan minyak.

#### 4. KESIMPULAN

*Steam flooding* masih menjadi metode yang efektif untuk meningkatkan produksi minyak berat. Keberhasilannya dipengaruhi oleh pengaturan pola injeksi, kualitas uap, pemanfaatan sumur horizontal, serta perawatan sumur melalui *acidizing*. Dari sisi ekonomi, efisiensi biaya investasi dan operasi sangat berperan dalam menentukan nilai keekonomian proyek. Meski demikian, tantangan besar tetap ada pada kebutuhan energi yang tinggi, biaya awal yang besar, dan fluktuasi harga minyak. Menurut penulis bahwa keberlanjutan *steam flooding* hanya dapat dicapai jika aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan berjalan seimbang, termasuk dengan pemanfaatan inovasi seperti Solar-EOR.

Selain itu, masih diperlukan penelitian lebih lanjut untuk memperkuat pemahaman jangka panjang, terutama mengenai efektivitas *solvent injection* di lapangan, dampak lingkungan seperti emisi CO<sub>2</sub> dan penggunaan air, serta penerapan energi terbarukan yang hingga kini baru sebatas kajian simulasi. Ke depan, arah penelitian sebaiknya difokuskan pada uji coba lapangan nyata, analisis keberlanjutan yang lebih menyeluruh, serta model keekonomian yang selaras dengan tuntutan transisi energi global.

#### 5. REFERENSI

- Putra, B. P., & Kiono, B. F. T. (2021). Mengenal enhanced oil recovery (EOR) sebagai solusi meningkatkan produksi minyak Indonesia. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 2(2), 84-100.
- Pramana, A. A., & Ramdhani, M. I. (2022). Steam-Propane Injection Simulation for Heavy Oil. *Journal of Earth Energy Science, Engineering, and Technology*, 5(1).
- Silalahi, H., Aji, M., Elisa, A., Perdayeni, A., Oktasari, R., Lie, H., & Akbarrizal, A. (2020, October). Advancing Steamflood Performance Through a New Integrated Optimization Process: Transform the Concept into Practical. In *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition* (p. D021S007R002). SPE.
- Kusumastuti, I., Erfando, T., & Hidayat, F. (2019). Effects of Various Steam Flooding Injection Patterns and Steam Quality to Recovery Factor. *Journal of Earth Energy Engineering*, 8(1), 33-39.

- Winderasta, W., Amlan, M. H., Paksi, W. R., & Rokan, P. P. H. (2021, November). Duri steam flood fluid contacts study: redefining oil water contacts and intraformational top seals. In Join Convention Bandung (JCB).
- Hiebl, M. R. (2023). Sample selection in systematic literature reviews of management research. *Organizational research methods*, 26(2), 229-261.
- Shidqi, M. L., Lenny Puspawati, Y., Wantah, N. J. T., & Ratna, R. Trade Off Deploying Pattern (TOP): A Stochastic Integrated Subsurface and Non-Subsurface Approach for Enhanced Economics of New Steamflood Project.
- Itsaini, H., Sunarno, S., & Padil, P. (2024). Perbandingan Performa Antara Treatment Hydrochloric Acid dan Carboxylic Acid Terhadap Kenaikan Produksi pada Sumur Minyak Berat. *Journal of Bioprocess, Chemical and Environmental Engineering Science*, 5(1), 11-18.
- Budi, I. S. (2025). Numerical Simulation of Solvent Injection for Late-stage Steamflood. *Journal of Earth Energy Science, Engineering, and Technology*, 8(1), 22-31.
- Budi, I., & Oktaviani, A. (2023). Numerical Simulation Study of Steam Injection Optimization in Shallow Reservoir. *Journal of Earth Energy Engineering*, 12(2s), 67-73.
- Salsabila, S. A., Maharani, M. P., & Joestiwani, A. P. (2023). Solar Enhanced Oil Recovery as the Solution to Enhance Oil and Gas Production for Mature Fields in Indonesia. *Indonesian Journal of Energy*, 6(2), 86-102.