

## Optimasi Energi Sistem Reinjeksi melalui Konversi Pompa ke Gravitasi di Pge Karaha

Nazar Fathurrohman <sup>1</sup>, Firmansyah Maulana S N. <sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Program Studi Teknik Elektro, Universitas Siliwangi, Jl. Mugarsari, Kec. Tamansari, Kota Tasikmalaya, Indonesia

### INFORMASI ARTIKEL

Received: November 18, 2025

Reviewed: November 19, 2025

Available online: December 31, 2025

### KORESPONDEN

E-mail: [227002035@student.unsil.ac.id](mailto:227002035@student.unsil.ac.id)

### ABSTRACT

Geothermal Power Plants (PLTP) are a vital source of renewable energy that supports Indonesia's transition toward clean energy. One of the main operational challenges in geothermal plants is the high internal energy consumption, particularly in the reinjection pump system. This study aims to analyze energy efficiency based on an energy audit conducted at PGE Area Karaha and to evaluate potential savings through the modification of the reinjection system from pump-based to gravity-based operation. The research was carried out using an energy audit approach, including measurements of power consumption, self-use, and power quality using a Power Quality Analyzer. The audit results identified the reinjection pump as the most significant energy user, consuming 9,000 MWh per year. The modification scenario indicates that converting the system to gravity flow can reduce energy consumption by up to 80%, equivalent to savings of 7,200 MWh per year, and lower self-use energy by 25%. Technically, this modification improves system efficiency and equipment lifespan, while economically it provides substantial operational cost savings with a payback period of less than three years.

#### KEYWORD:

Energy Audit, Energy Efficiency, Geothermal System, Gravity, PGE Karaha Area, ReInjection Pump.

### ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) merupakan sumber energi terbarukan yang memiliki peran penting dalam mendukung transisi energi bersih di Indonesia. Salah satu tantangan utama dalam operasi PLTP adalah tingginya konsumsi energi internal, khususnya pada sistem pompa reinjeksi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi energi berdasarkan hasil audit energi di PGE Area Karaha serta mengevaluasi potensi penghematan melalui modifikasi sistem reinjeksi dari pompa menjadi sistem gravitasi. Metode penelitian dilakukan dengan pendekatan audit energi yang meliputi pengumpulan data konsumsi daya, pemakaian sendiri, dan kualitas daya menggunakan Power Quality Analyzer. Hasil audit menunjukkan bahwa pompa reinjeksi merupakan beban energi signifikan dengan konsumsi sebesar 9.000 MWh per tahun. Hasil analisis menunjukkan bahwa konversi sistem menjadi gravitasi mampu menurunkan konsumsi energi hingga 80% atau setara dengan penghematan sebesar 7.200 MWh per tahun, serta mengurangi beban pemakaian sendiri sebesar 25%. Secara teknis, modifikasi ini meningkatkan efisiensi sistem dan umur peralatan, sedangkan dari sisi ekonomi menghasilkan penghematan biaya operasional dengan periode pengembalian investasi kurang dari tiga tahun.

#### KATA KUNCI:

Audit Energi, Efisiensi Energi, Gravitasi, PGE Area Karaha, Pompa Reinjeksi, Sistem Panas Bumi.

## PENDAHULUAN

Kebutuhan energi nasional dan global terus meningkat seiring dengan pertumbuhan ekonomi, urbanisasi, serta industrialisasi yang pesat. Berdasarkan laporan Kementerian ESDM tahun 2023, konsumsi energi final Indonesia mencapai lebih dari 1.100 juta SBM, dengan sektor industri dan pembangkitan listrik sebagai penyumbang utama. Dalam konteks transisi energi bersih, Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) menjadi salah satu solusi potensial karena bersifat terbarukan dan beroperasi dengan faktor kapasitas tinggi [1], [2]. Namun, efisiensi pembangkit panas bumi di Indonesia umumnya masih rendah, yaitu berkisar 10–17%, disebabkan oleh besarnya pemakaian sendiri (own use) pada sistem bantu seperti pompa reinjeksi, pompa pendingin, dan sistem gas removal [3], [4]. Secara khusus, sistem reinjeksi fluida panas bumi berfungsi menjaga keseimbangan reservoir dan mencegah penurunan tekanan, tetapi pada banyak lapangan, termasuk di PGE Area Karaha, sistem ini masih bergantung pada pompa berdaya besar dengan konsumsi energi yang signifikan. Kondisi tersebut menimbulkan kebutuhan untuk melakukan optimasi energi agar efisiensi operasi meningkat tanpa mengganggu kinerja teknis sistem pembangkitan.

Berbagai penelitian sebelumnya telah menyoroti pentingnya reinjeksi dalam sistem panas bumi baik dari sisi teknis maupun ekonomis. Kamila dkk. [1] dan Stefansson [2] menjelaskan bahwa reinjeksi merupakan komponen kunci dalam keberlanjutan reservoir, namun sering kali menimbulkan beban listrik besar akibat operasi pompa bertekanan tinggi. Studi oleh Yuan dkk. [5] dan Li dkk. [6] mengemukakan bahwa optimasi operasi multi-sumur dan pengaturan laju injeksi dapat meningkatkan performa sistem tanpa mengurangi stabilitas reservoir. Sementara itu, Zarrouk dan Moon [3] menemukan bahwa efisiensi global PLTP secara signifikan dipengaruhi oleh proporsi energi yang dikonsumsi oleh peralatan bantu, terutama pompa dan sistem pendingin. Beberapa pendekatan efisiensi seperti load-based control system dan variable speed drive juga terbukti mampu menekan konsumsi energi [4]. Meskipun demikian, penelitian terdahulu masih terbatas pada optimasi operasi pompa, belum banyak yang mengkaji rekayasa desain sistem reinjeksi berbasis gravitasi sebagai alternatif strategis penghematan energi, khususnya dalam konteks audit energi komprehensif di lapangan nyata seperti PGE Karaha.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi energi pada sistem reinjeksi di PGE Area Karaha berdasarkan hasil audit energi, serta mengevaluasi potensi penghematan energi melalui konversi sistem dari berbasis pompa menjadi berbasis gravitasi. Pendekatan ini menggabungkan metode audit energi kuantitatif untuk mengidentifikasi Significant

Energy Use (SEU) dengan analisis teknis dan ekonomi terhadap skenario modifikasi sistem. Perbedaan utama penelitian ini dibanding studi sebelumnya terletak pada integrasi antara evaluasi efisiensi berbasis audit energi aktual dan rekayasa sistem gravitasi yang memanfaatkan kondisi topografi Karaha. Gap penelitian yang diangkat adalah minimnya kajian yang menghubungkan hasil audit energi dengan desain sistem reinjeksi berbasis gravitasi dalam konteks peningkatan efisiensi energi PLTP. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi praktis terhadap peningkatan efisiensi energi dan pengurangan pemakaian sendiri di sistem pembangkit panas bumi Indonesia.

## TINJAUAN PUSTAKA

Audit energi merupakan pendekatan sistematis untuk mengidentifikasi, mengukur, dan menganalisis konsumsi energi dalam suatu sistem atau fasilitas dengan tujuan menemukan peluang penghematan energi. Dalam praktiknya, audit energi dibagi ke dalam beberapa level mulai dari audit awal hingga audit mendetail yang melibatkan pengukuran langsung dan pemodelan, di mana fokus utamanya adalah pada Significant Energy Use (SEU) yang menyumbang porsi terbesar konsumsi energi. SEU sering menjadi sasaran utama dalam tindakan efisiensi, karena perubahan kecil di titik ini dapat menghasilkan dampak signifikan terhadap konsumsi energi total [7].

Dalam konteks pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP), efisiensi energi tidak hanya ditentukan oleh performa turbin dan konversi energi panas menjadi listrik, tetapi juga oleh konsumsi energi internal (own use) yang meliputi pompa reinjeksi, pompa pendingin, blower, serta sistem gas removal. Studi review global mengenai efisiensi pembangkit panas bumi menunjukkan bahwa konsumsi energi internal menjadi salah satu penyebab rendahnya efisiensi keseluruhan PLTP dibanding pembangkit termal konvensional [3]. Optimalisasi operasi peralatan bantu, khususnya pompa, menjadi salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi sistem [4], [8].

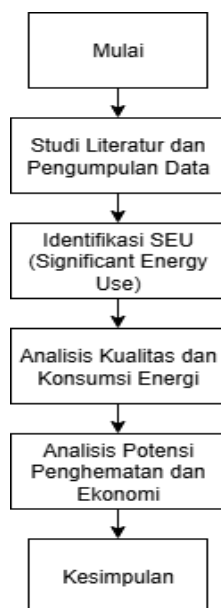
Reinjeksi fluida merupakan bagian penting dari operasi PLTP, karena berfungsi menjaga tekanan reservoir, mengurangi risiko penurunan produksi, dan melindungi lingkungan. Beberapa penelitian telah membahas aspek teknis reinjeksi, termasuk pengalaman lapangan di berbagai negara [1], [2]. Pemodelan numerik juga telah digunakan untuk menganalisis distribusi tekanan, aliran fluida, serta perilaku termal akibat reinjeksi [9], [10]. Studi optimasi injeksi di reservoir batu pasir menunjukkan bahwa parameter teknis seperti laju injeksi, filtrasi, dan kualitas fluida sangat memengaruhi performa reinjeksi [6]. Selain aspek teknis, terdapat juga penelitian yang menyoroti peran gravitasi dalam sistem reinjeksi. Studi di Lapangan Rotokawa, Selandia Baru, menunjukkan bahwa reinjeksi fluida dingin dapat menimbulkan perubahan

gravitasi dan redistribusi massa fluida, sehingga menegaskan bahwa aliran gravitasi berperan dalam perilaku sistem [11]. Hal ini membuka peluang penelitian lebih lanjut mengenai desain sistem reinjeksi berbasis gravitasi sebagai alternatif untuk mengurangi beban listrik pompa.

Secara keseluruhan, berbagai studi terdahulu menunjukkan bahwa reinjeksi sangat penting bagi keberlanjutan reservoir panas bumi. Namun, gap penelitian masih terlihat, terutama terkait integrasi audit energi dengan strategi konversi sistem reinjeksi pompa menjadi gravitasi. Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan untuk menilai potensi penghematan energi melalui audit energi di PGE Area Karaha dengan fokus pada optimalisasi sistem reinjeksi.

## METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan audit energi terapan untuk menganalisis efisiensi sistem reinjeksi di PGE Area Karaha serta mengevaluasi potensi penghematan energi dari konversi sistem pompa menjadi sistem gravitasi. Audit energi dilakukan mengikuti pedoman SNI ISO 50002:2014 tentang Audit Energi, yang mencakup tahapan data collection, measurement, analysis, identification of Significant Energy Use (SEU), serta recommendation of energy saving opportunities [7], [12]. Penggunaan metode ini bertujuan agar hasil analisis dapat direplikasi dan dibandingkan dengan audit energi di fasilitas pembangkit lain. Penelitian difokuskan pada sistem reinjeksi fluida sebagai unit observasi utama karena hasil audit awal menunjukkan konsumsi energi tertinggi pada sistem ini.



Gambar 1. Flowchart Alur Penelitian

## Lokasi Penelitian



Gambar 2. Lokasi Penelitian PGE Area Karaha

Gambar 2 menunjukkan lokasi penelitian yang berada di PGE Area Karaha, Jawa Barat, Indonesia, yang merupakan lapangan panas bumi dengan sistem reinjeksi berbasis pompa berdaya tinggi. Objek yang diamati meliputi dua unit pompa reinjeksi, sistem perpipaan, dan panel distribusi daya. Data dikumpulkan melalui dua sumber: (1) pengukuran langsung di lapangan menggunakan Power Quality Analyzer (PQA) untuk merekam parameter kelistrikan (tegangan antar fasa, arus, daya aktif, daya reaktif, faktor daya, dan harmonisa), serta (2) data historis operasi pembangkit selama satu tahun (2024) yang mencakup jam operasi, beban puncak, dan konsumsi listrik tahunan. Pengambilan data dilakukan pada kondisi operasi normal dengan beban mendekati 80–100% kapasitas untuk memastikan representativitas hasil.

## Metode Identifikasi SEU (Significant Energy Use)

Identifikasi Significant Energy Use (SEU) dilakukan dengan menghitung konsumsi energi setiap peralatan bantu menggunakan persamaan

$$E = P \times t \quad (1)$$

di mana  $E$  adalah energi (kWh),  $P$  daya terpasang (kW), dan  $t$  waktu operasi (jam). Peralatan dengan kontribusi tertinggi terhadap total konsumsi energi ditetapkan sebagai SEU utama. Pendekatan ini sejalan dengan praktik audit energi industri yang merekomendasikan prioritas analisis pada beban terbesar dan paling sering beroperasi [7], [13]. Selain itu, dilakukan evaluasi kualitas daya listrik berdasarkan standar IEEE 1159 untuk menentukan potensi rugi-rugi akibat unbalance atau harmonisa.

## Analisis Potensi Penghematan Energi

Untuk menganalisis potensi penghematan, dilakukan perbandingan dua skenario operasi:

1. Skenario eksisting, yaitu sistem reinjeksi dengan pompa konvensional, dan
2. Skenario modifikasi, yaitu sistem dengan aliran gravitasi yang memanfaatkan topografi alami.

Estimasi penghematan energi dihitung dari selisih konsumsi daya antara kedua skenario berdasarkan model teknis dan data hasil audit. Perhitungan biaya energi menggunakan asumsi tarif listrik internal Rp 1.200/kWh, sedangkan analisis ekonomi mencakup biaya investasi modifikasi, penghematan tahunan, dan periode pengembalian investasi (payback period). Metode ini

merupakan adaptasi dari pendekatan audit energi termomekanik pada pembangkit termal yang dikembangkan oleh Yohanes dkk. [14].

Prosedur ini disusun untuk memastikan penelitian dapat direplikasi oleh peneliti independen pada fasilitas geothermal lain dengan kondisi serupa. Perbedaan utama dengan metode terdahulu terletak pada integrasi antara audit energi empiris dan simulasi desain sistem gravitasi, yang memungkinkan evaluasi simultan dari aspek teknis, energi, dan ekonomi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Audit Energi

Berdasarkan hasil audit energi di PGE Area Karaha, konsumsi daya listrik internal (*own use*) didominasi oleh sistem pompa reinjeksi. Identifikasi SEU menunjukkan bahwa pompa reinjeksi merupakan beban dengan konsumsi energi terbesar, diikuti pompa pendingin dan sistem gas removal. Pola ini sesuai dengan penelitian yang menyebutkan bahwa pompa merupakan komponen dengan kontribusi signifikan dalam konsumsi energi pada PLTP [4].

Tabel 1. Identifikasi SEU di PGE Area Karaha

Peralatan	Daya Terpasang (kW)	Jam Operasi (jam/tahun)	Konsumsi Energi (MWh/tahun)	Keterangan
Pompa Reinjeksi	1.200	7.500	9.000	SEU utama
Pompa Pendingin	800	7.500	6.000	SEU
Sistem Gas Removal	500	7.500	3.750	Beban signifikan
Beban lain (auxiliaries)	300	7.500	2.250	Tidak signifikan

Berdasarkan Tabel 1 di atas, pompa reinjeksi memiliki daya terpasang dan konsumsi energi tahunan tertinggi yaitu 1.200 kW dengan penggunaan energi mencapai 9.000 MWh/tahun, sehingga dikategorikan sebagai *Significant Energy Use (SEU)* utama. Peralatan lain seperti pompa pendingin dan sistem gas removal juga berkontribusi terhadap penggunaan energi, namun tidak sebesar pompa reinjeksi. Hasil identifikasi ini menunjukkan bahwa upaya efisiensi energi paling potensial dilakukan pada sistem

54 Nazar Fathurrohman

reinjeksi melalui analisis dan modifikasi operasi untuk menurunkan konsumsi daya secara signifikan.

Hasil Pengukuran Kualitas Daya

Pengukuran dengan Power Quality Analyzer menunjukkan nilai *voltage unbalance* < 2% dan *current unbalance* < 10%, sesuai standar IEEE 1159. Kondisi ini masih dalam batas toleransi, namun fluktuasi arus yang tinggi pada pompa dapat meningkatkan rugi-rugi energi dan memperpendek umur peralatan. Hasil ini sejalan dengan studi audit energi di industri yang menegaskan pentingnya pengendalian kualitas daya untuk menjaga efisiensi [13].

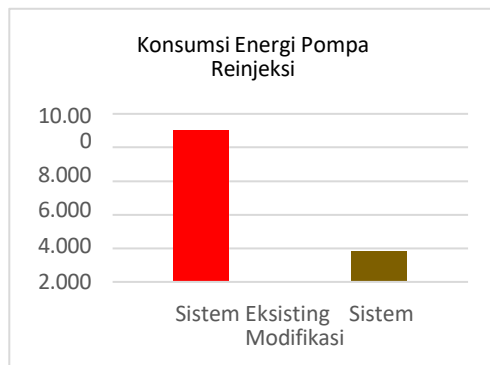
Analisis Potensi Penghematan Tahun 2025

Audit energi juga mengidentifikasi peluang penghematan melalui modifikasi jalur reinjeksi. Dengan memanfaatkan topografi Karaha, jalur reinjeksi dapat diubah dari sistem berbasis pompa menjadi aliran gravitasi. Skenario ini diperkirakan mampu mengurangi beban pompa reinjeksi hingga 80%, setara dengan penghematan energi sekitar 7.200 MWh/tahun atau ~0,82 MWe [4].

Tabel 2. Estimasi Penghematan Energi dari Modifikasi Sistem Reinjeksi

Skenario	Konsumsi Energi Pompa Reinjeksi (MWh/tahun)	Penghematan (%)	Potensi Penghematan Energi (MWh/tahun)
Sistem Eksisting (Pompa)	9.000	–	–
Sistem Modifikasi (Gravitasi)	1.800	80%	7.200

Berdasarkan Tabel 2, sistem eksisting berbasis pompa membutuhkan energi sebesar 9.000 MWh per tahun. Setelah dilakukan modifikasi menjadi sistem gravitasi, konsumsi energi turun menjadi 1.800 MWh per tahun atau terjadi penghematan sekitar 80%, setara dengan 7.200 MWh per tahun. Pengurangan konsumsi energi ini menunjukkan potensi efisiensi yang sangat signifikan pada sistem operasi reinjeksi, yang kemudian divisualisasikan pada grafik berikut untuk memperjelas perbandingan kedua skenario.



Gambar 3. Grafik Konsumsi Energi

Gambar 3 di atas memperlihatkan perbedaan mencolok antara konsumsi energi sistem eksisting dan sistem modifikasi. Batang merah menunjukkan sistem pompa dengan konsumsi energi jauh lebih tinggi dibandingkan batang biru pada sistem gravitasi. Visualisasi ini menegaskan bahwa penerapan sistem gravitasi mampu secara nyata menurunkan kebutuhan energi tahunan pada proses reinjeksi.

#### **Perbandingan Konsumsi Energi Sebelum dan Sesudah Modifikasi**

Jika dibandingkan, sistem gravitasi jelas lebih efisien dibandingkan sistem pompa. Konsumsi energi total dapat ditekan hingga 25% dari konsumsi *own use* PLTP. Hal ini konsisten dengan penelitian optimasi pompa pendingin dan sistem gas removal yang menunjukkan bahwa modifikasi sistem pompa mampu memberikan penghematan energi signifikan [4].

#### **Diskusi Implikasi Teknis dan Ekonomis**

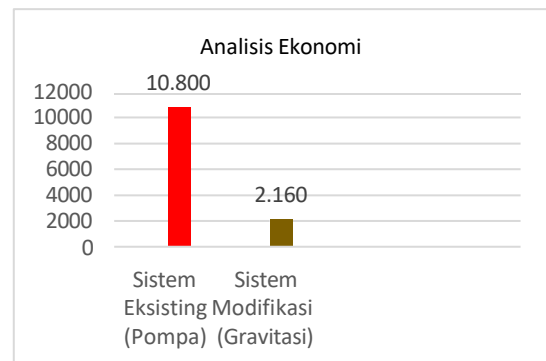
Secara teknis, modifikasi sistem reinjeksi menjadi gravitasi akan mengurangi beban listrik dari pompa, menurunkan potensi overheating, dan memperpanjang umur peralatan. Dari sisi kualitas daya, penurunan beban juga akan mengurangi ketidakseimbangan arus yang sering muncul saat pompa bekerja pada beban parsial [13].

Tabel 3. Analisis Ekonomi Sistem Reinjeksi Pompa dan Gravitasi

Skenario	Biaya Energi Tahunan (Rp juta/tahun)	Penghematan (%)	Potensi Penghematan Biaya Tahunan (Rp juta/tahun)	Potensi Penghematan Energi (Rp juta/tahun)
Sistem Eksisting (Pompa)	10.800	—	—	—
Sistem Modifikasi (Gravitasi)	2.160	80%	8.640	—

Dari Tabel 3 diatas penghematan energi sebesar 7.200 MWh/tahun dapat mengurangi biaya operasional listrik dalam jumlah besar. Dengan asumsi biaya listrik internal Rp 1.200/kWh, maka penghematan mencapai Rp 8,64

miliar per tahun. Investasi modifikasi jalur pipa reinjeksi diperkirakan dapat kembali dalam jangka waktu kurang dari 3 tahun. Analisis serupa pada pembangkit termal lain menunjukkan bahwa audit energi berbasis modifikasi sistem mampu memberikan manfaat teknis sekaligus ekonomis yang signifikan [14].



Gambar 4. Grafik Perbandingan Biaya

Gambar 4 di atas menunjukkan visualisasi hasil analisis ekonomi berdasarkan Tabel 3. Terlihat bahwa sistem eksisting berbasis pompa memiliki biaya energi tahunan sebesar Rp 10,8 miliar, jauh lebih tinggi dibandingkan sistem modifikasi berbasis gravitasi yang hanya sebesar Rp 2,16 miliar. Selisih tersebut menggambarkan potensi penghematan biaya energi sekitar 80%, yang menunjukkan efektivitas signifikan dari penerapan sistem gravitasi dalam menurunkan beban biaya operasional pembangkit.

#### **Perbandingan Hasil dengan Penelitian Sebelumnya**

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa modifikasi sistem reinjeksi dari berbasis pompa menjadi gravitasi dapat menurunkan konsumsi energi hingga 80%, setara dengan penghematan 7.200 MWh per tahun. Nilai efisiensi ini sejalan dengan studi oleh Yamin dkk. [4], yang melaporkan peningkatan efisiensi sistem pompa pendingin hingga 70% melalui penerapan kontrol berbasis beban (*load-based control system*). Namun, berbeda dengan penelitian tersebut yang berfokus pada optimasi operasi pompa eksisting, penelitian ini menawarkan pendekatan rekayasa sistem gravitasi yang secara struktural menghilangkan kebutuhan pompa sebagai beban listrik utama. Secara teknis, temuan ini juga mendukung hasil Sinaga dan Darmanto [8] yang menunjukkan bahwa optimasi sistem bantu pada PLTP mampu mengurangi pemakaian sendiri (*own use*) hingga 20–30%.

Dari sisi efisiensi keseluruhan pembangkit, hasil ini konsisten dengan tinjauan global oleh Zarrouk dan Moon [3] yang menegaskan bahwa efisiensi PLTP sangat dipengaruhi oleh konsumsi listrik internal. Akan tetapi, penelitian ini memperluas konteks tersebut dengan bukti empiris di lapangan PGE Karaha, menunjukkan bahwa pengurangan beban pompa secara fisik melalui sistem gravitasi mampu menekan *own use* hingga 25% dari total energi pembangkitan. Hal ini juga memperkuat pandangan Liberova dkk. [7]

Bahwa kombinasi audit energi dan modifikasi teknis merupakan strategi efektif untuk meningkatkan efisiensi industri energi.

Selain itu, dari aspek ekonomi, estimasi penghematan biaya operasional sebesar Rp 8,64 miliar per tahun dengan *payback period* kurang dari tiga tahun menunjukkan nilai keekonomian yang sangat kompetitif dibanding hasil audit termomekanik oleh Yohanes dkk. [14], yang memperoleh *payback* sekitar empat tahun pada sistem konvensional. Dengan demikian, hasil penelitian ini memberikan kontribusi baru berupa model integratif audit energi dan rekayasa sistem gravitasi yang terbukti mampu meningkatkan efisiensi sekaligus memperpendek periode pengembalian investasi pada PLTP.

## KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil menganalisis efisiensi energi sistem reinjeksi di PGE Area Karaha berdasarkan hasil audit energi dan mengevaluasi potensi penghematan melalui konversi sistem dari berbasis pompa menjadi gravitasi. Hasil audit menunjukkan bahwa pompa reinjeksi merupakan *Significant Energy Use (SEU)* utama dengan konsumsi energi sebesar 9.000 MWh per tahun, sementara penerapan sistem gravitasi berpotensi menurunkan konsumsi energi hingga 80% atau setara dengan penghematan 7.200 MWh per tahun, sehingga mengurangi beban pemakaian sendiri sekitar 25%. Secara teknis, modifikasi sistem ini menurunkan beban listrik dan memperpanjang umur peralatan, sedangkan dari sisi ekonomi menghasilkan penghematan biaya energi tahunan sebesar Rp 8,64 miliar dengan periode pengembalian investasi kurang dari tiga tahun. Hasil ini memperkuat temuan penelitian terdahulu bahwa integrasi audit energi dengan rekayasa sistem merupakan pendekatan efektif dalam peningkatan efisiensi pembangkit panas bumi. Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan dilakukan simulasi dinamis terhadap performa sistem gravitasi pada berbagai kondisi operasi serta analisis dampak jangka panjang terhadap kestabilan reservoir dan sistem distribusi fluida, agar hasil penelitian ini dapat diterapkan secara lebih komprehensif dalam desain efisiensi energi di PLTP lain di Indonesia.

## REFERENSI

- [1] Z. Kamila, E. Kaya, and S. J. Zarrouk, "Reinjection in geothermal fields: An updated worldwide review 2020," *Geothermics*, vol. 89, p. 101970, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.geothermics.2020.101970.
- [2] V.-ður Stefansson, "Geothermal reinjection experience," *Geothermics*, vol. 26, no. 1, pp. 99–139, Feb. 1997, doi: 10.1016/S0375-

- 6505(96)00035-1.
- [3] S. J. Zarrouk and H. Moon, "Efficiency of geothermal power plants: A worldwide review," *Geothermics*, vol. 51, pp. 142–153, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.geothermics.2013.11.001.
- [4] W. Yamin, I. G. B. N. Makertihartha, and J. Rizkiana, "Evaluation on Energy Efficiency Improvement in Geothermal Power Plant with The Application of Load- based Gas Removal System and Cooling Water Pump Control System," *Jurnal Rekayasa Proses*, vol. 14, no. 1, Jun. 2020, doi: 10.22146/jrekpros.54656.
- [5] W. Yuan *et al.*, "Performance of Multi-Well Exploitation and Reinjection in a Small-Scale Shallow Geothermal Reservoir in Huailai County," *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 9, Dec. 2021, doi: 10.3389/feart.2021.786389.
- [6] H. Li *et al.*, "Study on Optimization of Geothermal Tail Water Reinjection Process in Moderately Deep Sandstone," *Geofluids*, vol. 2021, pp. 1–9, Feb. 2021, doi: 10.1155/2021/6617547.
- [7] V. Liberova *et al.*, "Unleashing Energy Potential: Insights of Energy Audit Practices," *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 3, p. 522, Jan. 2025, doi: 10.3390/en18030522.
- [8] R. H. M. Sinaga and P. S. Darmanto, "Energy Optimization Modeling of Geothermal Power Plant (Case Study: Darajat Geothermal Field Unit III)," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 42, p. 012017, Sep. 2016, doi: 10.1088/1755-1315/42/1/012017.
- [9] F. Parisio and K. Yoshioka, "Modeling Fluid Reinjection Into an Enhanced Geothermal System," *Geophys Res Lett*, vol. 47, no. 19, Oct. 2020, doi: 10.1029/2020GL089886.
- [10] J. Li *et al.*, "Geo-temperature response to reinjection in sandstone geothermal reservoirs," *Geothermal Energy*, vol. 11, no. 1, p. 35, Dec. 2023, doi: 10.1186/s40517-023-00277-z.
- [11] T. Hunt and D. Bowyer, "Reinjection and gravity changes at Rotokawa geothermal field, New Zealand," *Geothermics*, vol. 36, no. 5, pp. 421–435, Oct. 2007, doi: 10.1016/j.geothermics.2007.07.004.
- [12] D. Liu, Y. Cai, Z. Feng, Q. Zhang, L. Hu, and S. Li, "Feasibility Study on Geothermal Dolomite Reservoir Reinjection with Surface Water in Tianjin, China," *Water (Basel)*, vol. 16, no. 21, p. 3144, Nov. 2024, doi: 10.3390/w16213144.
- [13] A. S. J. Wardhana and E. S. Damarwan, "Identification of Energy Saving Potential Through Energy Audit at PT. ABC," *Jurnal Edukasi Elektro*, vol. 7, no. 1, pp. 63–74, May 2023, doi: 10.21831/jee.v7i1.61657.
- [14] A. R. Yohanes, Widayat, and J. Windarta, "Optimization of Mechanical Thermal Energy Audit At Pelabuhan Ratu Unit 2 With Pi Vision," *E3S Web of Conferences*, vol. 519, p. 02004, May 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202451902004.