

Kajian Awal Potensi Energi Termal Manifestasi Air Panas Klayili Berdasarkan Karakteristik Geokimia Fluida dan Pendekatan Multi-Geotermometer

Musa Tandiarrang¹, Atus Buku^{2*}, Corvis Rantererung³

^{1,2,3}) Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia Paulus

Jl. Perintis Kemerdekaan No.Km.13, Daya, Kec. Tamalanrea, Kota Makassar, Sulawesi Selatan 90245

Email: musatandiarrang@gmail.com, atus@ukipaulus.ac.id, corvisrante@yahoo.com

ABSTRAK

Penelitian ini mengkaji potensi energi termal manifestasi Air Panas Klayili, Distrik Klayili, Kabupaten Sorong, Papua Barat Daya, berdasarkan karakteristik geokimia fluida dan pendekatan multi-geotermometer. Pengukuran lapangan menunjukkan temperatur fluida 49,0–51,0°C, debit 22,857 L/s, dan laju aliran massa 22,573 kg/s pada titik utama. Fluida bersifat netral hingga sedikit basa dengan pH 7,6–7,7 dan menunjukkan karakter bikarbonat dominan. Estimasi temperatur reservoir menggunakan geotermometer silika menghasilkan nilai 77,30–79,68°C, sedangkan geotermometer kation menghasilkan estimasi yang lebih tinggi. Skenario Na-K-Ca sebesar 144,77°C digunakan sebagai salah satu skenario representatif karena mempertimbangkan karakter kation fluida yang didominasi oleh Ca²⁺. Potensi energi termal aktual berdasarkan kondisi outlet diperkirakan sebesar 1,981 MWth, sedangkan potensi berbasis skenario temperatur reservoir mencapai 10,921 MWth. Hasil ini menunjukkan bahwa Air Panas Klayili berpotensi secara teoritis sebagai sumber energi panas bumi temperatur rendah hingga menengah pada skenario reservoir tertentu. Namun, estimasi tersebut masih bersifat awal karena belum didukung oleh data sumur, uji produksi, maupun survei geofisika bawah permukaan. Oleh karena itu, penelitian ini menyediakan informasi ilmiah awal mengenai karakteristik geokimia dan potensi energi termal sistem panas bumi non-vulkanik di Papua Barat Daya, serta menjadi dasar bagi kajian lanjutan terkait karakterisasi reservoir dan skenario pemanfaatan energi panas bumi temperatur rendah.

Kata kunci: Air Panas Klayili, geotermometer, geokimia fluida, energi panas bumi, potensi energi termal

ABSTRACT

This study evaluates the thermal energy potential of the Klayili Hot Spring manifestation in Klayili District, Sorong Regency, Southwest Papua, based on fluid geochemical characteristics and a multi-geothermometer approach. Field measurements showed fluid temperatures of 49.0–51.0°C, a discharge of 22.857 L/s, and a mass flow rate of 22.573 kg/s at the main point. The fluid was neutral to slightly alkaline, with a pH of 7.6–7.7, and exhibited a dominant bicarbonate character. Reservoir temperature estimation using silica geothermometers yielded 77.30–79.68°C, while cation geothermometers produced higher estimates. The Na-K-Ca scenario of 144.77°C was used as one representative scenario because it considers the Ca²⁺-dominated cation composition of the fluid. The actual thermal energy potential based on outlet conditions was estimated at 1.981 MWth, while the reservoir-temperature-based potential reached 10.921 MWth. These results indicate that Klayili Hot Spring has theoretical potential as a low- to medium-temperature geothermal resource under certain reservoir scenarios. However, these estimates remain preliminary because they are not yet supported by well data, production tests, or subsurface geophysical surveys. Therefore, this study provides initial scientific information on the geochemical characteristics and thermal energy potential of a non-volcanic geothermal system in Southwest Papua.

Keywords: Klayili Hot Spring, geothermometer, fluid geochemistry, geothermal energy, thermal energy potential

Pendahuluan

Energi panas bumi merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan untuk pembangkitan listrik maupun pemanfaatan langsung. Secara global, pemanfaatan langsung energi panas bumi telah mencapai 107.727 MWt di 88 negara pada akhir 2019 [1]. Indonesia memiliki sumber daya panas bumi sekitar 23.742 MW, salah satu yang terbesar di dunia, namun kapasitas terpasang pada 2025 baru sekitar 2.744 MW atau sekitar 10% dari potensi yang tersedia [2], [3]. Kondisi ini menunjukkan bahwa pengembangan panas bumi tidak hanya perlu diarahkan pada sistem berskala besar, tetapi juga pada identifikasi dan evaluasi manifestasi panas bumi lokal, termasuk sumber bertemperatur rendah yang berpotensi dimanfaatkan secara langsung maupun melalui teknologi konversi energi temperatur rendah. Evaluasi awal potensi panas bumi perlu didukung oleh karakterisasi geokimia fluida karena komposisi kimia fluida mencerminkan interaksi fluida–batuan reservoir dan proses yang terjadi selama pergerakan fluida menuju permukaan [4], [5]. Pendekatan

geotermometri kimia yang memanfaatkan konsentrasi komponen seperti SiO_2 , Na, K, dan Ca banyak digunakan untuk memperkirakan temperatur reservoir pada sistem yang belum memiliki data pemboran [6]. Penggunaan beberapa geotermometer secara komparatif dapat mengurangi ketidakpastian dibandingkan geotermometer tunggal karena setiap pendekatan memiliki asumsi dan batas penerapan yang berbeda terhadap kondisi kesetimbangan air–batuan, pencampuran fluida, dan karakteristik kimia fluida [7], [8].

Kajian panas bumi di wilayah Indonesia Timur masih relatif terbatas, terutama pada sistem non-vulkanik dan manifestasi bertemperatur rendah yang dikontrol oleh struktur geologi lokal. [9] menunjukkan bahwa mata air hangat Nif di Cekungan Bula, Seram Timur, merupakan contoh sistem panas bumi non-vulkanik yang memerlukan interpretasi awal melalui karakterisasi kimia fluida, diagram $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$, Na–K–Mg, dan geotermometer. Selain itu, [10] menunjukkan bahwa kondisi tektonik regional berperan penting dalam mengontrol sumber panas dan tipe sistem panas bumi di Lengan Utara Sulawesi. Namun, studi-studi tersebut umumnya masih berfokus pada karakterisasi geokimia dan estimasi temperatur reservoir, sedangkan keterkaitannya dengan kuantifikasi potensi energi termal serta peluang pemanfaatan praktis pada sistem non-vulkanik bertemperatur rendah masih jarang dikaji secara terintegrasi. Keterbatasan kajian ini menyebabkan potensi energi termal dari manifestasi panas bumi bertemperatur rendah di Indonesia Timur, termasuk Papua Barat Daya, belum banyak terdokumentasi secara ilmiah.

Salah satu manifestasi panas bumi yang menarik untuk dikaji terdapat pada sumber Air Panas Klayili di Kampung Malasigi, Distrik Klayili, Kabupaten Sorong, Papua Barat Daya. Manifestasi ini muncul di sekitar aliran sungai dengan temperatur fluida permukaan sekitar 51°C . Temperatur tersebut menunjukkan adanya sistem termal aktif, tetapi belum cukup untuk menggambarkan kondisi reservoir karena fluida panas dapat mengalami pendinginan, pencampuran dengan air meteorik, dan perubahan kimia selama bergerak menuju permukaan. Oleh karena itu, diperlukan karakterisasi geokimia dan pendekatan multi-geotermometer untuk memperoleh estimasi temperatur reservoir yang lebih representatif serta menilai potensi energi termal yang dapat dimanfaatkan.

Hingga saat ini, belum terdapat kajian ilmiah yang secara khusus mendokumentasikan karakteristik geokimia fluida Air Panas Klayili serta mengaitkannya dengan estimasi temperatur reservoir dan potensi energi termal. Kesenjangan ini menjadi dasar utama penelitian. Kebaruan penelitian ini terletak pada kajian awal manifestasi Air Panas Klayili sebagai sumber panas bumi non-vulkanik di Papua Barat Daya melalui kombinasi analisis geokimia fluida, estimasi temperatur reservoir berbasis multi-geotermometer, dan kuantifikasi potensi energi termal. Secara praktis, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan awal bagi eksplorasi energi panas bumi skala lokal, khususnya untuk menilai peluang pemanfaatan langsung seperti pemanasan atau pengeringan, serta sebagai dasar kajian lanjutan sistem konversi energi temperatur rendah seperti Organic Rankine Cycle (ORC). Dengan demikian, Air Panas Klayili tidak hanya dipandang sebagai manifestasi permukaan bertemperatur rendah, tetapi juga sebagai sumber data awal untuk menilai prospek pemanfaatan panas bumi lokal di wilayah non-vulkanik Papua Barat Daya.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi geokimia fluida Air Panas Klayili, mengidentifikasi tipe fluida berdasarkan komposisi ion $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$, mengestimasi temperatur reservoir melalui pendekatan multi-geotermometer, serta mengkuantifikasi potensi energi termal sebagai dasar awal evaluasi pemanfaatan sumber panas bumi lokal. Hasil penelitian diharapkan menyediakan informasi ilmiah awal bagi pengembangan energi panas bumi skala lokal di Papua Barat Daya dan menjadi basis data bagi kajian lanjutan yang mencakup survei geofisika, pengukuran manifestasi tambahan, serta simulasi teknis sistem konversi energi temperatur rendah.

Metode Penelitian

Data dan Lokasi

Penelitian ini dilaksanakan pada kawasan manifestasi Air Panas Klayili atau Kali Panas Klayili yang terletak di Distrik Klayili, Kabupaten Sorong, Provinsi Papua Barat Daya. Lokasi pengamatan berada pada sekitar koordinat $0,82813^\circ$ LS dan $131,55125^\circ$ BT dengan elevasi ± 89 m dpl. Lokasi ini merupakan sumber air panas alami yang muncul di sekitar aliran sungai dan memiliki temperatur fluida lebih tinggi dibandingkan lingkungan sekitarnya. Oleh karena itu, Air Panas Klayili dipilih sebagai objek kajian awal untuk mengidentifikasi karakteristik fluida, estimasi temperatur reservoir, dan potensi energi termal geotermal. Pengambilan sampel fluida dilakukan pada 24 Februari 2026 pada tiga titik di kawasan manifestasi yang sama, yaitu Titik I, Titik II, dan Titik III. Ketiga titik tersebut berada pada zona manifestasi yang berdekatan, sehingga koordinat lokasi disajikan sebagai koordinat kawasan pengamatan, sedangkan perbedaan antar titik dianalisis berdasarkan parameter fisik dan komposisi geokimia fluida.

Pengukuran lapangan dilakukan untuk memperoleh data temperatur fluida, temperatur lingkungan, koordinat, elevasi, debit fluida, dan waktu pengukuran debit. Instrumen yang digunakan meliputi termometer non-digital, GPS, meteran, dan stopwatch. Informasi alat ukur dan akurasi alat disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Alat Ukur dan Akurasi Pengukuran Lapangan

Alat	Akurasi
Termometer non-digital	$0,1^\circ\text{C}$
GPS	$0,00001^\circ$
Meteran	1 mm

Alat	Akurasi
Stopwatch	0,01 detik

Sampel fluida Air Panas Klayili dianalisis di Laboratorium PT Sucofindo yang telah terakreditasi Komite Akreditasi Nasional (KAN). Berdasarkan laporan hasil uji, analisis fisika dan kimia mengacu pada *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, Edisi ke-24 Tahun 2023, APHA-AWWA-WEF. Parameter yang dianalisis meliputi pH, TDS, Na, K, Ca, Mg, Cl, SO₄, HCO₃, dan SiO₂.

Validitas data hasil analisis kimia fluida dievaluasi menggunakan parameter *Charge Balance Error* (CBE), yang didasarkan pada prinsip elektroneutralitas larutan (*electroneutrality principle*), yaitu bahwa total muatan kation harus setara dengan total muatan anion dalam suatu larutan [11], [12]. Rumus yang digunakan pada Persamaan 1.

$$CBE (\%) = 100 \times \frac{\Sigma kation - \Sigma anion}{\Sigma kation + \Sigma anion} \quad (1)$$

dimana $\Sigma kation$ merupakan jumlah total kation utama dalam meq/L, sedangkan $\Sigma anion$ merupakan jumlah total anion utama dalam meq/L.

Parameter penelitian yang digunakan dalam kajian ini dikelompokkan menjadi tiga bagian utama, yaitu parameter identifikasi potensi geotermal, parameter geokimia fluida, dan parameter estimasi reservoir. Pengelompokan ini dilakukan untuk memperjelas alur analisis, mulai dari pengukuran kondisi fisik fluida di lapangan, analisis karakteristik kimia fluida, hingga estimasi temperatur reservoir menggunakan pendekatan multi-geotermometer. Parameter penelitian mencakup data fisik, kimia, dan termodinamika fluida panas bumi yang diperlukan untuk mengevaluasi karakteristik sistem serta potensi energinya. Temperatur, tekanan, entalpi, dan laju aliran massa berperan penting dalam menggambarkan kondisi energi fluida, sifat termofisika, dan kemampuan perpindahan panas pada sistem panas bumi [13], [14]. Rincian parameter penelitian disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter Penelitian

No. Kelompok Parameter	Parameter	Keterangan
1 Identifikasi potensi geotermal	Temperatur outlet, temperatur lingkungan, debit fluida (Q), laju massa ($\dot{m}$), pH, TDS	Menggambarkan kondisi fisik dan kualitas fluida panas bumi di permukaan sebagai data awal dalam identifikasi potensi geotermal.
2 Geokimia fluida	Na, K, Ca, Mg, Cl, SO ₄ , HCO ₃ , SiO ₂ , pH	Menentukan karakteristik kimia fluida, mengklasifikasikan tipe fluida berdasarkan komposisi Cl–SO ₄ –HCO ₃ , serta menjadi input dalam perhitungan geotermometer.
3 Estimasi reservoir	Temperatur reservoir berdasarkan SiO ₂ , Na-K, dan Na-K-Ca	Mengestimasi temperatur reservoir bawah permukaan dan menentukan titik fluida yang paling representatif untuk analisis potensi energi termal.

Parameter Fisik Fluida

Perhitungan parameter fisik fluida dilakukan untuk memperoleh debit dan laju massa fluida sebagai dasar estimasi potensi energi termal Air Panas Klayili. Data yang digunakan meliputi volume fluida, waktu pengukuran, temperatur outlet, dan temperatur lingkungan sebagai temperatur acuan. Debit fluida dihitung menggunakan Persamaan 2.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (2)$$

dengan Q adalah debit fluida (m³/s), V adalah volume fluida yang tertampung (m³), dan t adalah waktu pengukuran (s). Selanjutnya, laju massa fluida dihitung menggunakan Persamaan 3.

$$\dot{m} = \rho Q \quad (3)$$

dengan $\dot{m}$ adalah laju aliran massa fluida (kg/s), ρ adalah densitas air (kg/m³), dan Q adalah debit fluida (m³/s). Nilai debit dan laju massa ini digunakan sebagai parameter utama dalam perhitungan potensi energi termal berdasarkan temperatur outlet maupun temperatur reservoir hasil geotermometer.

Karakterisasi Geokimia Fluida

Karakterisasi geokimia fluida dilakukan untuk mengetahui sifat kimia fluida panas bumi serta indikasi hubungan fluida permukaan dengan sistem geotermal bawah permukaan. Parameter yang dianalisis meliputi pH, TDS, Na, K, Ca, Cl, SO₄, HCO₃, dan SiO₂. Nilai pH digunakan untuk mengetahui tingkat keasaman fluida, sedangkan TDS menggambarkan tingkat mineralisasi fluida. Ion Cl, SO₄, dan HCO₃ digunakan untuk mengidentifikasi tipe fluida panas bumi, sedangkan SiO₂, Na, K, dan Ca digunakan sebagai dasar perhitungan geotermometer kimia.

Klasifikasi tipe fluida dilakukan berdasarkan komposisi ion utama Cl–SO₄–HCO₃ untuk menentukan kecenderungan fluida sebagai tipe klorida, sulfat, bikarbonat, atau campuran [15], [16]. Hasil karakterisasi geokimia juga digunakan untuk menilai kesesuaian penggunaan geotermometer, karena estimasi temperatur

reservoir dapat dipengaruhi oleh pencampuran fluida, pengenceran, pendinginan, serta ketidakseimbangan fluida-batuan selama fluida bergerak menuju permukaan [17], [18].

Geotermometer dan Pemilihan Titik Representatif

Estimasi temperatur reservoir dilakukan menggunakan pendekatan multi-geotermometer kimia berdasarkan data laboratorium, yaitu SiO_2 , Na, K, dan Ca. Metode yang digunakan meliputi geotermometer silika, Na-K, dan Na-K-Ca [17]. Geotermometer silika digunakan untuk memperkirakan temperatur reservoir berdasarkan konsentrasi SiO_2 dalam fluida, dengan persamaan kuarsa tanpa kehilangan uap pada Persamaan 4.

$$T = \frac{1309}{5,19 - \log_{10} C_{\text{SiO}_2}} - 273,15 \quad (4)$$

dengan C_{SiO_2} merupakan konsentrasi silika dalam fluida. Geotermometer Na-K Fournier digunakan berdasarkan rasio Na dan K pada Persamaan 5 [6].

$$T = \frac{1217}{1,483 + \log_{10}(\text{Na}/\text{K})} - 273,15 \quad (5)$$

Sebagai pembanding, digunakan formulasi Na-K Giggenbach pada Persamaan 6 [5].

$$T = \frac{1390}{1,75 + \log_{10}(\text{Na}/\text{K})} - 273,15 \quad (6)$$

Sementara itu, geotermometer Na-K-Ca digunakan untuk fluida yang menunjukkan pengaruh Ca cukup besar yang dihitung menggunakan Persamaan 7.

$$T = \frac{1647}{\log_{10}(\text{Na}/\text{K}) + \beta \log_{10}(\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}}) + 2,24} - 273,15 \quad (7)$$

dengan nilai β sebesar $4/3$ apabila $\log(\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}}) > 0$, dan sebesar $1/3$ apabila $\log(\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}}) < 0$ [6].

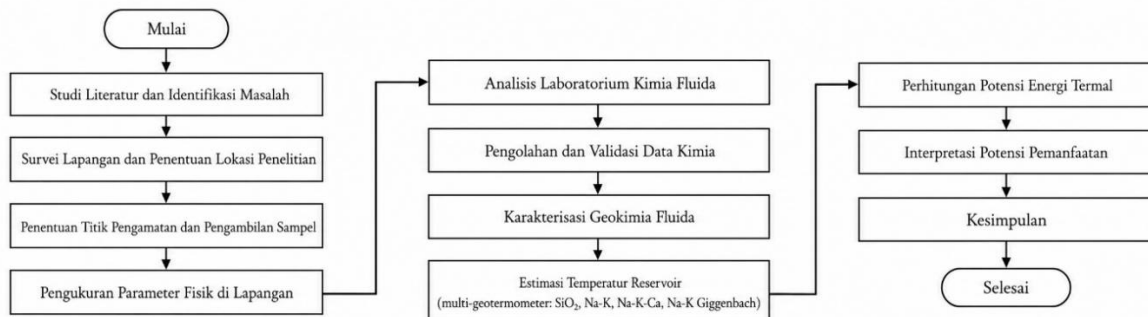
Hasil estimasi dari setiap geotermometer kemudian dibandingkan untuk menilai konsistensi antar metode. Pemilihan temperatur reservoir representatif dilakukan dengan mempertimbangkan tipe fluida, pH, TDS, dominasi ion, konsistensi hasil antar titik, serta kemungkinan pengaruh pencampuran, pengenceran, pendinginan, dan ketidakseimbangan fluida-batuan. Temperatur reservoir yang paling rasional selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam estimasi potensi energi termal Air Panas Klayili.

Estimasi Potensi Energi Termal

Estimasi potensi energi termal dilakukan untuk mengetahui besarnya energi panas yang tersedia pada fluida Air Panas Klayili. Perhitungan didasarkan pada laju massa fluida dan selisih entalpi antara kondisi fluida panas dan kondisi acuan. Nilai entalpi ditentukan berdasarkan temperatur fluida menggunakan tabel sifat termodinamika air. Potensi energi termal dihitung dengan Persamaan 8.

$$Q_{\text{thermal}} = \dot{m}(h_{\text{in}} - h_{\text{out}}) \quad (8)$$

dengan Q_{thermal} adalah daya panas fluida geotermal (kW), $\dot{m}$ adalah laju aliran massa fluida (kg/s), h_{in} adalah entalpi fluida pada kondisi panas (kJ/kg), dan h_{out} adalah entalpi fluida pada kondisi acuan (kJ/kg). Perhitungan dilakukan menggunakan dua pendekatan, yaitu berdasarkan temperatur outlet hasil pengukuran lapangan dan temperatur reservoir hasil geotermometer. Hasil estimasi ini digunakan sebagai dasar untuk menilai potensi energi termal Air Panas Klayili. Tahapan penelitian dalam bentuk diagram alir disajikan pada Gambar 1.



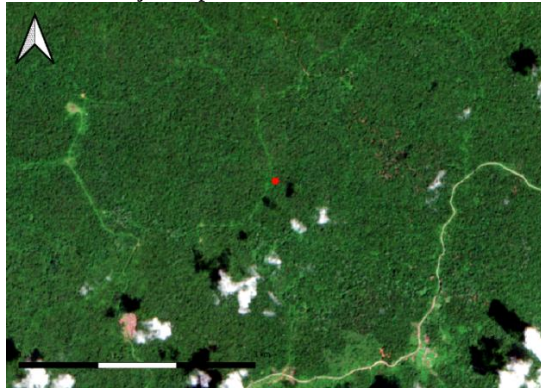
Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Hasil Dan Pembahasan

Kondisi Lapangan dan Karakteristik Fisik Fluida

Air Panas Klayili merupakan manifestasi panas bumi permukaan yang berada di kawasan Kampung Malasigi, Distrik Klayili, Kabupaten Sorong, Papua Barat Daya. Manifestasi ini muncul di sekitar aliran Kali

Klayili dan dikenal masyarakat setempat sebagai Kali Panas Klayili. Secara geografis, lokasi pengamatan berada pada kisaran koordinat $\pm 0^{\circ}55'$ LS dan $\pm 131^{\circ}35'$ BT. Untuk memperjelas posisi lokasi dan sebaran titik pengambilan sampel, peta lokasi penelitian disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Peta lokasi pengambilan sampel Air Panas Klayili

Selain peta lokasi, dokumentasi kondisi lapangan pada saat pengambilan sampel disajikan pada Gambar 3. Dokumentasi ini menunjukkan kondisi fisik manifestasi Air Panas Klayili, yaitu titik keluarnya air panas yang menyerupai sumur atau kolam kecil di sekitar aliran Kali Klayili.



(a)



(b)

Gambar 3. Dokumentasi lokasi pengambilan sampel Air Panas Klayili: (a) titik keluarnya air panas; (b) kondisi sekitar area pengambilan sampel.

Kemunculan Air Panas Klayili pada titik keluarnya fluida panas di sekitar aliran Kali Klayili menunjukkan adanya jalur aliran fluida dari bawah permukaan menuju permukaan. Dalam sistem panas bumi, jalur aliran fluida umumnya dapat dipengaruhi oleh struktur geologi lokal, permeabilitas batuan, dan kondisi rekahan bawah permukaan [19], [20]. Dalam konteks teknik mesin dan konversi energi, manifestasi ini penting dikaji karena fluida panas yang muncul di permukaan menjadi indikator awal ketersediaan sumber panas bawah permukaan yang berpotensi dimanfaatkan sebagai energi geotermal temperatur rendah. Kajian sebelumnya menunjukkan bahwa kawasan ini telah dikenal sebagai salah satu potensi lokal di Distrik Klayili, meskipun aksesibilitas menuju lokasi masih menjadi kendala dalam pengembangannya [21].

Berdasarkan pengamatan lapangan, fluida yang muncul di permukaan tampak relatif jernih, namun tercium bau belerang di sekitar lokasi yang mengindikasikan keberadaan senyawa sulfur dalam sistem hidrotermal. Indikasi ini akan dikaji lebih lanjut melalui karakterisasi geokimia fluida, terutama kandungan sulfat (SO_4). Pengamatan dilakukan pada tiga titik sampel dari kawasan sumber air panas yang sama. Titik I ditetapkan sebagai titik utama karena memiliki data fisik paling lengkap, termasuk data debit, sementara Titik II dan III digunakan untuk melihat variasi temperatur dan karakteristik geokimia fluida.

Hasil pengukuran pada Tabel 4 menunjukkan temperatur fluida sebesar $51,0^{\circ}\text{C}$ (Titik I), $50,7^{\circ}\text{C}$ (Titik II), dan $49,0^{\circ}\text{C}$ (Titik III), dengan temperatur lingkungan 30°C — selisih sekitar $19,0$ – $21,0^{\circ}\text{C}$ yang mengindikasikan anomali termal dibanding kondisi sekitarnya. Anomali ini menjadi parameter awal dalam menilai ketersediaan energi panas yang dapat diekstraksi dari fluida geotermal. Berdasarkan kisaran temperatur outlet tersebut, Air Panas Klayili dapat dikategorikan sebagai manifestasi permukaan bertemperatur rendah. Namun, temperatur outlet tidak dapat merepresentasikan temperatur reservoir secara langsung, karena fluida geotermal dapat mengalami penurunan temperatur selama perjalanan menuju permukaan akibat kehilangan panas konduktif, pencampuran dengan air meteorik, serta interaksi dengan batuan sekitar. Oleh karena itu, estimasi temperatur reservoir memerlukan analisis lanjutan melalui karakteristik geokimia fluida dan pendekatan geotermometer [22], [23]. Dalam kerangka pemanfaatan energi, estimasi ini penting karena

temperatur sumber panas menentukan besarnya energi termal yang tersedia serta kelayakan penerapannya pada sistem konversi energi temperatur rendah.

Tabel 4. Hasil Pengukuran Temperatur Fluida Air Panas Klayili

Titik Sampel	Temperatur Fluida (°C)	Temperatur Lingkungan (°C)	pH	TDS (mg/L)
Titik I	51,0	30	7,7	235
Titik II	50,7	30	7,6	234
Titik III	49,0	30	7,7	237

Pengukuran debit fluida dilakukan pada Titik I menggunakan metode volumetrik, dengan wadah berukuran $1,5 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0,32 \text{ m}$ (volume $0,48 \text{ m}^3$) yang terisi penuh dalam 21 detik.

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{0,48}{21} = \frac{0,022857 \text{ m}^3}{s} = 22,857 \text{ L/s}$$

Debit ini menjadi parameter penting karena menunjukkan jumlah fluida panas yang tersedia untuk membawa energi termal dari sistem bawah permukaan ke permukaan. Laju massa fluida dihitung dari debit volumetrik dan densitas fluida pada temperatur 51°C ($987,58 \text{ kg/m}^3$, berdasarkan tabel sifat termodinamika air):

$$\dot{m} = \rho \times Q = 987,58 \times 0,022857 = 22,573 \text{ kg/s}$$

Nilai laju massa ini menjadi parameter utama dalam estimasi potensi energi termal, karena besarnya energi panas yang tersedia ditentukan tidak hanya oleh temperatur fluida, tetapi juga oleh jumlah massa fluida yang mengalir per satuan waktu. Peningkatan laju aliran massa dapat meningkatkan kapasitas produksi energi, selama masih berada dalam batas operasi sistem yang optimal [24]. Kombinasi temperatur fluida, temperatur lingkungan, debit, dan laju massa ini menjadi dasar perhitungan energi panas yang dapat dimanfaatkan, serta digunakan pada tahap estimasi potensi energi termal dan simulasi pemanfaatan energi geotermal pada bagian berikutnya.

Karakterisasi Geokimia Fluida

Karakterisasi geokimia fluida dilakukan untuk mengetahui sifat kimia Air Panas Klayili, mengidentifikasi tipe fluida, mengevaluasi kemungkinan pencampuran dengan air dangkal, serta mendukung estimasi temperatur reservoir melalui geotermometer. Analisis dilakukan terhadap tiga titik sampel dengan parameter pH, TDS, Na, K, Ca, Mg, Cl, SO_4 , HCO_3 , dan SiO_2 . Ion Cl, SO_4 , dan HCO_3 digunakan untuk menentukan tipe fluida, sedangkan Na, K, Ca, Mg, dan SiO_2 digunakan sebagai dasar analisis geotermometer [9], [15].

Tabel 5. Hasil Analisis Komposisi Kimia Fluida Air Panas Klayili

Parameter	Satuan	Titik I	Titik II	Titik III
pH	–	7,7	7,6	7,7
TDS	mg/L	235	234	237
Kalsium (Ca)	mg/L	36	37	37
Magnesium (Mg)	mg/L	12	12	12
Natrium (Na)	mg/L	12	11	12
Kalium (K)	mg/L	0,9	0,9	0,9
Klorida (Cl)	mg/L	1,1	4,6	3,8
Sulfat (SO_4)	mg/L	7,8	6,8	7,0
Silika (SiO_2)	mg/L	30,2	30,1	28,5
Bikarbonat (HCO_3)	mg/L	231	289	258

Nilai pH pada ketiga titik berkisar 7,6–7,7, menunjukkan fluida bersifat netral hingga sedikit basa, dengan TDS yang relatif seragam pada kisaran 234–237 mg/L. Mengingat setiap ion memiliki berat molekul dan valensi berbeda, interpretasi dominasi ion tidak cukup didasarkan pada mg/L saja, sehingga konsentrasi ion utama dikonversi ke meq/L dan dinyatakan sebagai persen ekuivalen (%meq) (Tabel 6).

Tabel 6. Konsentrasi Ion dan Persen Ekuivalen

Kelompok	Ion	Titik I (meq/L)	Titik I (%)	Titik II (meq/L)	Titik II (%)	Titik III (meq/L)	Titik III (%)
Kation	Ca^{2+}	1,80	53,9	1,85	55,4	1,85	54,6
Kation	Mg^{2+}	0,99	29,7	0,99	29,6	0,99	29,2
Kation	Na^+	0,52	15,7	0,48	14,3	0,52	15,5
Kation	K^+	0,02	0,7	0,02	0,7	0,02	0,7
Σ Kation		3,33	100	3,34	100	3,38	100
Anion	Cl^-	0,03	0,8	0,13	2,6	0,11	2,4
Anion	SO_4^{2-}	0,16	4,1	0,14	2,8	0,15	3,3
Anion	HCO_3^-	3,79	95,2	4,74	94,6	4,23	94,4

Kelompok	Ion	Titik I (meq/L)	Titik I (%)	Titik II (meq/L)	Titik II (%)	Titik III (meq/L)	Titik III (%)
	Σ Anion	3,98	100	5,01	100	4,48	100

Berdasarkan Tabel 6, komposisi anion fluida Air Panas Klayili didominasi sangat kuat oleh HCO_3^- sebesar 94,4–95,2%, jauh lebih tinggi dibandingkan Cl^- dan SO_4^{2-} . Dominasi tersebut menunjukkan bahwa fluida Air Panas Klayili termasuk fluida bertipe bikarbonat. Pada kelompok kation, Ca^{2+} memiliki proporsi tertinggi sebesar 53,9–55,4%, sehingga fluida ini lebih tepat dinyatakan memiliki kecenderungan tipe Ca-HCO_3 . Karakter Ca-HCO_3 mengindikasikan adanya interaksi fluida dengan batuan atau mineral berkalsium, serta kemungkinan pencampuran dengan air meteorik dangkal selama pergerakan fluida menuju permukaan. Kondisi ini menunjukkan bahwa fluida Air Panas Klayili relatif immature dan belum sepenuhnya mencapai kesetimbangan dengan reservoir dalam, sehingga potensi panas buminya lebih sesuai dipandang sebagai sumber energi bertemperatur rendah hingga menengah dibandingkan sebagai indikasi langsung sistem reservoir bertemperatur tinggi. Kandungan SiO_2 pada ketiga titik relatif seragam, yaitu 28,5–30,2 mg/L, dengan nilai tertinggi pada Titik I dan terendah pada Titik III. Pemeriksaan konsistensi data geokimia dilakukan menggunakan perhitungan charge balance error (CBE) berdasarkan total kation dan total anion dalam satuan meq/L. Hasil perhitungan CBE disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Perhitungan *Charge Balance Error* (CBE)

Titik	Σ Kation (meq/L)	Σ Anion (meq/L)	CBE (%)
I	3,33	3,98	–8,9
II	3,34	5,01	–20,0
III	3,38	4,48	–14,0

Berdasarkan Tabel 7, nilai CBE pada ketiga titik bernilai negatif, yang menunjukkan bahwa total anion lebih tinggi dibandingkan total kation. Titik I memiliki nilai CBE paling kecil secara absolut, yaitu 8,9%, sehingga menunjukkan keseimbangan ion yang paling baik dibandingkan Titik II dan Titik III. Deviasi CBE pada Titik II dan Titik III, masing-masing 20,0% dan 14,0%, tidak serta-merta menggugurkan data geokimia, tetapi menunjukkan bahwa interpretasinya perlu dilakukan secara hati-hati. Perbedaan ini dapat dipengaruhi oleh rendahnya mineralisasi fluida, dominasi HCO_3^- yang sangat kuat, kontribusi ion minor yang tidak dianalisis, atau variasi dalam proses pengambilan dan analisis sampel.

Titik I ditetapkan sebagai titik utama dalam estimasi potensi energi termal karena memiliki nilai CBE yang relatif lebih baik dan merupakan satu-satunya titik dengan data debit fluida. Keterbatasan akses lapangan dan waktu survei menyebabkan pengukuran debit volumetrik hanya dapat dilakukan pada Titik I. Kelengkapan data debit penting karena perhitungan potensi energi termal memerlukan estimasi laju massa fluida, bukan hanya data temperatur dan komposisi kimia. Dengan demikian, Titik II dan Titik III tetap digunakan sebagai pembanding untuk melihat variasi temperatur dan konsistensi karakteristik geokimia fluida, tetapi tidak dijadikan titik utama dalam kuantifikasi potensi energi termal.

Estimasi Temperatur Reservoir Menggunakan Geotermometer

Estimasi temperatur reservoir dilakukan untuk memperoleh perkiraan temperatur fluida panas bumi sebelum mengalami pendinginan, pencampuran, atau perubahan komposisi kimia selama bergerak menuju permukaan. Temperatur reservoir merupakan parameter penting dalam menilai potensi energi panas bumi karena berhubungan langsung dengan besarnya energi panas yang tersedia dan peluang pemanfaatannya [25]. Temperatur outlet yang terukur belum dapat merepresentasikan kondisi reservoir secara langsung, sehingga diperlukan pendekatan geotermometer kimia berdasarkan komposisi fluida hasil analisis laboratorium.

Dalam penelitian ini, estimasi temperatur reservoir dilakukan menggunakan geotermometer silika (kuarsa) dan geotermometer kation, yaitu Na-K Fournier, Na-K Giggenbach, dan Na-K-Ca. Penggunaan beberapa geotermometer dilakukan untuk membandingkan rentang estimasi temperatur reservoir dan memperoleh nilai yang paling representatif sebagai dasar perhitungan potensi energi termal.

Geotermometer silika digunakan untuk memperkirakan temperatur reservoir berdasarkan konsentrasi SiO_2 terlarut dalam fluida, dengan asumsi kesetimbangan kuarsa-fluida. Geotermometer kation Na-K menggambarkan kesetimbangan antara mineral feldspar natrium dan kalium, sedangkan Na-K-Ca mempertimbangkan pengaruh kalsium sehingga lebih sesuai untuk fluida dengan kandungan Ca yang cukup dominan, seperti pada Air Panas Klayili.

Tabel 8. 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

Berdasarkan Tabel 8, geotermometer silika menghasilkan estimasi temperatur sebesar 77,30–79,68°C, lebih tinggi dibandingkan temperatur outlet (49,0–51,0°C), yang mengindikasikan kemungkinan adanya

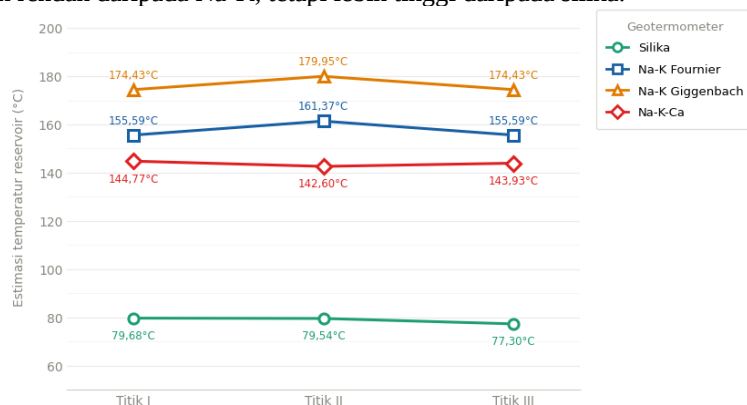
temperatur bawah permukaan yang lebih tinggi daripada temperatur manifestasi di permukaan. Hasil ini juga relatif konsisten antar titik, dengan rentang variasi yang kecil, sehingga dapat digunakan sebagai estimasi dasar kondisi termal bawah permukaan.

Geotermometer kation menghasilkan estimasi temperatur yang jauh lebih tinggi dibandingkan geotermometer silika. Na-K Fournier menghasilkan 155,59–161,37°C, sedangkan Na-K Giggenbach menghasilkan 174,43–179,95°C. Nilai yang lebih tinggi ini menunjukkan kemungkinan bahwa rasio Na dan K merekam kondisi kesetimbangan pada temperatur lebih tinggi, namun hasil Na-K perlu diinterpretasikan secara hati-hati karena geotermometer ini dapat menghasilkan estimasi berlebih apabila fluida belum mencapai kesetimbangan penuh atau telah mengalami pencampuran selama perjalanan menuju permukaan. Geotermometer Na-K-Ca menghasilkan estimasi temperatur sebesar 142,60–144,77°C yang mengindikasikan bahwa hasil geotermometer Na-K-Ca lebih rendah dibandingkan Na-K, tetapi lebih tinggi dibandingkan geotermometer silika, dengan hasil yang juga konsisten antar titik. Karena fluida Air Panas Klayili memiliki kandungan Ca yang cukup dominan, geotermometer Na-K-Ca dinilai lebih representatif dibandingkan Na-K saja, sebab turut mempertimbangkan pengaruh kalsium dalam sistem fluida.

Perbedaan hasil estimasi temperatur antar geotermometer menunjukkan bahwa fluida Air Panas Klayili belum sepenuhnya berada dalam kondisi kesetimbangan kimia yang ideal. Geotermometer silika menghasilkan estimasi temperatur yang lebih rendah dibandingkan geotermometer berbasis rasio alkali seperti Na–K dan Na–K Giggenbach. Kondisi ini dapat terjadi karena konsentrasi SiO_2 lebih sensitif terhadap proses pendinginan, pengenceran, atau pengendapan silika selama fluida bergerak dari reservoir menuju permukaan. Sebaliknya, geotermometer Na–K cenderung memberikan estimasi temperatur yang lebih tinggi karena didasarkan pada kesetimbangan pertukaran ion Na dan K yang umumnya lebih mencerminkan interaksi air–batuan pada temperatur lebih tinggi. Namun, pada fluida bertipe bikarbonat dengan indikasi pencampuran air dangkal, hasil Na–K juga perlu ditafsirkan secara hati-hati karena kesetimbangan ion dapat terganggu oleh proses pencampuran dan interaksi sekunder.

Geotermometer Na–K–Ca memberikan estimasi yang lebih moderat dibandingkan Na–K dan Na–K Giggenbach, sehingga dalam penelitian ini lebih sesuai digunakan sebagai acuan konservatif untuk menggambarkan kondisi reservoir awal. Perbedaan estimasi temperatur ini menunjukkan bahwa nilai temperatur reservoir Air Panas Klayili sebaiknya tidak ditafsirkan sebagai satu angka tunggal, tetapi sebagai rentang indikatif yang menggambarkan kemungkinan kondisi bawah permukaan. Implikasinya terhadap estimasi potensi energi adalah bahwa potensi berbasis temperatur permukaan merepresentasikan kondisi aktual yang tersedia di outlet, sedangkan potensi berbasis temperatur reservoir merupakan estimasi teoritis yang masih dipengaruhi oleh ketidakpastian geokimia, pencampuran fluida, dan kehilangan panas. Oleh karena itu, skenario pemanfaatan yang lebih realistis pada tahap awal adalah pemanfaatan langsung atau konversi energi temperatur rendah, sedangkan pemanfaatan listrik memerlukan kajian lanjutan yang lebih rinci.

Perbandingan hasil estimasi temperatur reservoir berdasarkan masing-masing geotermometer ditunjukkan pada Gambar 4. Gambar tersebut memperlihatkan bahwa estimasi temperatur reservoir dari geotermometer kation cenderung lebih tinggi dibandingkan geotermometer silika, dengan Na-K-Ca berada pada kisaran menengah yaitu lebih rendah daripada Na-K, tetapi lebih tinggi daripada silika.



Gambar 4. Hasil Estimasi Temperatur Reservoir Berdasarkan Geotermometer

Berdasarkan perbandingan tersebut, temperatur reservoir yang digunakan sebagai dasar perhitungan potensi energi termal adalah hasil geotermometer Na-K-Ca pada Titik I, yaitu sebesar 144,77°C. Pemilihan Titik I didasarkan pada beberapa pertimbangan yaitu Titik I memiliki temperatur outlet tertinggi, yaitu 51,0°C dan memiliki data debit paling lengkap sehingga dapat digunakan langsung dalam perhitungan laju massa dan potensi energi termal. Kemudian hasil Na-K-Ca pada Titik I tetap konsisten dengan Titik II dan III, sehingga dapat dianggap mewakili karakter reservoir pada kawasan manifestasi Air Panas Klayili. Nilai 144,77°C tersebut digunakan sebagai temperatur reservoir representatif dalam estimasi potensi energi termal teoritis.

Namun, hasil ini tetap diinterpretasikan sebagai estimasi berbasis geotermometer kimia, bukan hasil pengukuran langsung temperatur reservoir.

Secara umum, hasil geotermometer menunjukkan perbedaan signifikan antara temperatur manifestasi permukaan (49,0–51,0°C) dan estimasi temperatur reservoir Na-K-Ca (144,77°C), yang memperkuat dugaan bahwa fluida panas bumi mengalami pendinginan atau pencampuran selama bergerak dari reservoir menuju permukaan. Oleh karena itu, hasil geotermometer Na-K-Ca digunakan sebagai dasar estimasi potensi reservoir, sedangkan hasil geotermometer silika digunakan sebagai pembanding untuk memahami pengaruh kondisi dangkal terhadap fluida yang muncul di permukaan.

Potensi Energi Termal

Potensi energi termal dihitung berdasarkan laju massa fluida dan selisih entalpi antara kondisi fluida panas dan temperatur acuan, dengan nilai entalpi diperoleh melalui CoolProp (Python) berdasarkan temperatur fluida. Karena data tekanan aktual di lapangan tidak tersedia, perhitungan menggunakan pendekatan sifat termodinamika air sebagai estimasi awal, dengan temperatur acuan sebesar 30°C (temperatur lingkungan). Estimasi dilakukan melalui dua pendekatan, yaitu potensi energi termal aktual berdasarkan temperatur outlet dan potensi energi termal teoritis berdasarkan temperatur reservoir hasil geotermometer Na-K-Ca. Perbandingan estimasi potensi energi termal berdasarkan temperatur outlet dan temperatur reservoir.

Tabel 9. Estimasi Potensi Energi Termal Berdasarkan Temperatur Outlet

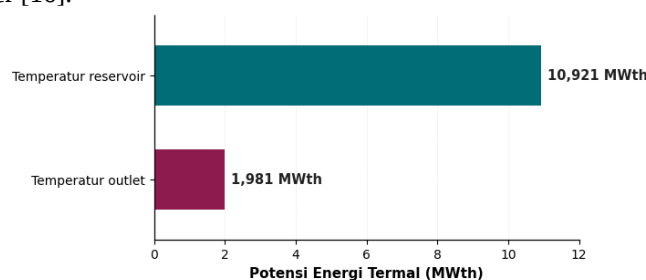
Parameter	Simbol	Temperatur Outlet	Temperatur Reservoir	Satuan
Laju massa fluida	$\dot{m}$	22,573	22,573	kg/s
Temperatur	T	51,00	144,77	°C
Temperatur acuan	T_{acuan}	30,00	30,00	°C
Entalpi fluida	h	213,600	609,649	kJ/kg
Entalpi acuan	h_{acuan}	125,823	125,823	kJ/kg
Selisih entalpi	Δh	87,777	483,826	kJ/kg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

Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 9, potensi energi termal berbasis temperatur reservoir jauh lebih tinggi dibandingkan potensi aktual di permukaan, karena temperatur reservoir merepresentasikan kondisi fluida sebelum mengalami pendinginan, kontak dengan lingkungan, atau pencampuran dengan air dangkal selama bergerak menuju permukaan. Nilai berbasis outlet dapat dipahami sebagai estimasi aktual kondisi permukaan, sedangkan nilai berbasis reservoir menggambarkan potensi termal teoritis yang lebih mendekati kondisi bawah permukaan.

Hal ini menunjukkan bahwa Air Panas Klayili memiliki potensi energi geotermal yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber panas dan berpeluang dikaji sebagai sumber pembangkitan listrik skala kecil, ditunjukkan oleh manifestasi air panas dengan temperatur outlet 51°C, debit 0,022857 m³/s, dan laju massa 22,573 kg/s. Secara lokal, Kali Panas Klayili juga telah dikenal sebagai salah satu objek wisata alam di Kampung Klayili, yang menunjukkan adanya manifestasi panas bumi di permukaan [21].

Rentang estimasi temperatur reservoir antar-geotermometer cukup lebar dimana silika memberikan estimasi lebih konservatif, sedangkan geotermometer kation (Na-K, Na-K-Ca, Na-K Giggenbach) menghasilkan estimasi lebih tinggi, mencerminkan perbedaan sensitivitas dan asumsi kesetimbangan kimia masing-masing. Perbedaan ini perlu ditafsirkan secara hati-hati karena fluida panas bumi dapat mengalami pendinginan, pencampuran dengan air dangkal, maupun ketidakseimbangan kimia selama pergerakan menuju permukaan. [18] menjelaskan bahwa pencampuran fluida panas dalam dengan komponen air dangkal dapat memengaruhi hasil estimasi temperatur reservoir, terutama pada geotermometer berbasis kation.

Dalam penelitian ini, Na-K-Ca dipilih sebagai skenario utama (144,77°C) bukan sebagai nilai reservoir final, melainkan sebagai skenario teknis moderat yang berada di antara geotermometer silika yang konservatif dan Na-K Giggenbach yang optimistik. Berdasarkan klasifikasi umum sistem panas bumi, temperatur ini termasuk kategori menengah yang masih relevan untuk dikaji sebagai sumber pembangkitan listrik menggunakan sistem biner [16].



Gambar 5. Perbandingan Potensi Energi Temperatur Reservoir dan Temperatur Outlet

Perbandingan kedua pendekatan (Gambar 5) menegaskan bahwa besarnya energi panas sangat dipengaruhi oleh temperatur sumber yang digunakan: potensi aktual (1,981 MWth) menggambarkan energi panas yang terukur pada manifestasi, sedangkan potensi berbasis reservoir (10,921 MWth) menggambarkan kemungkinan energi panas yang tersedia di bawah permukaan apabila estimasi temperatur reservoir mendekati kondisi aktual. Selisih ini mengindikasikan kemungkinan penurunan temperatur signifikan sebelum fluida mencapai permukaan, yang dapat disebabkan oleh pendinginan alami, pencampuran dengan air dangkal, kehilangan panas sepanjang jalur aliran, atau kontak dengan lingkungan sekitar manifestasi. Kedua nilai ini bukan hasil yang saling bertentangan, melainkan dua pendekatan yang menggambarkan kondisi berbeda yaitu kondisi aktual permukaan versus potensi teoritis bawah permukaan.

Dikaitkan dengan potensi pemanfaatan energi, skenario Na-K-Ca menjadi penting karena estimasi temperatur reservoir sebesar 144,77°C menunjukkan bahwa Air Panas Klayili berada pada kisaran temperatur rendah hingga menengah yang masih relevan untuk dikaji sebagai sumber energi panas bumi skala lokal [26]. Nilai temperatur tersebut memberikan gambaran awal mengenai ketersediaan energi termal bawah permukaan yang lebih tinggi dibandingkan temperatur outlet di permukaan. Dalam kajian konversi energi panas bumi temperatur rendah, parameter seperti temperatur sumber panas, kondisi fluida, temperatur operasi, dan batas perpindahan panas menjadi faktor penting yang memengaruhi potensi pemanfaatan energi [27]. Dengan demikian, hasil estimasi potensi energi termal Air Panas Klayili dapat menjadi dasar awal bagi kajian lanjutan terkait karakterisasi reservoir, keberlanjutan debit dan temperatur fluida, serta skenario pemanfaatan energi panas bumi temperatur rendah.

Estimasi potensi energi termal pada penelitian ini perlu ditafsirkan sebagai estimasi awal karena masih dipengaruhi oleh beberapa sumber ketidakpastian. Potensi energi permukaan dihitung berdasarkan temperatur outlet dan debit fluida terukur, sehingga lebih mencerminkan kondisi aktual pada saat pengamatan. Namun, nilai ini dapat berubah akibat variasi musiman debit, perubahan temperatur fluida, serta dinamika aliran fluida di sekitar manifestasi. Sementara itu, potensi energi reservoir dihitung berdasarkan estimasi temperatur geotermometer, sehingga bersifat teoritis dan sangat bergantung pada asumsi kesetimbangan kimia fluida. Pada sistem bertipe Ca-HCO₃ yang mengindikasikan adanya pencampuran dan interaksi dangkal, estimasi temperatur reservoir berpotensi dipengaruhi oleh pendinginan konduktif, pengenceran oleh air meteorik, serta reaksi air-batuan selama fluida naik ke permukaan. Dengan demikian, perbedaan antara potensi permukaan dan potensi reservoir tidak hanya menunjukkan besarnya cadangan panas yang mungkin tersedia, tetapi juga menggambarkan tingkat ketidakpastian yang perlu diperhatikan sebelum menentukan skenario pemanfaatan energi.

Keterbatasan dan Arahan Penelitian Lanjutan

Estimasi potensi energi termal dalam penelitian ini masih bersifat awal karena didasarkan pada data manifestasi permukaan, analisis geokimia fluida, dan pendekatan geotermometer kimia. Penelitian ini belum didukung oleh data sumur bor, survei geofisika, pemodelan bawah permukaan tiga dimensi, maupun simulasi teknis dan ekonomi sistem konversi energi. Selain itu, pengukuran debit hanya dilakukan pada Titik I dan belum mencakup variasi musiman, sehingga nilai potensi energi yang diperoleh belum dapat digunakan secara langsung sebagai dasar perancangan sistem pemanfaatan operasional.

Penelitian lanjutan disarankan mencakup pengukuran debit dan temperatur pada lebih banyak titik manifestasi serta pada periode musim berbeda untuk mengevaluasi kestabilan sumber panas. Survei geofisika, seperti resistivitas atau magnetotelurik, diperlukan untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan, zona permeabilitas, dan kemungkinan keberadaan reservoir. Selain itu, pemodelan konseptual tiga dimensi serta kajian teknis-ekonomi perlu dilakukan untuk menilai kelayakan pemanfaatan energi, baik untuk pemanfaatan langsung skala lokal maupun sistem konversi energi temperatur rendah.

Simpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa fluida Air Panas Klayili memiliki karakteristik geokimia netral hingga sedikit basa dengan dominasi ion bikarbonat. Berdasarkan komposisi ion Cl-SO₄-HCO₃, fluida termasuk tipe bikarbonat yang mengindikasikan adanya interaksi fluida dengan batuan serta kemungkinan pengaruh pencampuran dengan air dangkal selama pergerakan menuju permukaan. Estimasi temperatur reservoir menggunakan pendekatan multi-geotermometer menghasilkan nilai yang bervariasi. Geotermometer silika memberikan estimasi yang lebih rendah, yaitu 77,30–79,68°C, sedangkan geotermometer kation menghasilkan estimasi yang lebih tinggi. Dalam penelitian ini, nilai Na-K-Ca sebesar 144,77°C digunakan sebagai skenario utama untuk evaluasi potensi energi karena berada pada posisi moderat di antara hasil geotermometer lainnya dan mempertimbangkan keberadaan kalsium dalam fluida.

Hasil perhitungan potensi energi menunjukkan bahwa Air Panas Klayili memiliki potensi energi termal sebesar 1,981 MWth berdasarkan kondisi aktual permukaan dan 10,921 MWth berdasarkan skenario temperatur reservoir. Nilai tersebut

menunjukkan bahwa Air Panas Klayili memiliki potensi untuk dikaji lebih lanjut sebagai sumber energi panas bumi bertemperatur rendah di Papua Barat Daya.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memberikan informasi awal mengenai karakteristik geokimia fluida, tipe fluida, estimasi temperatur reservoir, dan potensi energi termal Air Panas Klayili. Kajian lanjutan diperlukan melalui survei geofisika, pemboran eksplorasi, serta analisis teknis dan ekonomi sistem konversi energi untuk memperoleh evaluasi kelayakan pemanfaatan yang lebih komprehensif.

Daftar Pustaka

- [1] J. W. Lund and A. N. Toth, "Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review," *Geothermics*, vol. 90, p. 101915, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.geothermics.2020.101915.
- [2] C. Cariaga, "Indonesian Government sets direction for geothermal growth at IIGCE 2025 With," *Think Geoenergy*, 2025. [Online]. Available: <https://www.thinkgeoenergy.com/indonesian-government-sets-direction-for-geothermal-growth-at-iigce-2025/>
- [3] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, "Indonesia Siap Jadi Negara Produsen Listrik Panas Bumi Terbesar Dunia," *Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia*, 2025. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/indonesia-siap-jadi-negara-produsen-listrik-panas-bumi-terbesar-dunia>
- [4] S. Arnórsson, E. Gunnlaugsson, and H. Svavarsson, "The chemistry of geothermal waters in Iceland. III. Chemical geothermometry in geothermal investigations," *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 47, no. 3, pp. 567–577, 1983, doi: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(83\)90278-8](https://doi.org/10.1016/0016-7037(83)90278-8).
- [5] W. F. Giggenbach, "Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators," *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 52, no. 12, pp. 2749–2765, 1988, doi: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90143-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90143-3).
- [6] R. O. Fournier and A. H. Truesdell, "An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters," *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 37, no. 5, pp. 1255–1275, 1973, doi: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(73\)90060-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90060-4).
- [7] J. Deng, W. Lin, L. Xing, and L. Chen, "The Estimation of Geothermal Reservoir Temperature Based on Integrated Multicomponent Geothermometry: A Case Study in the Jizhong Depression, North China Plain," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 16, 2022, doi: 10.3390/w14162489.
- [8] W. Lin and X. Yin, "Temperature Estimation of a Deep Geothermal Reservoir Based on Multiple Methods: A Case Study in Southeastern China," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 20, 2022, doi: 10.3390/w14203205.
- [9] A. Yushantarti and D. Hermawan, "An Early Geothermal Fluids Characteristics Interpretation at Nif Warm Springs at Bula Basin, East Seram Regency, Maluku, Indonesia," pp. 1–12, 2022.
- [10] M. A. Gustama and P. D. Afifah, "Korelasi Tektonik dengan Play Panas Bumi Lengan Utara Sulawesi Berdasarkan Tomografi Seismik," *Syntax Idea*, vol. 7, no. 9, pp. 1151–1163, 2025, doi: 10.46799/syntaxidea.v7i9.13559.
- [11] S. J. Fritz, "A Survey of Charge-Balance Errors on Published Analyses of Potable Ground and Surface Waters," *Groundwater*, vol. 32, no. 4, pp. 539–546, 1994, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1994.tb00888.x>.
- [12] A. Aldrees, A. M. Jibrin, S. Dan'azumi, M. Al-Suwaiyan, S. I. Abba, and Z. M. Yaseen, "Synthetic data-driven explainable machine learning for groundwater salinity prediction in the Al-Qatif coastal aquifer of Saudi Arabia," *J. Hydrol. Reg. Stud.*, vol. 64, no. February, p. 103258, 2026, doi: 10.1016/j.ejrh.2026.103258.
- [13] I. Abdulagatov, L. Akhmedova-Azizova, R. Aliev, and G. Badavov, "Thermodynamic Properties of Geothermal Fluids from South Russia: Kayakent and Kizlyar Hot Sources," 2021, pp. 275–301. doi: 10.1007/978-3-030-63571-8_17.
- [14] M. Alghamdi *et al.*, "Investigation of Energy and Exergy of Geothermal Organic Rankine Cycle," *Energies*, vol. 16, Feb. 2023, doi: 10.3390/en16052222.
- [15] I. V. Bragin, G. A. Chelnokov, R. V. Zharkov, O. V. Chudaev, and N. A. Kharitonova, "Hydrogeochemistry of Thermal Waters of Baransky Volcano, Iturup Island (Southern Kurils)," *J. Geosci. Environ. Prot.*, vol. 3, pp. 1–5, 2015, doi: 10.4236/gep.2015.35001.
- [16] M. Khodayar and S. Björnsson, "Conventional Geothermal Systems and Unconventional Geothermal Developments: An Overview," *Open J. Geol.*, vol. 14, pp. 196–246, 2024, doi: 10.4236/ojg.2024.142012.
- [17] Y. Aribowo, "Prediksi Temperatur Reservoar Panasbumi Dengan Menggunakan Metoda Geotermometer Kimia Fluida," *Teknik*, vol. 32, no. 3, pp. 234–238, 2011.
- [18] B. Kielczawa, "Determination of Reservoir Temperatures of Low-Enthalpy Geothermal Systems in the

- Sudetes (SW Poland) Using Multicomponent Geothermometers,” *Water*, vol. 15, no. 422, 2023, doi: 10.3390/w15030422.
- [19] G. Eggertsson, Y. Lavallée, J. Kendrick, and S. Markússon, “Improving fluid flow in geothermal reservoirs by thermal and mechanical stimulation: The case of Krafla volcano, Iceland,” *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 391, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2018.04.008.
- [20] M. Goupil, M. J. Heap, and P. Baud, “Permeability anisotropy in sandstones from the Soultz-sous-Forêts geothermal reservoir (France): implications for large-scale fluid flow modelling,” *Geotherm. Energy*, vol. 10, no. 1, 2022, doi: 10.1186/s40517-022-00243-1.
- [21] I. F. Su, Y. L. M. Sitorus, and Musfira, “Studi pengembangan potensi wisata kali panas di kampung klayili kabupaten sorong,” *Median J. Arsit. dan Planol.*, vol. 12, no. 2, pp. 83–94, 2022.
- [22] R. Yuan, W. Zhang, H. Gan, F. Liu, S. Wei, and L. Liu, “Hydrochemical Characteristics and the Genetic Mechanism of Low–Medium Temperature Geothermal Water in the Northwestern Songliao Basin,” *Water*, vol. 14, no. 2235, 2022, doi: 10.3390/w14142235.
- [23] A. Shawky *et al.*, “Utilization of abandoned oil well logs and seismic data for modeling and assessing deep geothermal energy resources: A case study,” *Sci. Total Environ.*, vol. 946, p. 174283, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174283>.
- [24] M. Kaczmarczyk, B. Tomaszewska, and L. Pająk, “Geological and Thermodynamic Analysis of Low Enthalpy Geothermal Resources to Electricity Generation Using ORC and Kalina Cycle Technology,” *Energies*, vol. 13, p. 1335, Mar. 2020, doi: 10.3390/en13061335.
- [25] D. T. Birdsell *et al.*, “Analytical solutions to evaluate the geothermal energy generation potential from sedimentary-basin reservoirs,” *Geothermics*, vol. 116, p. 102843, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102843>.
- [26] S. Quoilin, M. Van Den Broek, S. Declaye, P. Dewallefa, and V. Lemort, “Techno-economic survey of organic rankine cycle (ORC) systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, pp. 168–186, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.01.028.
- [27] B. Hu, J. Guo, Y. Yang, and Y. Shao, “Optimization of low temperature geothermal organic Rankine power generation system,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 129–138, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.01.101.