

Analisis Pengaruh Estimasi Temperatur Reservoir terhadap Fluida Kerja dan Kelayakan Ekonomi Sistem Geotermal Klayili

Musa Tandiarrang¹, Atus Buku², Corvis Rantererung³

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia Paulus, Kota Makassar, Sulawesi Selatan 90245

musatandiarrang@gmail.com

Abstract: *Uncertainty in reservoir temperature estimation can influence technology selection and the techno-economic evaluation of geothermal utilization. This study aims to evaluate the effects of multi-geothermometer-based reservoir temperature variations on the performance of an Organic Rankine Cycle (ORC) and the techno-economic prospects of the Klayili geothermal resource in Southwest Papua, Indonesia. Four temperature scenarios were considered: Silica (79.68°C), Na-K Fournier (155.59°C), Na-K Giggenbach (174.43°C), and Na-K-Ca (144.77°C). ORC performance was compared using R245fa, R134a, and isobutane through thermodynamic modeling in Python with CoolProp, while the techno-economic evaluation was conducted using GEOPHIRES. The results show that no single working fluid consistently outperformed the others across all temperature scenarios. At the lowest temperature, the three fluids produced nearly identical net power, whereas performance differences became more pronounced at higher temperatures. Isobutane achieved the best performance under the Na-K Giggenbach scenario, producing 1.375 MW of net power with a thermal efficiency of 11.94%. GEOPHIRES simulations showed that increasing reservoir temperature was associated with higher electricity production and conversion efficiency and lower breakeven electricity costs. The Na-K Giggenbach scenario provided the highest technical performance, with an average net electricity production of 1.33 MW, annual net electricity generation of 10.51 GWh, and the lowest breakeven electricity cost of 33.74 cents/kWh. These findings highlight the importance of considering geothermometer-derived temperature variations in working-fluid selection and preliminary geothermal techno-economic assessments.*

Keywords: *geothermometer, Klayili geothermal resource, Organic Rankine Cycle, working fluid, GEOPHIRES, techno-economic analysis.*

Abstrak: Ketidakpastian estimasi temperatur reservoir dapat memengaruhi pemilihan teknologi konversi dan evaluasi teknis-ekonomi pemanfaatan panas bumi. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh variasi temperatur reservoir berbasis multi-geotermometer terhadap kinerja *Organic Rankine Cycle* (ORC) dan prospek teknis-ekonomi sumber panas bumi Klayili, Papua Barat Daya. Empat skenario temperatur digunakan, yaitu Silika (79,68°C), Na-K Fournier (155,59°C), Na-K Giggenbach (174,43°C), dan Na-K-Ca (144,77°C). Kinerja ORC dibandingkan menggunakan R245fa, R134a, dan isobutane dengan pemodelan termodinamika berbasis Python dan CoolProp, sedangkan evaluasi teknis-ekonomi dilakukan menggunakan GEOPHIRES. Hasil menunjukkan bahwa tidak terdapat satu fluida kerja yang secara konsisten unggul pada seluruh skenario temperatur. Pada temperatur rendah, ketiga fluida menghasilkan daya bersih yang hampir sama, sedangkan perbedaannya semakin nyata pada temperatur yang lebih tinggi. Isobutane memberikan kinerja tertinggi pada skenario Na-K Giggenbach dengan daya bersih 1,375 MW dan efisiensi termal 11,94%. Simulasi GEOPHIRES menunjukkan bahwa peningkatan temperatur reservoir diikuti peningkatan produksi listrik dan efisiensi konversi serta penurunan biaya listrik impas. Skenario Na-K Giggenbach menghasilkan kinerja teknis tertinggi dengan produksi listrik neto rata-rata 1,33 MW, energi tahunan 10,51 GWh, dan biaya listrik impas terendah 33,74 cents/kWh. Hasil ini menegaskan bahwa variasi estimasi temperatur geotermometer perlu dipertimbangkan dalam pemilihan fluida kerja dan evaluasi awal pengembangan panas bumi.

Kata kunci: geotermometer, panas bumi Klayili, *Organic Rankine Cycle*, fluida kerja, GEOPHIRES, teknis-ekonomi

Informasi Artikel: Diterima: xx-xx-xxxx, Disetujui: xx-xx-xxxx, Dipublikasikan: xx-xx-xxxx

1. Pendahuluan

Panas bumi memiliki peran penting dalam transisi energi rendah karbon karena sifatnya yang kontinu dan dapat dioperasikan secara *dispatchable*. Pada 2024, kapasitas pembangkit listrik panas bumi dunia mencapai sekitar 15,1 GW dengan pemanfaatan langsung sekitar 245 TWh (REN21, 2025; IEA, 2024). Di Indonesia, sumber daya panas bumi tercatat sekitar 23.742 MW, sedangkan kapasitas terpasang pada 2025 baru mencapai sekitar 2.744 MW (Kementerian ESDM RI, 2025). Kesenjangan ini menunjukkan bahwa pengembangan sumber daya lokal bertemperatur rendah hingga menengah tetap relevan untuk didorong.

Pada tahap eksplorasi awal, geotermometer kimia berbasis SiO_2 serta kation Na, K, Ca, dan Mg lazim digunakan untuk mengestimasi temperatur reservoir ketika data sumur belum tersedia (Arnórsson et al., 1983; Fournier & Truesdell, 1973; Giggenbach, 1988)). Namun, estimasi ini mengandung ketidakpastian karena setiap persamaan dibangun atas mekanisme kesetimbangan dan rentang kondisi yang berbeda, sehingga menghasilkan nilai temperatur yang bervariasi antar-metode (Liu et al., 2024; Taide et al., 2024). Fenomena serupa juga teramati pada sistem non-vulkanik di Indonesia timur, misalnya perbedaan signifikan antara temperatur permukaan dan estimasi Na–K di Cekungan Bula (Yushantarti & Hermawan, 2022), serta variasi *geothermal play* di Lengan Utara Sulawesi (Gustama & Afifah, 2025). Kedua temuan ini menegaskan bahwa manifestasi bertemperatur rendah di permukaan tidak selalu meniadakan potensi panas yang lebih tinggi di bawah permukaan.

Air Panas Klayili di Kabupaten Sorong, Papua Barat Daya, memiliki temperatur permukaan 49–51°C dengan karakter fluida netral hingga basa yang didominasi bikarbonat. Tandiarang et al. (2026) telah mengkaji sumber ini melalui klasifikasi fluida $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$ dan beberapa geotermometer: geotermometer silika menghasilkan estimasi 77,30–79,68°C, sedangkan Na–K–Ca menghasilkan nilai lebih tinggi dan dipilih sebagai skenario representatif pada 144,77°C, dengan potensi termal berkisar 1,981–10,921 MWth tergantung skenario yang digunakan. Studi tersebut menegaskan bahwa hasilnya masih bersifat awal karena belum didukung data sumur maupun survei geofisika, sehingga merekomendasikan kajian teknis-ekonomi lanjutan. Rentang estimasi yang lebar antar-geotermometer ini perlu ditinjau lebih jauh, khususnya dari sisi implikasinya terhadap keputusan pemanfaatan energi, mengingat temperatur reservoir menentukan teknologi konversi yang sesuai digunakan.

Sumber panas bumi yang bertemperatur rendah hingga menengah, Organic Rankine Cycle (ORC) banyak digunakan karena fluida kerja organiknya dapat menguap pada temperatur lebih rendah dibandingkan air (Loni et al., 2021). Pemilihan fluida kerja sangat memengaruhi daya dan efisiensi sistem ORC (Hu et al., 2022), dan sensitivitas ini menjadi semakin relevan mengingat ketidakpastian temperatur input telah terbukti memengaruhi proses seleksi fluida kerja secara sistematis (Frutiger et al., 2016). Selain aspek teknis, evaluasi ekonomi juga diperlukan karena estimasi energi yang besar tidak serta-merta menjamin kelayakan proyek. GEOPHIRES memungkinkan simulasi terintegrasi antara reservoir, sumur, fasilitas permukaan, dan komponen biaya dalam satu kerangka teknis-ekonomi (Beckers & McCabe, 2019).

Meskipun geotermometri, pemilihan fluida kerja, dan evaluasi ekonomi masing-masing telah banyak dikaji, keterkaitan ketiganya belum dibahas untuk kasus Klayili. Penelitian oleh Tandiarang et al. (2026) berfokus pada penentuan temperatur reservoir dan potensi termal, sehingga belum menjawab apakah perbedaan estimasi antar-geotermometer berimplikasi pada pemilihan fluida kerja dan kelayakan ekonomi. Pendekatan ini juga berbeda dari analisis sensitivitas konvensional yang mengubah temperatur berdasarkan persentase terhadap satu acuan, karena setiap skenario temperatur di sini memiliki dasar geokimia dari geotermometer yang berbeda.

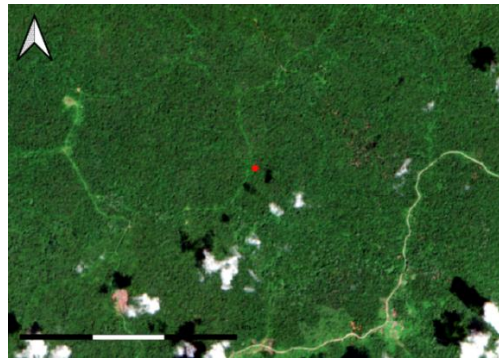
Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh variasi estimasi temperatur reservoir berbasis multi-geotermometer terhadap pemilihan fluida kerja serta

kinerja teknis-ekonomi pemanfaatan Air Panas Klayili menggunakan GEOPHIRES. Indikator utama yang dievaluasi meliputi produksi listrik bersih, biaya modal, biaya operasi dan pemeliharaan, serta biaya listrik impas. Penelitian ini diharapkan memperluas hasil karakterisasi awal Klayili dari tahap identifikasi sumber daya menuju evaluasi keputusan teknologi dan ekonomi.

2. Metodologi Penelitian

2.1. Data dan Kondisi Lapangan

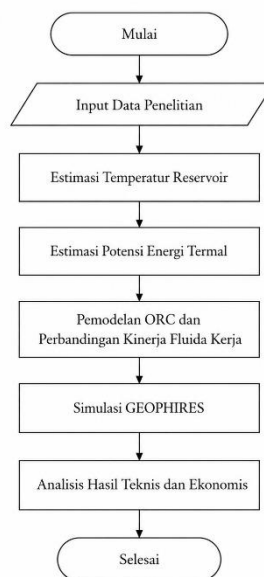
Air Panas Klayili merupakan salah satu manifestasi panas bumi permukaan yang terletak di Kampung Malasigi, Distrik Klayili, Kabupaten Sorong, Papua Barat Daya. Manifestasi tersebut muncul di sekitar aliran Kali Klayili dan oleh masyarakat setempat dikenal sebagai Kali Panas Klayili. Lokasi pengamatan secara geografis berada pada kisaran koordinat $\pm 0^{\circ}55'$ LS dan $\pm 131^{\circ}35'$ BT. Posisi lokasi penelitian serta sebaran titik pengambilan sampel ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Peta lokasi pengambilan sampel Air Panas Klayili

Data dasar yang digunakan dalam pemodelan, meliputi karakteristik fluida panas bumi, temperatur outlet, laju massa fluida, serta hasil estimasi temperatur reservoir berdasarkan geotermometer, mengacu pada hasil penelitian Tandiarrang et al. (2026). Data tersebut selanjutnya digunakan sebagai masukan untuk pemodelan ORC dan simulasi teknis-ekonomi GEOPHIRES pada penelitian ini.

2.2. Alur Penelitian



Gambar 2. Alur Kerja Penelitian

2.3. Pemodelan Awal ORC dan Fluida Organik

Fluida kerja ORC dipilih berdasarkan kesesuaian dengan temperatur sumber panas, karakteristik termodinamika, dan ketersediaan data properti fluida. Kandidat fluida kerja yang dapat digunakan antara lain R134a, R245fa, atau isobutane. Simulasi dilakukan menggunakan Python dengan pustaka CoolProp. Parameter yang dihitung dalam pemodelan ORC meliputi panas masuk, kerja turbin, kerja pompa, daya, dan efisiensi termal (DiPippo, 2012; Rahman et al., 2022). Kerja turbin:

$$W_t = \dot{m}(h_3 - h_4) \quad (1)$$

Kerja pompa:

$$W_p = \frac{\dot{m}(h_2 - h_1)}{\eta_{\text{pump}}} \quad (2)$$

Daya:

$$W_{\text{net}} = W_t - W_p \quad (3)$$

Panas masuk:

$$Q_{\text{in}} = \dot{m}(h_3 - h_2) \quad (4)$$

Efisiensi termal:

$$\eta = \frac{W_{\text{net}}}{Q_{\text{in}}} \quad (5)$$

2.4. GEOPHIRES

GEOPHIRES (*Geothermal Power and Heat Investment and Resource Evaluation System*) merupakan perangkat simulasi teknis-ekonomi untuk mengevaluasi sistem panas bumi secara terintegrasi melalui penggabungan model reservoir, sumur produksi dan injeksi, fasilitas permukaan, produksi energi, serta komponen ekonomi. Model tersebut dapat digunakan untuk memperkirakan produksi energi selama umur proyek serta biaya modal, biaya operasi dan pemeliharaan, dan biaya energi pada berbagai konfigurasi sumber daya panas bumi (Beckers & McCabe, 2019). Dalam penelitian ini, simulasi dilakukan menggunakan GEOPHIRES versi 3.15.3 dengan *end-use option* berupa pembangkitan listrik dan tipe pembangkit Subcritical ORC.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Estimasi Temperatur Reservoir dan Potensi Energi Termal

Estimasi temperatur reservoir dilakukan menggunakan geotermometer Silika, Na-K Fournier, Na-K Giggenbach, dan Na-K-Ca pada tiga titik pengamatan. Perbedaan hasil antar-metode digunakan untuk menggambarkan rentang kondisi termal reservoir yang selanjutnya menjadi dasar dalam evaluasi potensi energi dan pemodelan sistem konversi. Hasil estimasi temperatur reservoir disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Estimasi Temperatur Reservoir Berdasarkan Geotermometer

Titik	Silika (°C)	Na-K Fournier (°C)	Na-K Giggenbach (°C)	Na-K-Ca (°C)
Titik I	79,68	155,59	174,43	144,77
Titik II	79,54	161,37	179,95	142,60
Titik III	77,30	155,59	174,43	143,93

Hasil estimasi menunjukkan bahwa setiap geotermometer memberikan temperatur reservoir yang berbeda, tetapi pola hasilnya relatif konsisten pada ketiga titik pengamatan. Geotermometer Silika menghasilkan estimasi terendah, yaitu 77,30–79,68°C, sedangkan Na-K Fournier menghasilkan 155,59–161,37°C dan Na-K Giggenbach memberikan estimasi tertinggi sebesar 174,43–179,95°C. Geotermometer Na-K-Ca berada pada rentang menengah, yaitu 142,60–144,77°C. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa interpretasi kondisi termal reservoir Air Panas Klayili bergantung pada pendekatan geotermometer yang digunakan. Meskipun nilai absolutnya

berbeda, variasi antar-titik pada masing-masing metode relatif kecil, sehingga masing-masing geotermometer menunjukkan pola estimasi yang cukup konsisten secara spasial. Rentang temperatur yang lebar antara geotermometer Silika dan geotermometer berbasis kation selanjutnya digunakan sebagai dasar pembentukan skenario temperatur dalam evaluasi konversi energi pada tahap berikutnya.

Tabel 2 Estimasi Potensi Energi Termal Berdasarkan Temperatur Outlet

Parameter	Simbol	Temperatur Outlet	Temperatur Reservoir	Satuan
Laju massa fluida	$\dot{m}$	22,573	22,573	kg/s
Temperatur	T	51,00	144,77	°C
Temperatur acuan	T _{acuan}	30,00	30,00	°C
Entalpi fluida	h	213,600	609,649	kJ/kg
Entalpi acuan	h _{acuan}	125,823	125,823	kJ/kg
Selisih entalpi	Δh	87,777	483,826	kJ/kg
Potensi energi termal	Q	1,981	10,921	MWth

Pada laju massa fluida yang sama sebesar 22,573 kg/s, penggunaan temperatur reservoir menghasilkan potensi energi termal yang jauh lebih besar dibandingkan kondisi fluida pada outlet. Pada temperatur outlet 51°C, selisih entalpi terhadap temperatur acuan 30°C sebesar 87,777 kJ/kg menghasilkan potensi energi termal 1,981 MWth. Ketika digunakan temperatur reservoir representatif Na-K-Ca sebesar 144,77°C, entalpi fluida meningkat menjadi 609,649 kJ/kg dan selisih entalpi mencapai 483,826 kJ/kg, sehingga potensi energi termal meningkat menjadi 10,921 MWth.

Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa temperatur yang terukur di permukaan hanya menggambarkan energi termal yang masih tersisa ketika fluida mencapai outlet, sedangkan temperatur reservoir merepresentasikan kondisi termal sebelum fluida mengalami kehilangan panas selama perjalanannya menuju permukaan. Dengan demikian, nilai 1,981 MWth dapat dipandang sebagai potensi termal berdasarkan kondisi manifestasi aktual, sedangkan 10,921 MWth merupakan estimasi potensi berdasarkan kondisi reservoir yang digunakan sebagai skenario representatif. Perbedaan kedua nilai tersebut menjadi dasar penting untuk mengevaluasi apakah energi panas yang tersedia dapat dikonversi secara efektif menjadi listrik melalui sistem ORC.

Secara keseluruhan, hasil geotermometri menunjukkan adanya rentang temperatur reservoir yang cukup lebar, sedangkan perhitungan energi termal menunjukkan peningkatan potensi panas yang substansial ketika kondisi reservoir digunakan sebagai dasar estimasi. Oleh karena itu, tahap berikutnya mengevaluasi bagaimana variasi temperatur tersebut memengaruhi kinerja sistem ORC dan fluida kerja yang digunakan.

3.2 Pemodelan Awal ORC dan Pemilihan Fluida Kerja

Pemodelan awal Organic Rankine Cycle (ORC) dilakukan untuk mengevaluasi potensi konversi energi termal Air Panas Klayili menjadi energi listrik. Berbeda dari analisis sensitivitas konvensional yang mengubah temperatur secara persentase terhadap satu acuan, keempat skenario temperatur reservoir pada penelitian ini (Tabel 3) masing-masing memiliki dasar geokimia yang berbeda dari geotermometer yang berbeda, sehingga pemodelan ORC dilakukan pada keempat skenario tersebut untuk melihat apakah pemilihan fluida kerja bersifat konsisten atau justru sensitif terhadap sumber ketidakpastian ini.

Perbandingan dilakukan terhadap tiga fluida kerja organik, yaitu R245fa, R134a, dan isobutane. Fluida ini dipilih karena memiliki titik didih dan tekanan penguapan yang jauh lebih rendah dibandingkan air, sehingga energi panas pada rentang temperatur reservoir Klayili tetap cukup untuk mengubah fasenya dari cair menjadi uap jenuh. Pada proses ini, energi yang diserap fluida kerja sebagian besar digunakan untuk perubahan fase (kalor laten), bukan untuk meningkatkan temperatur secara signifikan, sehingga sumber panas bertemperatur rendah hingga menengah tetap

dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan kerja pada turbin. Parameter dasar yang digunakan dalam analisis pemilihan fluida organik disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter Dasar

Parameter	Nilai
Fluida kerja	R245fa, R134a, Isobutane
Laju massa fluida geotermal	22,573 kg/s
Kalor jenis fluida geotermal	4,18 kJ/kg°C
Suhu lingkungan	30°C
Suhu kondensasi dasar	40°C
Efisiensi turbin	80%
Efisiensi pompa	75%
Pinch point	10°C

Temperatur evaporasi dioptimasi untuk tiap fluida kerja pada tiap skenario, dengan mempertimbangkan batas temperatur kritis dan kendala pinch point pada evaporator. Hasil perbandingan kinerja ORC pada tiga fluida kerja organik untuk keempat skenario geotermometer disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan Kinerja ORC pada Tiga Fluida Kerja Organik

Skenario	T reservoir (°C)	Fluida kerja	T kritis (°C)	T evaporasi optimum (°C)	P tinggi (bar)	Q_in (MWth)	W_net (MW)	Efisiensi termal (%)
Silika	79,68	R245fa	153,86	55,0	4,000	1,550	0,053	3,43
		R134a	101,06	55,0	14,915	1,599	0,053	3,29
		Isobutane	134,66	55,0	7,730	1,567	0,053	3,37
Na-K Fournier	155,59	R245fa	153,86	98,0	12,095	7,205	0,729	10,12
		R134a	101,06	97,0	37,391	9,738	0,820	8,42
		Isobutane	134,66	133,5	35,593	6,944	0,820	11,81
Na-K Giggenbach	174,43	R245fa	153,86	113,5	16,905	9,099	1,064	11,70
		R134a	101,06	97,5	37,770	11,513	0,970	8,42
		Isobutane	134,66	130,0	33,578	11,519	1,375	11,94
Na-K-Ca	144,77	R245fa	153,86	90,5	10,178	6,248	0,576	9,22
		R134a	101,06	97,0	37,391	8,717	0,734	8,42
		Isobutane	134,66	93,0	17,402	6,449	0,593	9,20

Ketiga fluida kerja menunjukkan status layak secara termodinamika pada seluruh skenario, mengindikasikan bahwa sumber panas Air Panas Klayili secara teoritis dapat dimanfaatkan pada sistem ORC di seluruh rentang estimasi temperatur reservoir yang diperoleh dari geotermometer. Q_in menunjukkan panas yang diserap fluida kerja di evaporator, sedangkan W_net menunjukkan daya bersih setelah kerja turbin dikurangi kerja pompa.

Pada skenario Silika (79,68°C), ketiga fluida kerja menghasilkan kinerja yang nyaris identik ($W_{\text{net}} \approx 0,053$ MW, efisiensi 3,29–3,43%) dan sama-sama teroptimasi pada T evaporasi 55,0°C. Reservoir bertemperatur rendah ini pada dasarnya tidak menyisakan ruang optimasi yang berarti untuk membedakan fluida kerja, sehingga pemilihan fluida kerja pada skenario ini secara teknis tidak terlalu relevan; yang lebih menentukan adalah keterbatasan energi yang tersedia itu sendiri, sejalan dengan tingginya biaya listrik impas pada skenario ini yang dibahas pada sub-bab 2.3.

Pada tiga skenario bertemperatur lebih tinggi, pola yang muncul justru berbeda dari yang diperoleh pada kajian awal berbasis skenario Na-K-Ca saja. Isobutane secara konsisten unggul atau setara pada skenario Na-K Fournier dan Na-K Giggenbach, baik dari sisi daya bersih maupun efisiensi termal. Pada skenario Na-K Giggenbach, isobutane menghasilkan daya bersih tertinggi di antara ketiga fluida (1,375 MW) sekaligus efisiensi termal tertinggi (11,94%), mengungguli R245fa (1,064 MW; 11,70%) dan R134a (0,970 MW; 8,42%). Pada skenario Na-K Fournier, isobutane dan R134a menghasilkan daya bersih yang sama (0,820 MW), tetapi isobutane

mencapainya dengan Q_{in} yang jauh lebih kecil (6,944 MWth berbanding 9,738 MWth), sehingga efisiensi termalnya juga jauh lebih tinggi (11,81% berbanding 8,42%).

R134a secara konsisten menghasilkan efisiensi termal terendah di antara ketiga fluida pada seluruh skenario bertemperatur menengah–tinggi (8,42%), dan pada dua dari tiga skenario tersebut (Na-K Fournier dan Na-K Giggenbach) temperatur evaporasi optimumnya berada sangat dekat dengan temperatur kritisnya (margin hanya sekitar 3,5–4°C terhadap T_{kritis} 101,06°C), jauh lebih sempit dibandingkan margin isobutane maupun R245fa. Kondisi ini menuntut tekanan operasi yang tinggi (35–38 bar) dan meningkatkan sensitivitas kinerja siklus terhadap fluktuasi kecil temperatur sumber, sehingga R134a menjadi pilihan yang secara operasional kurang robust meskipun daya bersihnya kompetitif.

Temuan ini menunjukkan bahwa pemilihan fluida kerja ORC untuk Air Panas Klayili bersifat sensitif terhadap skenario temperatur reservoir yang digunakan. Pola ini konsisten dengan temuan bahwa ketidakpastian temperatur input memengaruhi proses seleksi fluida kerja secara sistematis (Frutiger et al., 2016). Pada skenario Na-K-Ca yang menjadi acuan konservatif dalam kajian ini, R245fa tetap menjadi pilihan yang paling seimbang: temperatur kritis 153,86°C memberi jarak aman terbesar terhadap temperatur evaporasi optimum (90,5°C) di antara ketiga fluida, tekanan evaporasinya (10,178 bar) jauh lebih moderat dibandingkan R134a maupun isobutane pada skenario yang sama, dan R245fa tidak mudah terbakar berbeda dari isobutane yang tergolong fluida hidrokarbon dan menuntut desain sistem keselamatan tambahan bila diterapkan pada tahap teknis lanjutan. Oleh karena itu, R245fa dipilih sebagai fluida kerja pada pemodelan awal ORC untuk skenario Na-K-Ca, bukan karena unggul di seluruh skenario, melainkan karena menawarkan kombinasi kinerja dan margin keselamatan yang paling seimbang pada skenario acuan yang representatif dan konservatif. Sebaliknya, apabila estimasi temperatur reservoir aktual di lapangan mendekati skenario Na-K Fournier atau Na-K Giggenbach, hasil ini mengindikasikan bahwa isobutane layak dipertimbangkan sebagai alternatif dengan kinerja lebih tinggi, dengan catatan bahwa pemilihannya harus disertai kajian keselamatan terhadap sifat mudah terbakarnya.

Hasil ini mendukung penggunaan ORC sebagai teknologi konversi energi untuk sumber panas bumi temperatur rendah hingga menengah, sejalan dengan karakteristik ORC yang menggunakan fluida kerja organik bertitik didih lebih rendah dibandingkan air (Hu et al., 2022; Quoilin et al., 2013), dan sejalan dengan pengembangan teknologi konversi energi panas bumi modern yang menggunakan fluida kerja dalam sistem tertutup (Eghbali et al., 2021). Perlu ditegaskan bahwa daya keluaran ORC yang diperoleh dalam penelitian ini merupakan estimasi teknis awal berdasarkan pemodelan termodinamika ideal, sehingga belum merepresentasikan daya listrik aktual di lapangan tanpa mempertimbangkan rugi-rugi sistem, desain penukar panas riil, efisiensi generator, dan kondisi operasi aktual.

3.3 Simulasi GEOPHIRES

Empat estimasi temperatur reservoir yang diperoleh dari geotermometer Silika, Na-K Fournier, Na-K Giggenbach, dan Na-K-Ca digunakan sebagai skenario input dalam simulasi GEOPHIRES. Masing-masing skenario merepresentasikan kondisi temperatur reservoir yang berbeda, yaitu 79,68°C, 155,59°C, 174,43°C, dan 144,77°C. Simulasi dilakukan untuk mengevaluasi implikasi perbedaan estimasi temperatur tersebut terhadap produksi listrik, produksi energi tahunan, efisiensi konversi panas menjadi listrik, serta komponen biaya pengembangan. Indikator ekonomi yang dibandingkan meliputi biaya modal, biaya operasi dan pemeliharaan, serta biaya listrik impas. Ringkasan hasil simulasi pada keempat skenario ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Simulasi GEOPHIRES pada Empat Skenario Geotermometer

Parameter	Silika	Na-K Fournier	Na-K Giggenbach	Na-K-Ca
Temperatur reservoir (°C)	79,68	155,59	174,43	144,77
Rata-rata produksi listrik neto (MW)	0,04	0,91	1,33	0,72

Parameter	Silika	Na-K Fournier	Na-K Giggenbach	Na-K-Ca
Produksi energi listrik netto tahunan (GWh/tahun)	0,30	7,20	10,51	5,64
Efisiensi konversi panas-listrik (%)	2,62	6,50	7,81	5,80
Biaya listrik impas (cents/kWh)	591,19	42,48	33,74	49,89
Biaya modal/CAPEX (MUSD)	17,64	32,86	38,42	30,02
Biaya O&M (MUSD/tahun)	0,37	0,51	0,56	0,48

Hasil simulasi menunjukkan adanya perbedaan yang jelas antar-skenario temperatur reservoir. Skenario Silika dengan temperatur terendah, yaitu 79,68°C, menghasilkan kinerja teknis paling rendah. Rata-rata produksi listrik netonya hanya sekitar 0,04 MW, dengan produksi energi listrik netto tahunan sebesar 0,30 GWh/tahun dan efisiensi konversi panas-listrik sebesar 2,62%. Kondisi tersebut diikuti oleh biaya listrik impas yang sangat tinggi, yaitu 591,19 cents/kWh, meskipun biaya modalnya merupakan yang terendah sebesar 17,64 MUSD. Hasil ini menunjukkan bahwa rendahnya kebutuhan investasi pada skenario Silika belum dapat mengimbangi keterbatasan energi yang dapat dikonversi menjadi listrik.

Peningkatan temperatur pada skenario Na–K–Ca menjadi 144,77°C meningkatkan produksi listrik netto menjadi 0,72 MW dan produksi energi tahunan menjadi 5,64 GWh/tahun. Efisiensi konversinya meningkat menjadi 5,80%, sedangkan biaya listrik impas turun cukup besar menjadi 49,89 cents/kWh. Peningkatan kinerja tersebut disertai kenaikan biaya modal menjadi 30,02 MUSD dan biaya operasi dan pemeliharaan menjadi 0,48 MUSD/tahun.

Pada skenario Na–K Fournier dengan temperatur reservoir 155,59°C, kinerja sistem kembali meningkat. Rata-rata produksi listrik netto mencapai 0,91 MW dengan produksi energi listrik sebesar 7,20 GWh/tahun dan efisiensi konversi sebesar 6,50%. Biaya listrik impas turun menjadi 42,48 cents/kWh, meskipun kebutuhan modal meningkat menjadi 32,86 MUSD dengan biaya operasi dan pemeliharaan 0,51 MUSD/tahun.

Kinerja teknis tertinggi diperoleh pada skenario Na–K Giggenbach, yang juga menghasilkan estimasi temperatur reservoir tertinggi sebesar 174,43°C. Skenario ini menghasilkan rata-rata produksi listrik netto sebesar 1,33 MW, energi listrik netto tahunan 10,51 GWh/tahun, dan efisiensi konversi panas-listrik 7,81%. Meskipun memiliki biaya modal tertinggi sebesar 38,42 MUSD dan biaya operasi dan pemeliharaan sebesar 0,56 MUSD/tahun, biaya listrik impasnya justru merupakan yang terendah, yaitu 33,74 cents/kWh.

Secara keseluruhan, hasil GEOPHIRES menunjukkan pola bahwa peningkatan temperatur reservoir diikuti oleh peningkatan produksi listrik, produksi energi tahunan, dan efisiensi konversi, serta penurunan biaya listrik impas. Pada saat yang sama, kebutuhan investasi dan biaya operasi cenderung meningkat karena kondisi reservoir dan sistem pengembangan yang lebih besar. Dengan demikian, skenario bertemperatur tinggi tidak selalu menghasilkan biaya proyek yang lebih rendah, tetapi mampu menghasilkan energi dalam jumlah lebih besar sehingga biaya listrik per unit energi menjadi lebih kompetitif. Pola ini menegaskan bahwa perbedaan estimasi temperatur yang berasal dari geotermometer dapat memberikan konsekuensi langsung terhadap penilaian teknis dan ekonomi sumber panas bumi Klayili, baik pada tingkat pemilihan fluida kerja ORC maupun pada tingkat kelayakan proyek secara keseluruhan.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa estimasi temperatur reservoir Air Panas Klayili bervariasi menurut geotermometer yang digunakan, dengan rentang sekitar 77,30–179,95°C. Perbedaan tersebut menunjukkan adanya ketidakpastian dalam penentuan kondisi termal reservoir dan menjadi dasar pembentukan skenario temperatur untuk evaluasi sistem konversi energi. Pada

kondisi representatif Na-K-Ca sebesar 144,77°C, potensi energi termal reservoir mencapai 10,921 MWth, lebih tinggi dibandingkan potensi berdasarkan temperatur outlet sebesar 1,981 MWth.

Pemodelan ORC pada empat skenario temperatur menunjukkan bahwa tidak terdapat satu fluida kerja yang secara konsisten memberikan kinerja terbaik pada seluruh kondisi reservoir. Pada skenario Silika, R245fa, R134a, dan isobutane menghasilkan daya bersih yang hampir sama. Perbedaan kinerja menjadi lebih nyata pada temperatur yang lebih tinggi. Isobutane memberikan kinerja terbaik pada skenario Na-K Giggenbach dengan daya bersih 1,375 MW dan efisiensi termal 11,94%, sedangkan pada skenario Na-K-Ca, R134a menghasilkan daya bersih tertinggi sebesar 0,734 MW, sementara R245fa menghasilkan efisiensi termal tertinggi sebesar 9,22%. Hasil ini menunjukkan bahwa pemilihan fluida kerja ORC perlu mempertimbangkan kondisi temperatur reservoir dan tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan satu skenario temperatur.

Hasil simulasi GEOPHIRES memperlihatkan bahwa peningkatan temperatur reservoir diikuti oleh peningkatan produksi listrik dan efisiensi konversi panas menjadi listrik serta penurunan biaya listrik impas. Skenario Na-K Giggenbach memberikan kinerja teknis paling tinggi, dengan rata-rata produksi listrik neto 1,33 MW, produksi energi listrik neto tahunan 10,51 GWh/tahun, dan efisiensi konversi 7,81%, serta biaya listrik impas terendah sebesar 33,74 cents/kWh. Sebaliknya, skenario Silika menghasilkan kinerja paling rendah dan biaya listrik impas tertinggi. Meskipun skenario temperatur yang lebih tinggi membutuhkan CAPEX dan biaya O&M yang lebih besar, peningkatan produksi energi menyebabkan biaya listrik per unit energi menjadi lebih rendah.

Keterbatasan penelitian ini terutama terkait dengan penggunaan estimasi temperatur reservoir berbasis geotermometer dan sejumlah asumsi pada pemodelan ORC serta simulasi GEOPHIRES. Selain itu, analisis ORC dan GEOPHIRES masih dilakukan secara terpisah sehingga belum merepresentasikan sistem terintegrasi secara penuh. Meskipun demikian, pendekatan ini tetap memadai untuk memberikan gambaran awal mengenai pengaruh variasi temperatur reservoir terhadap kinerja konversi energi dan evaluasi teknis-ekonomi pengembangan panas bumi Klayili.

Daftar Pustaka

- Arnórsson, S., Gunnlaugsson, E., & Svavarsson, H. (1983). The chemistry of geothermal waters in Iceland. III. Chemical geothermometry in geothermal investigations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47(3), 567–577. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0016-7037\(83\)90278-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0016-7037(83)90278-8)
- Beckers, K. F., & McCabe, K. (2019). GEOPHIRES v2.0: updated geothermal techno-economic simulation tool. *Geothermal Energy*, 7(5), 1–28. <https://doi.org/10.1186/s40517-019-0119-6>
- DiPippo, R. (2012). Geothermal power plants: Principles, applications and case studies. In *Geothermal Power Plants: Principles, Applications and Case Studies*. University of Massachusetts: North Dartmouth, Massachusetts. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-02885-7>
- Eghbali, S., Banks, J., & Nobes, D. S. (2021). A numerical study on compositional modeling of two-phase fluid flow and heat transfer in vertical wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 201, 108400. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108400>
- Fournier, R. O., & Truesdell, A. H. (1973). An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(5), 1255–1275. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0016-7037\(73\)90060-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90060-4)
- Frutiger, J., Andreasen, J., Liu, W., Spliethoff, H., Haglind, F., Abildskov, J., & Sin, G. (2016). Working fluid selection for organic Rankine cycles – Impact of uncertainty of fluid properties. *Energy*, 109, 987–997. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.010>
- Giggenbach, W. F. (1988). Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(12), 2749–2765. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90143-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90143-3)
- Gustama, M. A., & Afifah, P. D. (2025). Korelasi Tektonik dengan Play Panas Bumi Lengan Utara Sulawesi Berdasarkan Tomografi Seismik. *Syntax Idea*, 7(9), 1151–1163. <https://doi.org/10.46799/syntaxidea.v7i9.13559>
- Hu, B., Guo, J., Yang, Y., & Shao, Y. (2022). Selection of working fluid for organic Rankine cycle used in low temperature geothermal power plant. *Energy Reports*, 8, 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.102>
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2025). Indonesia Siap Jadi Negara Produsen Listrik Panas Bumi Terbesar Dunia. *Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia*. <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/indonesia-siap-jadi-negara-produsen-listrik-panas-bumi->

terbesar-dunia

- Liu, W., Zhang, M., Liu, Y., Cui, L.-F., Sano, Y., & Xu, S. (2024). Chemical and isotopic constraints on fluid origin and genesis of geothermal systems in the Tingri-Tangra Yumco rift, southern Tibetan Plateau. *Geothermal Energy*, 12. <https://doi.org/10.1186/s40517-024-00311-8>
- Loni, R., Mahian, O., Sahin, A., Rajaei, F., Kasaeian, A., Mehrpoya, M., Bellos, E., & Le Roux, W. (2021). A critical review of power generation using geothermal-driven organic Rankine cycle. *Thermal Science and Engineering Progress*, 25, 101028. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.101028>
- Quoilin, S., Broek, M. Van Den, Declaye, S., Dewallefa, P., & Lemort, V. (2013). Techno-economic survey of organic rankine cycle (ORC) systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 168–186. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.028>
- Rahman, M. F. A., Cahyadi, Jannus, P., & Silanegara, I. (2022). Pemilihan Fluida Kerja pada Intermediate Closed Cycle pada Studi Kasus PLTP Lahendong Menggunakan Aplikasi Simulasi. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin*, 159–167.
- Taide, V., Sinharay, R., Chavan, H., & Dandge, D. (2024). Selection of suitable geothermometers for predicting the subsurface temperatures with higher accuracy: A study based on globally distributed geothermal field data. *Geothermics*, 122, 103088. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.103088>
- Tandiarrang, M., Buku, A., & Rantererung, C. (2026). *Kajian Awal Potensi Energi Termal Manifestasi Air Panas Klayili Berdasarkan Karakteristik Geokimia Fluida dan Pendekatan Multi- Geotermometer*. 5(3), 1550–1561.
- Yushantarti, A., & Hermawan, D. (2022). *An Early Geothermal Fluids Characteristics Interpretation at Nif Warm Springs at Bula Basin, East Seram Regency, Maluku, Indonesia*. 1–12.