JURNAL LOCUS: Penelitian & Pengabdian
Volume 5 No. 10 October 2026
E-ISSN 2829-7334| P-ISSN 2829-5439
Hompage: https://locus.rivierapublishing.id/index.php/jl

Analisis Pemanfaatan Panas Brine Separator untuk Pembangkit Listrik Siklus Rankine Organik (SRO) di PLTP Supreme Energy Rantau Dedap

Jantan Manalaoon*, Sri Haryati, Budi Santoso
Universitas Sriwijaya, Indonesia
Email: jantanmanalaoon@gmail.com*, sriharyati@ft.unsri.ac.id, budisantoso@ft.unsri.ac.id

Keywords:
Organic Rankine Cycle (ORC); Geothermal Brine; Working Fluid; Pinch Point Temperature; Economic Feasibility.

Abstract
Indonesia possesses substantial geothermal energy potential, yet the residual heat contained in separator brine at geothermal power plants is often underutilized and directly reinjected into the reservoir. This study aims to analyze the potential utilization of brine heat from the separator at PLTP Supreme Energy Rantau Dedap (SERD) for power generation using an Organic Rankine Cycle (ORC) system. Simulation and optimization were performed using Engineering Equation Solver (EES) software by varying four working fluids (R123, R245fa, isobutane, and n-pentane), working fluid mass flow rate, and turbine outlet pressure, with a minimum Pinch Point Temperature (TPP) of 5°C applied as a heat exchanger design constraint. The results show that the ORC system has the potential to generate an optimum net power output of 2.832 MW, corresponding to an annual electricity production of 22,327,488 kWh/year. Working fluid selection significantly affects system performance, with R123 producing the highest net power output and thermal efficiency (12.97%) compared to the other three fluids. The optimum mass flow rate was obtained when TPP reached its minimum limit of 5°C, while the optimum turbine outlet pressure was found at 100 kPa. Economic analysis indicates that the ORC system is feasible for development, with an NPV of USD 8,946,897, an IRR of 18%, a discounted payback period of 6.46 years, and an LCOE of USD 0.072/kWh, lower than the power purchase agreement (PPA) value of USD 0.115/kWh. This study provides technical and economic recommendations for the development of brine-based ORC power plants in Indonesia.

Kata Kunci:
Siklus Rankine Organik (SRO); Brine Panas Bumi; Fluida Kerja; Pinch Point Temperature; Kelayakan Ekonomi.

Abstrak
Indonesia memiliki potensi energi panas bumi yang sangat besar, namun pemanfaatan panas dari brine keluaran separator PLTP sering belum dioptimalkan dan langsung diinjeksikan kembali ke reservoir. Penelitian ini bertujuan menganalisis potensi pemanfaatan panas brine separator PLTP Supreme Energy Rantau Dedap (SERD) untuk pembangkitan listrik menggunakan sistem Siklus Rankine Organik (SRO). Simulasi dan optimasi dilakukan menggunakan perangkat lunak *Engineering Equation Solver* (EES) dengan memvariasikan empat jenis fluida kerja (R123, R245fa, isobutana, dan n-pentana), laju alir massa fluida kerja, serta tekanan keluaran turbin, dengan batasan *Pinch Point Temperature* (TPP) minimum sebesar 5°C sebagai constraint desain heat exchanger. Hasil penelitian

menunjukkan bahwa sistem SRO berpotensi menghasilkan daya listrik bersih optimum sebesar 2,832 MW dengan produksi energi listrik tahunan sebesar 22.327.488 kWh/tahun. Pemilihan fluida kerja terbukti berpengaruh signifikan terhadap performa sistem, di mana R123 menghasilkan daya listrik bersih dan efisiensi termal tertinggi (12,97%) dibandingkan tiga fluida kerja lainnya. Laju alir massa optimum diperoleh saat TPP mencapai batas minimum 5°C, sedangkan tekanan outlet turbin optimum diperoleh pada 100 kPa. Analisis keekonomian menunjukkan sistem SRO ini layak dikembangkan, dengan NPV sebesar USD 8.946.897, IRR sebesar 18%, Discounted Payback Period 6,46 tahun, dan LCOE sebesar USD 0,072/kWh yang lebih rendah dibandingkan nilai PPA sebesar USD 0,115/kWh. Penelitian ini memberikan rekomendasi teknis dan ekonomis bagi pengembangan pembangkit SRO berbasis brine panas bumi di Indonesia.

PENDAHULUAN

Indonesia diperkirakan memiliki potensi energi panas bumi mencapai 23.965,5 megawatt (MW) atau sekitar 24 gigawatt (GW). Menurut kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) dalam siaran pers No. 516.Pers/04/SJI/2024 pada 18 September 2024 menyebutkan penambahan kapasitas PLTP dari tahun 2014 hingga 2024 telah mencapai 1,2 GW, sehingga total kapasitas terpasang panas bumi pada tahun 2024 menjadi 2,6 GW, atau sekitar 11% dari total potensi panas bumi nasional (Abbas et al., 2022; Afriandi, 2017; Ahmad, 2023; Ahmet et al., 2014).

Provinsi Sumatera Selatan merupakan salah satu daerah dengan potensi energi panas bumi terbesar di Indonesia karena berada pada jalur vulkanik Bukit Barisan yang memiliki sistem panas bumi aktif (Aneke et al., 2011; Ata & Kahraman, 2021; Brilian et al., 2022; Bull et al., 2025; Putera, 2019). Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), potensi panas bumi di Provinsi Sumatera Selatan diperkirakan mencapai sekitar 918 MW, yang tersebar pada beberapa Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP), di antaranya Lumut Balai–Margabayur, Rantau Dedap, Tanjung Sakti, serta beberapa daerah prospek lainnya seperti Ranau, Rawas, dan Empat Lawang. Besarnya potensi tersebut menjadikan Sumatera Selatan sebagai salah satu wilayah strategis dalam mendukung pengembangan energi baru terbarukan (EBT) dan pencapaian target bauran energi nasional serta *Net Zero Emission* (NZE) 2060 (Kementerian ESDM, 2022). Meskipun demikian, hingga tahun 2026 kapasitas pembangkit panas bumi yang telah dimanfaatkan masih relatif kecil dibandingkan potensi yang tersedia, sehingga peluang pengembangan pembangkit listrik panas bumi di Sumatera Selatan masih sangat besar (Kementerian ESDM, 2026).

Pemanfaatan energi panas bumi di Sumatera Selatan saat ini didukung oleh dua pembangkit utama, yaitu PLTP Rantau Dedap yang dioperasikan oleh PT Supreme Energy Rantau Dedap dengan kapasitas terpasang sekitar 91,2 MW, serta PLTP Lumut Balai milik PT Pertamina Geothermal Energy (PGE) yang telah mengoperasikan Unit 1 dan Unit 2 dengan total kapasitas 110 MW. Selain itu, PGE juga telah memulai pengembangan PLTP Lumut Balai Unit 3 dan merencanakan Unit 4, masing-masing berkapasitas 55 MW, sebagai bagian dari Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2025–2034. Di samping proyek-proyek yang telah beroperasi, wilayah Tanjung Sakti juga mulai dikembangkan sebagai prospek panas

bumi baru yang diharapkan dapat meningkatkan kapasitas pembangkit listrik panas bumi di Sumatera Selatan (Chen et al., 2010; Damarseckin, 2024; Delapedra-Silva, 2022).

Dalam sistem pembangkit listrik panas bumi konvensional, hanya sebagian energi panas yang dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik, sementara sebagian lainnya terutama dari brine (air panas sisa pemisahan pada separator) masih mengandung energi panas yang cukup besar dengan suhu 100 oC sampai 180 oC dan brine tersebut belum dimanfaatkan secara maksimal dan langsung diinjeksikan kembali kedalam bumi melalui sumur injeksi (DiPippo, 2012; Ekanem, 2024; Fadhlurrahman & UI, 2021; Fahlevi, 2023; Selatan, 2026).

Brine dengan suhu menengah ini masih menyimpan energi termal yang cukup besar dan dapat diubah menjadi listrik melalui teknologi siklus rankine organik (SRO). Siklus rankine organik merupakan teknologi yang cocok untuk memanfaatkan energi panas dengan temperatur rendah hingga menengah, seperti yang terdapat pada brine. Sistem SRO menggunakan fluida kerja organik seperti R245fa, n-pentana dengan titik didih rendah untuk menghasilkan daya dari sumber panas residual (Ganes & Achamd, 2015; Gonidaki & Bellos, 2025; Guo, 2022; Guzović, 2025).

Pembangkit listrik panas bumi Supreme Energy Rantau Dedap (SERD) berlokasi di Kabupaten Muara Enim, Kabupaten Lahat dan Kota Pagar Alam. PLTP Rantau dedap telah beroperasi secara komersial pada 26 Desember 2021 dengan kapasitas pembangkitan 2 x 49 MW. Teknologi yang digunakan Pada PLTP Rantau dedap ialah dual flash sistem dimana terdapat 2 jenis sumur produksi yaitu sumur produksi dengan tekanan tinggi (*high pressure*) dan sumur bertekanan rendah (*low pressure*). Fluida 2 fasa dari masing-masing sumur akan di alirkan menuju High Pressure Separator (HP Separator) dan *Low Pressure Separator* (LP Separator) untuk memisahkan antara fasa uap (*Steam*) dan fasa cair (*Brine*) yang selanjutnya akan diinjeksikan kembali kedalam reservoir panas bumi melalui sumur injeksi sedangkan fasa uap (*steam*) akan dialirkan menuju pembangkit untuk menggerakkan turbine guna menghasilkan energi listrik ((IRENA), 2025; He et al., 2025; Hirahmah, 2025).

Pada sistem pembangkitan dual flash fasa cair (brine) yang keluar dari separator masih memiliki temperatur 118 oC – 120oC dengan total laju alir massa 180 – 240 kg/s dan langsung diinjeksikan kembali melalui sumur injeksi. Pada saat ini khusunya lapangan panas bumi di indonesia telah menerapkan teknologi binary *cycle powerplant/ siklus rankine organic* (SRO). Pembangkit *binary cycle* ialah pembangkit yang memanfaatkan fluida cair panas bumi yang masih panas (Temperatur 90 – 150 oC) untuk memanaskan fluida kerja di dalam alat penukar panas (*heat exchanger*), sehingga fluida panas bumi tidak langsung menggerakan turbine hanya memanaskan fluida kerja saja dengan sistem tertutup (Izuwa, 2024; Jiménez-García, 2023).

Beberapa penelitian telah dilakukan terkait pemanfaatan panas limbah brine menggunakan SRO diantaranya Melysa et al., (2024) menunjukkan bahwa brine di PLTP Sorik Marapi memiliki potensi untuk menghasilkan listrik tambahan melalui sistem SRO sederhana. Pemanfaatan panas limbah brine panas bumi dengan sistem bottoming Organic Rankine Cycle (ORC) juga telah di kaji oleh (Brilian et al., 2022) pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Lumut Balai pada penelitian ini menunjukkan adanya potensi energi panas tersisa yang signifikan untuk dikonversi menjadi energi listrik tambahan. (Pambudi & Ulfa, 2023) menyatakan bahwa implementasi teknologi SRO dapat meningkatkan kapasitas pembangkitan nasional melalui sumber panas residual.

Penelitian mengenai pemilihan fluida kerja pada sistem rankin organik (SRO) untuk pembangkit listrik panas bumi telah dibahas secara oleh (Tulenbayev, 2025) dalam penelitiannya dilakukan analisis komparatif terhadap performa dari beberapa fluida kerja seperti R245fa, Pentana, dan butane. Dari hasil penelitian Tulenbayev menunjukkan bahwa fluida dengan titik didih lebih rendah, seperti Pentana, cenderung memberikan performa yang lebih baik pada kondisi temperatur panas bumi rendah.

Meskipun studi SRO telah banyak dilakukan, masih terdapat kesenjangan dalam penelitian khususnya terkait optimalisasi SRO untuk kondisi brine di lapangan panas bumi Indonesia secara spesifik. Beberapa lokasi memiliki karakteristik fluida yang unik dan berbeda, sehingga diperlukan pemodelan dan simulasi berbasis data lokal sesuai area atau wilayah kerja panas bumi tertentu. Selain itu, kajian efisiensi berdasarkan variasi fluida kerja dan konfigurasi siklus pada satu lokasi masih jarang dilakukan secara komprehensif pada penelitian penelitian sebelumnya.

Pada penelitian ini dilakukan untuk mempelajari dan mengetahui potensi energi listrik dengan sistem siklus rankine organik (SRO) yang dihasilkan dengan memanfaatkan fluida cair (*brine*) keluaran separator dengan melakukan variasi pada laju alir massa fluida kerja, jenis fluida kerja/organik yang digunakan dan variasi dari nilai tekanan pada keluaran turbin. Adapun penelitian dilakukan dengan menggunakan *software Engineering Equation Solver* (EES) untuk perhitungan termodinamika dan data properties senyawa kimia fluida kerja. Manfaat teoretis penelitian ini adalah memperkaya kajian tentang optimalisasi SRO untuk pemanfaatan brine panas bumi di Indonesia, khususnya di PLTP Rantau Dedap, sedangkan manfaat praktisnya adalah memberikan rekomendasi teknis dan ekonomis bagi pengembangan pembangkit SRO berbasis brine panas bumi. Kontribusi penelitian ini terletak pada analisis komprehensif yang menggabungkan variasi fluida kerja, laju alir massa, dan tekanan keluaran turbin, serta analisis keekonomian yang mencakup NPV, IRR, DPP, dan LCOE, sehingga dapat menjadi acuan bagi pengambil keputusan dalam mengembangkan pembangkit listrik panas bumi di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Waktu & Tempat Penelitian

Waktu dan tempat penelitian akan dilakukan secara langsung di PLTP Rantau dedap pada periode April – October 2026. Adapun terkait data operational akan diambil dari data server di *Central Control Room* (CCR) dan untuk data laju alir massa brine akan diambil dari data tracer flow test terupdate.

Matriks Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode simulasi numerik untuk mengevaluasi kinerja sistem *Organic Rankine Cycle* (ORC) yang memanfaatkan energi panas brine dari separator PLTP Supreme Energy Rantau Dedap. Variasi penelitian difokuskan pada jenis fluida kerja, laju alir massa fluida kerja, dan tekanan keluaran turbin. Variasi jenis fluida kerja yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari R123, R245fa, n-pentana, dan isobutana. Keempat fluida tersebut dipilih karena memiliki karakteristik termofisika yang sesuai untuk pemanfaatan sumber panas bertemperatur menengah dari fluida brine geothermal serta telah banyak digunakan dalam penelitian dan aplikasi sistem ORC.

Laju alir massa fluida kerja divariasikan pada rentang 80–120 kg/s dengan interval 10 kg/s, sehingga diperoleh lima variasi laju alir massa, yaitu 80, 90, 100, 110, dan 120 kg/s. Variasi ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh jumlah fluida kerja yang bersirkulasi terhadap proses penyerapan panas, daya keluaran turbin, dan efisiensi sistem ORC.

Selain itu, tekanan keluaran turbin divariasikan pada rentang 50–300 kPa dengan interval 50 kPa, sehingga diperoleh enam variasi tekanan, yaitu 50, 100, 150, 200, 250, dan 300 kPa. Variasi tekanan keluaran turbin dilakukan untuk menganalisis pengaruh rasio ekspansi terhadap performa turbin dan efisiensi siklus secara keseluruhan. Kombinasi dari empat jenis fluida kerja, lima variasi laju alir massa fluida kerja, dan enam variasi tekanan keluaran turbin menghasilkan 120 skenario simulasi yang akan dianalisis menggunakan perangkat lunak *Engineering Equation Solver* (EES). Hasil simulasi kemudian dibandingkan untuk menentukan kondisi operasi dan jenis fluida kerja yang memberikan kinerja terbaik berdasarkan parameter daya netto, efisiensi termal, efisiensi eksergi, serta pemanfaatan energi panas brine.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi Awal Menggunakan Microsoft Excel

Sebelum dilakukan simulasi dan optimasi menggunakan program *Engineering Equation Solver* (EES), penelitian ini terlebih dahulu melakukan perhitungan awal menggunakan Microsoft Excel. Tahap ini bertujuan untuk memperoleh gambaran awal mengenai performa beberapa fluida kerja serta menentukan rentang parameter operasi yang akan dianalisis lebih lanjut. Pendekatan ini umum digunakan dalam penelitian siklus rankine organik, dimana proses optimasi biasanya diawali dengan tahap pemilihan atau penentuan fluida kerja dan estimasi performa awal sebelum dilakukan simulasi termodinamika yang lebih rinci (Jiménez-García et al., 2023).

Tabel 1. Hasil simulasi awal menggunakan microsoft excel

Deskripsi	Unit	R - 123	R - 245fa	isobutana	Pentana
W_turbin	MW	3.37	3.73	6.21	7.56
W_pump	MW	0.03	0.60	1.95	0.60
Qin					
Minimum	MW	23.04	23.04	23.04	23.04
Maksimum	MW	48.35	48.35	48.35	48.35
Rata-rata	MW	37.19	37.19	37.19	37.19
W_net	MW	3.34	3.13	4.27	6.96
η_thermal					
Minimum	%	6.90	6.48	8.82	14.39
Maksimum	%	14.48	13.59	18.5	30.2
Rata-rata	%	9.0	8.4	11.5	18.7

Hasil simulasi awal menggunakan Microsoft Excel pada laju alir massa fluida kerja sebesar 50 kg/s menunjukkan bahwa n-Pentana menghasilkan daya netto tertinggi sebesar 6,96 MW dengan efisiensi termal rata-rata sebesar 18,7%. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan Isobutana yang menghasilkan daya listrik bersih sebesar 4,27 MW dengan efisiensi termal sebesar 11,5%, sedangkan R123 dan R245fa menghasilkan daya netto masing-masing sebesar 3,34 MW dan 3,13 MW.

Performa n-Pentana yang lebih tinggi pada perhitungan awal menggunakan Microsoft esxcel menunjukkan bahwa karakteristik termodinamika fluida tersebut memiliki kesesuaian yang baik dengan sumber panas brine pada temperatur 125°C. Menurut Sanchez et al. (2025), pemilihan fluida kerja merupakan salah satu faktor yang paling berpengaruh terhadap performa sistem siklus rankine organik karena sifat termodinamika fluida akan menentukan kemampuan penyerapan panas, proses ekspansi turbin, dan efisiensi konversi energi secara keseluruhan.

Meskipun demikian, hasil simulasi menggunakan Microsoft Excel pada tahap ini tidak digunakan secara langsung sebagai dasar penentuan kondisi optimum akhir. Hasil tersebut digunakan sebagai acuan nilai awal (*initial guess*) untuk simulasi lanjutan menggunakan EES. Penggunaan nilai awal yang diperoleh dari Microsoft excel bertujuan untuk mempercepat proses iterasi dan menentukan rentang parameter operasi yang layak untuk dianalisis lebih lanjut.

Tahap simulasi berikutnya dilakukan menggunakan EES karena perangkat lunak tersebut memiliki kemampuan untuk menyelesaikan ribuan persamaan nonlinier yang saling terhubung secara simultan dan menyediakan basis data sifat termodinamika untuk ratusan fluida kerja (Klein, 2024). Selain itu, EES mampu menghitung sifat termodinamika seperti entalpi, entropi, temperatur, dan kualitas uap secara langsung berdasarkan kondisi operasi yang ditentukan sehingga lebih sesuai untuk simulasi dan optimasi perhitungan pembangkit listrik dengan sistem SRO yang melibatkan perubahan fase fluida kerja.Data pada table 4.2 yang diperoleh dari perhitungan Microsoft Excel pada penelitian selanjutnya akan digunakan sebagai tahap preliminary screening dan penentuan nilai awal simulasi, sedangkan hasil optimasi akhir akan diperoleh dari simulasi dan optimasi dengan program EES karena dianggap lebih representatif dalam menggambarkan perilaku termodinamika sistem SRO.

Gambar 4.1 menunjukkan diagram temperatur–entropi (T-s) dari empat fluida kerja yang diplot berdasarkan data properties masing – masing fluida kerja yang diinput dari Microsoft excell, yaitu R123, R245fa, Isobutana, dan n-Pentana pada sistem Siklus Rankine Organik (SRO). Diagram T-s digunakan untuk menggambarkan perubahan kondisi termodinamika fluida kerja selama proses kompresi, pemanasan, evaporasi, ekspansi di turbin, dan kondensasi. Berdasarkan diagram tersebut, seluruh fluida kerja menunjukkan karakteristik dry fluid, yang ditandai dengan kemiringan positif pada kurva uap jenuh di sisi kanan kubah saturasi. Karakteristik ini menguntungkan karena proses ekspansi di turbin tetap berada pada fase uap sehingga mengurangi potensi terbentuknya tetesan cair yang dapat menyebabkan erosi pada sudu turbin dan menurunkan efisiensi sistem (Sanchez et al., 2025).

berdasarkan perbandingan bentuk siklus pada diagram T-s, n-Pentana memiliki daerah ekspansi yang paling luas dibandingkan R123, R245fa, dan Isobutana. Luas daerah siklus menunjukkan potensi penurunan entalpi selama proses ekspansi, sehingga secara teoritis n-Pentana berpotensi menghasilkan kerja spesifik turbin yang lebih besar. Selain itu, temperatur kritis n-Pentana yang relatif tinggi membuat fluida ini sesuai untuk memanfaatkan sumber panas bertemperatur menengah, seperti brine panas bumi. Sebaliknya, R245fa memiliki daerah siklus yang lebih sempit sehingga potensi kerja spesifiknya lebih rendah, sedangkan Isobutana menunjukkan karakteristik yang baik untuk sumber panas bertemperatur rendah karena memiliki temperatur penguapan yang lebih rendah dan kebutuhan kerja pompa yang relatif kecil (Pirouzfar et al., 2024).

Meskipun demikian, interpretasi diagram T-s belum dapat dijadikan dasar untuk menentukan fluida kerja yang menghasilkan daya listrik bersih (*net power output*) terbesar, karena daya bersih sistem SRO juga dipengaruhi oleh laju alir massa fluida kerja, tekanan operasi, efisiensi turbin dan pompa, serta besarnya kalor yang diserap di evaporator dan preheater. Oleh karena itu, diagram T-s pada penelitian ini digunakan sebagai analisis awal karakteristik termodinamika masing-masing fluida kerja, sedangkan penentuan fluida kerja optimum dilakukan berdasarkan hasil simulasi dan optimasi menggunakan *Engineering Equation Solver* (EES) dengan membandingkan nilai daya bersih (Wnet) dan efisiensi termal pada kondisi operasi yang sama (Mersch et al., 2025).

Pengaruh Laju Alir Massa Fluida Kerja

Penelitian ini menganalisis pengaruh laju alir massa fluida kerja dan tekanan keluar turbin terhadap performa sistem Siklus Rankine Organik (SRO), dengan menetapkan Pinch Point Temperature (TPP) minimum sebesar 5°C sebagai batasan (constraint) pada preheater. Nilai TPP 5°C dipilih karena umum digunakan pada penelitian ORC bertemperatur rendah dan mampu memberikan pemanfaatan panas yang efektif tanpa membuat kebutuhan luas heat exchanger menjadi terlalu besar dan tidak ekonomis. TPP berperan ganda dalam penelitian ini, yaitu sebagai batas termodinamika sekaligus batas desain heat exchanger, karena semakin kecil nilai TPP maka semakin efisien perpindahan panas yang terjadi, namun konsekuensinya luas permukaan heat exchanger yang dibutuhkan juga semakin besar sehingga biaya investasi meningkat.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan laju alir massa fluida kerja menyebabkan daya listrik bersih (W_net) meningkat hampir secara linear, sesuai dengan persamaan neraca energi turbin. Akan tetapi, peningkatan ini tidak dapat berlangsung tanpa batas karena begitu TPP pada preheater mencapai batas minimum 5°C, laju alir massa tidak dapat lagi dinaikkan tanpa melanggar batas desain perpindahan panas. Dari hasil optimasi, diperoleh laju alir massa optimum masing-masing fluida kerja, yaitu R123 sebesar 104 kg/s dengan efisiensi termal 12,97% dan W_net 2.832 kW, n-Pentana sebesar 48 kg/s dengan efisiensi termal 11,27% dan W_net 2.439 kW, R245fa sebesar 95 kg/s dengan efisiensi termal 11,23% dan W_net 2.388 kW, serta Isobutana sebesar 55 kg/s dengan efisiensi termal 11,02% dan W_net 2.348 kW. Meskipun R123 membutuhkan laju alir massa terbesar, fluida ini justru menghasilkan efisiensi termal dan daya listrik bersih tertinggi, menunjukkan bahwa besarnya laju alir massa optimum bukan indikator konsumsi energi yang tinggi, melainkan konsekuensi dari karakteristik termofisik fluida dalam menyerap panas dari sumber panas.

Pada aspek tekanan keluar turbin, penurunan tekanan ini meningkatkan pressure ratio antara sisi masuk dan keluar turbin sehingga proses ekspansi berlangsung lebih panjang, penurunan entalpi meningkat, dan pada akhirnya kerja turbin serta daya listrik bersih ikut meningkat. Namun, penurunan tekanan keluar turbin juga menurunkan temperatur kondensasi sehingga nilai TPP di preheater ikut menurun dan mendekati batas minimum 5°C. Oleh karena itu, tekanan keluar turbin optimum bukan ditentukan oleh daya maksimum semata, melainkan oleh titik ketika sistem masih mampu mempertahankan TPP pada batas minimum yang dipersyaratkan. Hasil optimasi menunjukkan bahwa R123 mencapai kondisi optimum pada tekanan keluar 100 kPa dengan efisiensi termal 12,97% dan W_net sebesar 2.832–2.884 kW, sementara n-Pentana optimum pada 100 kPa dengan efisiensi termal 11,27% dan W_net 2.439

kW, R245fa pada 214 kPa dengan efisiensi termal 11,23% dan W_net 2.388 kW, serta Isobutana pada 456 kPa dengan efisiensi termal 11,02% dan W_net 2.348 kW.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemilihan fluida kerja memberikan pengaruh yang lebih dominan terhadap performa siklus dibandingkan sekadar perubahan tekanan keluar turbin, karena karakteristik termofisika masing-masing fluida seperti temperatur kritis, tekanan kritis, kapasitas panas, dan panas laten penguapan menentukan kemampuan fluida dalam menyerap panas dari sumber geothermal dan mengonversinya menjadi kerja turbin secara efektif. Berdasarkan seluruh hasil optimasi, R123 disimpulkan sebagai fluida kerja dengan performa terbaik karena mampu menghasilkan kombinasi efisiensi termal dan daya listrik bersih tertinggi tanpa melanggar batas desain Pinch Point Temperature yang telah ditetapkan sebesar 5°C.

Analisi Keekonomian sistem SRO di PLTP Rantau Dedap

Setelah diperoleh fluida kerja optimum berdasarkan hasil optimasi termodinamika menggunakan EES, dilakukan analisis keekonomian terhadap sistem SRO menggunakan fluida kerja R123. Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi kelayakan investasi pembangunan pembangkit listrik SRO yang memanfaatkan panas brine separator PLTP Supreme Energy Rantau Dedap. Parameter ekonomi yang digunakan meliputi investasi awal (CAPEX), biaya operasi dan pemeliharaan (OPEX), pendapatan dari penjualan energi listrik, *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), *Discounted Payback Period* (DPP), dan *Levelized Cost of Electricity* (LCOE). Analisis dilakukan berdasarkan daya optimum yang diperoleh dari hasil optimasi menggunakan EES sehingga hasil evaluasi ekonomi merepresentasikan kondisi operasi terbaik sistem.

Analisis keekonomian pada penelitian ini menggunakan asumsi biaya investasi dan biaya operasi yang mengacu pada *Technology Data for the Indonesian Power Sector 2024: Catalogue for Generation and Storage of Electricity*. Dokumen tersebut digunakan sebagai acuan dalam penentuan parameter ekonomi sehingga estimasi biaya yang digunakan sesuai dengan kondisi pengembangan pembangkit listrik di Indonesia. Perhitungan dilakukan berdasarkan kapasitas pembangkit hasil optimasi termodinamika menggunakan fluida kerja R123, sedangkan perhitungan rinci setiap parameter ekonomi disajikan pada lampiran.

Tabel 2. Parameter dan Asumsi Analisis Keekonomian Sistem SRO

Deskripsi	Satuan	Nilai
Daya Optimum	kW	2.832
Jam Operasional	jam/tahun	8.760
Produksi Listrik tahunan	kWh/tahun	22.327.488
CAPEX	USD/kW	11.894.400
OPEX	USD/tahun	356.832
Revenue	USD/tahun	2.567.661
Discount Rate	-	10%
Capacity Factor	-	90%
Umur Proyek	Tahun	30
PPA	USD/kW	0.115

Berdasarkan parameter dan asumsi dasar analisis keekonomian, dilakukan evaluasi kelayakan investasi sistem SRO pada kondisi operasi optimum hasil optimasi termodinamika.

Indikator ekonomi yang dianalisis meliputi *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), *Discounted Payback Period* (DPP), dan *Levelized Cost of Electricity* (LCOE). Selain itu, untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai kelayakan investasi, dilakukan analisis sensitivitas terhadap parameter ekonomi utama serta disajikan grafik *cumulative discounted cash flow* untuk menunjukkan perkembangan arus kas proyek dan waktu pengembalian investasi (*payback period*).

Tabel 3. Analisis Keekonomian

Parameter	Hasil	Kriteria	Kelayakan
NPV	8,946,897	> 0	Layak
IRR	18%	> Discount Rate (10%)	Layak
Discounted Payback Period	6.46 Tahun	< Umur Proyek (30 Tahun)	Layak
LCOE	0.072 USD/kW	< PPA (0.115 USD/kw)	Layak

Berdasarkan hasil analisis keekonomian pada Tabel 4.7, sistem Siklus Rankine Organik (SRO) menghasilkan *Net Present Value* (NPV) sebesar USD 8.946.897, *Internal Rate of Return* (IRR) sebesar 18%, *Discounted Payback Period* (DPP) selama 6,46 tahun, dan *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) sebesar USD 0,072/kWh. Nilai seluruh indikator tersebut menunjukkan bahwa pemanfaatan panas brine separator melalui sistem SRO layak untuk dikembangkan sebagai pembangkit listrik tambahan di PLTP Supreme Energy Rantau Dedap.

Nilai NPV sebesar USD 8.946.897 yang bernilai positif menunjukkan bahwa nilai sekarang dari seluruh arus kas bersih selama umur proyek lebih besar dibandingkan dengan biaya investasi awal. Menurut Delapedra-Silva et al. (2022), NPV merupakan indikator utama dalam evaluasi finansial proyek energi terbarukan, di mana proyek dinyatakan layak apabila memiliki nilai NPV positif (NPV > 0) karena mampu memberikan keuntungan ekonomi selama umur operasinya.

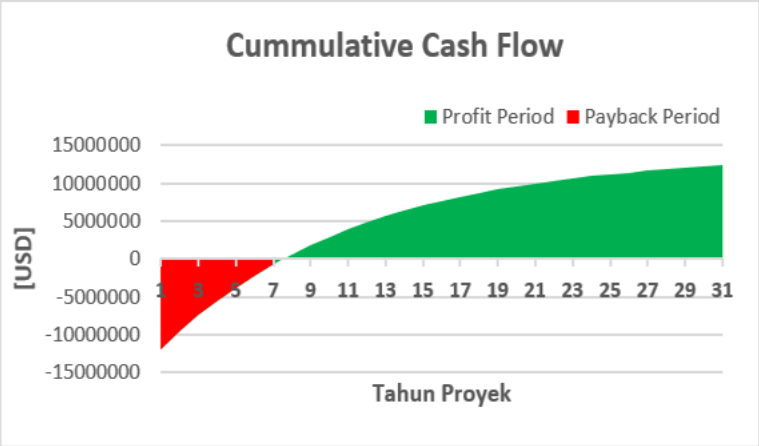
Nilai IRR sebesar 18% juga lebih tinggi dibandingkan discount rate sebesar 10%, sehingga tingkat pengembalian investasi melebihi tingkat keuntungan minimum yang disyaratkan. Kondisi ini menunjukkan bahwa proyek memiliki tingkat profitabilitas yang baik dan layak untuk direalisasikan. Obileke dan Mukumba (2025) menjelaskan bahwa IRR merupakan salah satu indikator utama dalam *techno-economic analysis*, dan proyek dinilai layak apabila nilai IRR lebih besar daripada discount rate atau biaya modal yang digunakan dalam analisis investasi.

Hasil analisis *Discounted Payback Period* (DPP) menunjukkan bahwa investasi awal dapat kembali dalam waktu 6,46 tahun, lebih cepat dibandingkan umur proyek selama 30 tahun. Hal tersebut mengindikasikan bahwa risiko investasi relatif rendah karena modal dapat dipulihkan sebelum proyek berakhir. Menurut Rahmaana et al. (2025), DPP digunakan untuk mengevaluasi waktu pengembalian investasi dengan mempertimbangkan nilai waktu uang, dan proyek dinilai layak apabila periode pengembalian lebih pendek daripada umur ekonomis proyek.

Selain itu, diperoleh nilai LCOE sebesar USD 0,072/kWh, yang lebih rendah dibandingkan harga jual listrik (*Power Purchase Agreement*/PPA) sebesar USD 0,115/kWh. Kondisi ini menunjukkan bahwa biaya pembangkitan listrik sistem SRO lebih rendah daripada pendapatan yang diperoleh dari penjualan listrik sehingga proyek memiliki margin ekonomi

yang positif. IRENA (2025) menyatakan bahwa LCOE merupakan indikator utama untuk menilai daya saing ekonomi suatu teknologi pembangkit, dan semakin rendah nilai LCOE dibandingkan harga jual listrik atau teknologi pembanding maka semakin kompetitif dan layak proyek tersebut untuk dikembangkan.

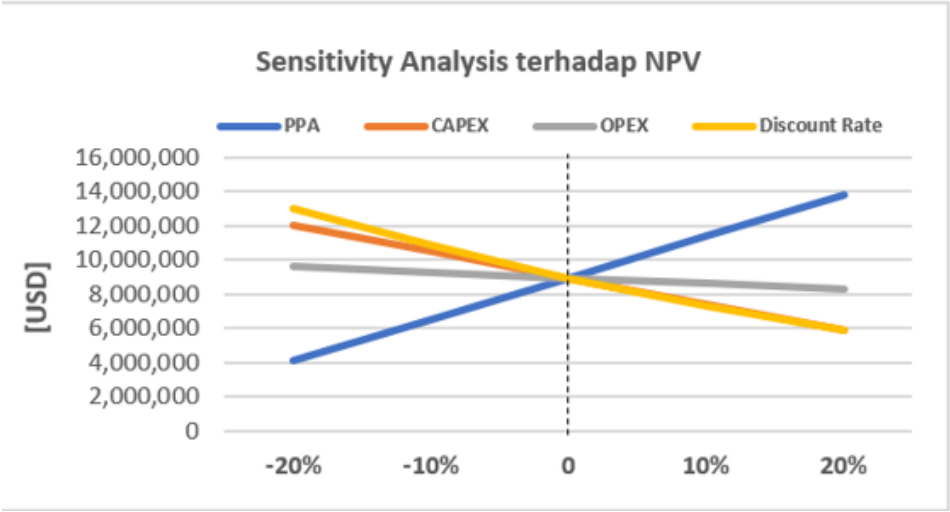
Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh indikator ekonomi telah memenuhi kriteria kelayakan investasi, yaitu NPV > 0, IRR > discount rate, DPP < umur proyek, dan LCOE < harga jual listrik (PPA). Hasil ini menunjukkan bahwa sistem SRO yang memanfaatkan panas brine separator tidak hanya memberikan kinerja termodinamika yang baik, tetapi juga memiliki prospek investasi yang layak dan kompetitif untuk diterapkan pada PLTP Supreme Energy Rantau Dedap. Temuan ini sejalan dengan berbagai penelitian *techno-economic* pada proyek energi terbarukan yang menggunakan kombinasi indikator NPV, IRR, DPP, dan LCOE sebagai dasar pengambilan keputusan investasi.



Gambar 1. Cumulative Discounted Cash Flow Sistem SRO

Gambar 1 menunjukkan perkembangan *cumulative discounted cash flow* sistem SRO selama umur proyek 30 tahun. Pada awal proyek, arus kas kumulatif bernilai negatif akibat besarnya investasi awal (CAPEX) yang dikeluarkan sebelum pembangkit mulai menghasilkan pendapatan. Seiring bertambahnya umur operasi, arus kas kumulatif meningkat secara bertahap karena pendapatan dari penjualan energi listrik mampu menutupi biaya operasi dan pemeliharaan. Kondisi ini merupakan karakteristik umum pada proyek pembangkit energi yang memiliki investasi awal tinggi dengan manfaat ekonomi yang diperoleh selama masa operasi (Guo et al., 2022).

Kurva menunjukkan bahwa titik impas (*break-even point*) dicapai pada tahun ke-6,46, yang merupakan *Discounted Payback Period* (DPP) proyek. Setelah periode tersebut, arus kas kumulatif menjadi positif dan terus meningkat hingga akhir umur proyek, menunjukkan bahwa investasi telah kembali dan proyek menghasilkan keuntungan bersih secara berkelanjutan. Menurut Delapedra-Silva et al. (2022), proyek energi terbarukan dinilai layak apabila mampu mencapai arus kas kumulatif positif dalam umur ekonomisnya, sehingga hasil ini memperkuat bahwa sistem SRO yang dikembangkan memiliki prospek investasi yang baik dan layak untuk diimplementasikan.



Gambar 2. Sensitivitas NPV terhadap Perubahan Parameter Ekonomi

Gambar 2 menunjukkan hasil analisis sensitivitas terhadap nilai Net Present Value (NPV) akibat perubahan sebesar ±20% pada parameter ekonomi utama, yaitu Power Purchase Agreement (PPA), CAPEX, OPEX, dan discount rate. Terlihat bahwa PPA merupakan parameter yang paling berpengaruh terhadap nilai NPV, di mana peningkatan harga jual listrik meningkatkan NPV secara signifikan, sedangkan penurunannya menyebabkan penurunan NPV. Sebaliknya, peningkatan CAPEX dan discount rate menyebabkan penurunan NPV karena meningkatnya biaya investasi dan faktor diskonto yang mengurangi nilai sekarang dari arus kas masa depan. Pengaruh OPEX terhadap NPV relatif lebih kecil dibandingkan parameter lainnya. Hasil ini sejalan dengan penelitian IRENA (2023) dan Delapedra-Silva et al. (2022) yang menyatakan bahwa harga jual listrik, biaya investasi, dan tingkat diskonto merupakan parameter paling sensitif dalam analisis keekonomian proyek energi terbarukan.

Meskipun dilakukan variasi parameter hingga ±20%, nilai NPV pada seluruh skenario masih berada di atas nol. Hal ini menunjukkan bahwa sistem SRO memiliki tingkat ketahanan (economic robustness) yang baik terhadap perubahan parameter ekonomi dan tetap layak untuk dikembangkan. Menurut IRENA (2023), analisis sensitivitas merupakan metode yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat risiko investasi dengan mengidentifikasi parameter yang paling memengaruhi kelayakan ekonomi suatu proyek. Oleh karena itu, hasil analisis ini memperkuat bahwa pemanfaatan panas brine separator menggunakan sistem SRO memiliki prospek investasi yang baik serta tetap memberikan keuntungan pada rentang perubahan parameter yang dianalisis.

KESIMPULAN

Pemanfaatan panas brine dari separator PLTP Supreme Energy Rantau Dedap menggunakan sistem Siklus Rankine Organik (SRO) terbukti berpotensi menghasilkan daya listrik bersih optimum sebesar 2,832 MW, dengan produksi energi listrik tahunan mencapai 22.327.488 kWh/tahun. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem SRO dapat meningkatkan pemanfaatan energi panas bumi yang sebelumnya belum termanfaatkan secara optimal. Pemilihan fluida kerja terbukti berpengaruh signifikan terhadap performa sistem, di mana dari empat fluida kerja yang dianalisis yaitu R123, R245fa, isobutana, dan n-pentana, R123

menghasilkan daya listrik bersih dan efisiensi termal tertinggi sehingga ditetapkan sebagai fluida kerja optimum.

Selain pemilihan fluida kerja, laju alir massa fluida kerja juga berpengaruh terhadap daya listrik bersih dan efisiensi termal sistem. Peningkatan laju alir massa mampu meningkatkan daya listrik hingga mencapai kondisi optimum, namun peningkatan tersebut dibatasi oleh nilai *temperature pinch point* (TPP) minimum sebesar 5°C yang berfungsi sebagai batas perpindahan panas yang efektif sekaligus batas kelayakan desain heat exchanger. Sejalan dengan hal tersebut, tekanan outlet turbin optimum diperoleh pada 100 kPa dengan fluida kerja R123, yang menghasilkan daya listrik bersih maksimum sebesar 2,832 MW disertai efisiensi termal optimum tanpa melanggar batas minimum TPP yang telah ditetapkan.

Dari sisi keekonomian, sistem SRO ini dinyatakan layak untuk dikembangkan. Analisis kelayakan menunjukkan nilai *Net Present Value* (NPV) sebesar USD 8.946.897, *Internal Rate of Return* (IRR) sebesar 18%, *Discounted Payback Period* selama 6,46 tahun, serta *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) sebesar USD 0,072/kWh. Nilai LCOE tersebut lebih rendah dibandingkan nilai *Power Purchase Agreement* (PPA) sebesar USD 0,115/kWh, sehingga secara keseluruhan sistem SRO ini tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga menguntungkan secara ekonomi untuk diterapkan dalam pemanfaatan panas brine PLTP Supreme Energy Rantau Dedap.

REFERENSI

(IRENA), I. R. E. A. (2025). *Renewable power generation costs in 2024*. IRENA.

Abbas, W. K., Baumhögger, E., & Vrabec, J. (2022). *Experimental investigation of organic Rankine cycle performance using alkanes or hexamethyldisiloxane as a working fluid*.

Afriandi, A. (2017). Analisis pemanfaatan geothermal brine untuk pembangkitan listrik dengan menggunakan heat exchanger. *Jurnal Teknik ITS*, *7*(1).

Ahmad, A. H. (2023). *Thermodynamic and economic comparison of organic Rankine cycle and Kalina cycle as bottoming unit to utilize exhaust steam from back pressure turbine geothermal power plant*.

Ahmet, Mustafa, & Tugrul. (2014). *Performance analysis of supercritical binary geothermal power plants*. https://doi.org/10.1155/2014/326839

Aneke, M., Agnew, B., & Underwood, C. (2011). Performance analysis of the Chena binary geothermal power plant. *Applied Thermal Engineering*, *31*(10), 1825–1832.

Ata, S., & Kahraman, A. (2021). *Determination of optimum pinch point temperature difference depending on heat source temperature and organic fluid with genetic algorithm*.

Brilian, V. A., Akbar, F. M., & Saputra, R. W. (2022). Techno-economic study of separated brine heat recovery using bottoming organic Rankine cycle in Lumut Balai Geothermal Power Plant, Indonesia. In *Proceedings of the 47th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University.

Bull, J., Pound, J., Radulovic, J., & Buick, J. (2025). Low-temperature ORC systems: Influence of the approach point and pinch point temperature differences. *Energies*, *18*(11), 2954. https://doi.org/10.3390/en18112954

Chen, H., Goswami, D. Y., & Stefanakos, E. K. (2010). A review of ORC for waste heat recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*, 3059–3067.

Damarseckin, S. (2024). A comparative review of ORC and regenerative ORC technologies in low-temperature energy recovery applications. *Heliyon*.

Delapedra-Silva, V. (2022). Methods for financial assessment of renewable energy sources projects: A review. *Processes*, *10*(2), 184.

DiPippo, R. (2012). *Geothermal power plants: Principles, applications, case studies, and environmental impact*. Butterworth-Heinemann.

Ekanem, I. I. (2024). Thermodynamic simulations of exergy efficiency in organic Rankine cycles. *Advances in Petroleum Exploration and Management*.

Fadhlurrahman, M., & UI, T. (2021). *Kajian pemanfaatan panas buang brine dari PLTP Lahendong dengan teknologi SRO, Kalina, dan superkritik CO_2* [Universitas Indonesia]. https://lontar.ui.ac.id/detail?id=20454330&lokasi=lokal

Fahlevi, O. (2023). *Analisis performansi sistem pembangkit listrik SRO GE Clean Cycle 125 kW dengan memanfaatkan brine panas bumi*. PPSDM Migas ESDM.

Ganes, & Achamd, A. (2015). *Permodelan pembangkit panas bumi hybrid binary cycle*. UPN Veteran Yogyakarta.

Gonidaki, D., & Bellos, E. (2025). A detailed review of organic Rankine cycles driven by combined heat sources. *Energies*, *18*, 526.

Guo, Y. (2022). Cost–benefit analysis of photovoltaic-storage investment in industrial park based on life-cycle economics. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *53*, 102700.

Guzović, Z. (2025). Effect of working fluid on characteristics of organic Rankine cycle systems. *Energies*, *18*(7), 1699.

He, H., Li, Y., Du, H., Wang, D., Li, F., & Huang, H. (2025). Advanced analysis and multi-objective optimization of geothermal organic Rankine cycle systems. In *SSRN*.

Hirahmah, A. (2025). Optimization of geothermal binary cycle technology: A review. *Journal of Renewable Energy, Electrical, and Computer Engineering*.

Izuwa, N. C. (2024). *Comparative analysis of geothermal binary ORC systems: Performance and environmental considerations for CO_2 and water as geofluids*.

Jiménez-García, J. C. (2023). A comprehensive review of organic Rankine cycles. *Processes*, *11*(7), 1982.

Putera, A. D. P. (2019). *Thermo-economic analysis of a geothermal binary power plant in Indonesia—A pre-feasibility case study of the Wayang Windu site*.

Selatan, D. E. dan S. D. M. P. S. (2026). *Sosialisasi Proyek Strategis Nasional (PSN) dan penyelarasan pemerintah daerah dengan PT Pertamina Geothermal Energy Area Lumut Balai*.