

## Analisis Potensi Panas Bumi di Desa Sampiri Kabupaten Minahasa Utara Berdasarkan Data Manifestasi Permukaan

Nora Michelle Angela Karaeng<sup>1)</sup>, Arsmstrong Sompotan<sup>2)</sup> , Jeferson Polii<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>Program Studi Fisika, Universitas Negeri Manado, Kabupaten Minahasa, 95618, Indonesia

<sup>2)</sup>Program Studi Geofisika, Universitas Negeri Manado, Kabupaten Minahasa, 95618, Indonesia

\*Corresponding author. E-mail: [jefersonpolii@unima.ac.id](mailto:jefersonpolii@unima.ac.id)

### INFO ARTIKEL

#### Riwayat Artikel:

Diterima: 25 April 2026

Direvisi : 29 April 2026

Disetujui: 30 April 2026

#### Kata Kunci:

Panas bumi;  
Sampiri;  
Geoindikator;  
Geotermometer.

#### Keywords:

Geothermal;  
Sampiri;  
Geoindicator;  
Geothermometer.

### ABSTRAK

Seiring meningkatnya kebutuhan energi akibat pertambahan penduduk, pemanfaatan potensi panas bumi di Indonesia masih belum optimal. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji potensi sumber daya panas bumi di Desa Sampiri, Kabupaten Minahasa Utara, melalui analisis karakteristik fluida dan estimasi temperatur reservoir. Metode yang digunakan meliputi analisis geokimia fluida dengan pengujian laboratorium, perhitungan geotermometer Na-K dan silika, serta pemodelan menggunakan diagram ternary Na-K-Mg. Hasil analisis menunjukkan bahwa tipe fluida panas bumi di Desa Sampiri termasuk dalam kategori *immature water*. Estimasi temperatur reservoir menggunakan geotermometer silika kuarsa berkisar antara 250,1–261,2°C, yang menunjukkan karakteristik reservoir bersuhu tinggi. Temuan ini mengindikasikan bahwa manifestasi panas bumi di Desa Sampiri memiliki potensi yang signifikan untuk dikembangkan sebagai sumber energi alternatif, serta memberikan dasar ilmiah awal bagi eksplorasi panas bumi pada wilayah di luar Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP).

### ABSTRACT

*Increasing energy demand driven by population growth has not been matched by optimal utilization of Indonesia's geothermal resources. This study aims to evaluate the geothermal potential of Sampiri Village, North Minahasa Regency, through geochemical characterization of geothermal fluids and reservoir temperature estimation. The methodology includes laboratory-based geochemical analysis, application of Na–K and silica geothermometers, and interpretation using the Na–K–Mg ternary diagram. The results indicate that the geothermal fluid is classified as immature water, suggesting incomplete chemical equilibrium and possible mixing processes during upflow. Reservoir temperature estimated using the quartz silica geothermometer ranges from 250.1 to 261.2°C, indicating a high-temperature geothermal system. These findings highlight the potential of geothermal manifestations in Sampiri Village as a prospective energy resource and provide a scientific basis for preliminary geothermal exploration in non-WKP areas.*

## PENDAHULUAN

Kebutuhan energi global terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi, perkembangan industri, serta peningkatan penggunaan teknologi dalam kehidupan sehari-hari (Mauliza et al., 2023). Kondisi ini juga terjadi di Indonesia sebagai negara berkembang yang mengalami peningkatan konsumsi energi secara signifikan. Oleh karena itu, pengembangan sumber energi terbarukan menjadi penting guna mendukung ketahanan energi nasional dan mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil (Primadanty, 2024).



Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar adalah energi panas bumi ([Agustiyar, 2022](#); [Bonita et al., 2025](#)). Indonesia merupakan salah satu negara dengan potensi panas bumi terbesar di dunia yang berkaitan erat dengan kondisi tektoniknya yang berada pada pertemuan beberapa lempeng aktif ([Irmawati, 2021](#)). Potensi tersebut tersebar di berbagai wilayah, termasuk Provinsi Sulawesi Utara yang memiliki kondisi geologi kompleks akibat aktivitas tektonik dan vulkanik ([Permatasari et al., 2024](#)). Struktur geologi seperti sesar, lipatan, serta keberadaan kaldera vulkanik, seperti Kaldera Tondano, menunjukkan adanya sistem panas bumi yang prospektif untuk dikaji lebih lanjut ([Buburanda et al., 2024](#)).

Berbagai penelitian sebelumnya telah memanfaatkan pendekatan geokimia untuk mengidentifikasi karakteristik fluida panas bumi dan mengestimasi temperatur reservoir, antara lain melalui penggunaan geoindikator Na–K–Mg dan geotermometer silika ([Agustiyar, 2022](#); [Jamlean et al., 2022](#); [Lontoh et al., 2022](#); [Permatasari et al., 2024](#); [Rukait et al., 2022](#)). Pendekatan ini efektif dalam menentukan tipe fluida, tingkat kesetimbangan kimia, serta proses interaksi fluida-batuan dalam sistem panas bumi. Namun demikian, sebagian penelitian tersebut masih terfokus pada wilayah yang telah ditetapkan sebagai Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP).

Di sisi lain, wilayah di luar WKP yang memiliki indikasi manifestasi panas bumi, seperti mata air panas, masih relatif kurang mendapatkan perhatian dalam kajian ilmiah, khususnya dari aspek geokimia. Salah satu wilayah tersebut adalah Desa Sampiri, Kabupaten Minahasa Utara yang menunjukkan adanya manifestasi panas bumi, namun belum pernah dikaji secara komprehensif. Keterbatasan informasi mengenai karakteristik fluida dan temperatur reservoir pada wilayah ini menjadi celah penelitian yang penting untuk dianalisis.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji karakteristik geokimia fluida panas bumi di Desa Sampiri serta mengestimasi temperatur reservoir yang berasosiasi dengan manifestasi mata air panas. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan metode eksplorasi panas bumi, khususnya pada wilayah di luar WKP, serta menjadi dasar awal dalam pemanfaatan potensi energi panas bumi secara berkelanjutan.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Desa Sampiri, Kecamatan Kalawat, Kabupaten Minahasa Utara, Provinsi Sulawesi Utara. Metode penelitian yang digunakan meliputi pengambilan data lapangan, analisis laboratorium, serta pengolahan data geokimia untuk mengidentifikasi karakteristik fluida dan estimasi temperatur reservoir.

Pengambilan data lapangan dilakukan dengan mengukur parameter fisik manifestasi panas bumi, meliputi suhu, pH, dan koordinat lokasi. Pengukuran suhu dilakukan menggunakan termometer, pH menggunakan pH meter, serta penentuan koordinat menggunakan *Global Positioning System* (GPS). Selain itu, sampel fluida panas bumi diambil dari setiap titik manifestasi untuk dianalisis lebih lanjut di laboratorium.

Analisis laboratorium dilakukan untuk menentukan kandungan kimia utama fluida, khususnya unsur natrium (Na), kalium (K), magnesium (Mg), dan silika (SiO<sub>2</sub>). Sampel mata air panas dianalisis untuk menentukan komposisi kimianya di *Water Laboratory Nusantara* (WLN), Manado. Pengujian kandungan kimia dilakukan menggunakan metode spektrometri berbasis *Inductively Coupled Plasma–Optical Emission Spectrometry* (ICP-OES).

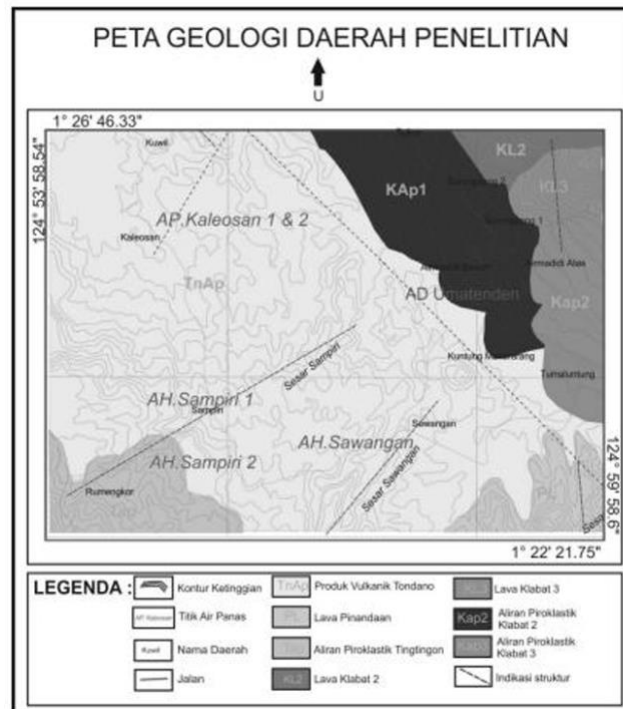
Data hasil analisis laboratorium selanjutnya diolah menggunakan metode geokimia, yaitu geoindikator Na–K–Mg untuk menentukan tipe fluida dan tingkat kesetimbangan kimia. Nilai konsentrasi masing-masing unsur dihitung dan diplot pada diagram ternary Na–K–Mg untuk mengklasifikasikan karakteristik fluida panas bumi ([Syuly Ratag et al., 2022](#)). Estimasi temperatur reservoir dilakukan menggunakan metode geotermometer, yaitu geotermometer Na–K dan geotermometer silika ([Jamlean et al., 2022](#); [Lontoh et al., 2022](#); [Permatasari et al., 2024](#); [Rukait et al., 2022](#); [Zainal et al., 2024](#)). Hasil perhitungan temperatur kemudian digunakan untuk menginterpretasikan tipe sistem panas bumi berdasarkan klasifikasi temperatur reservoir.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Karakteristik Geokimia Fluida

Sampel air panas diambil dari lokasi di Desa Sampiri, Kecamatan Kalawat, Kabupaten Minahasa Utara. Pengukuran temperatur mata air panas dilakukan dengan termometer, pH air ditentukan

menggunakan pH meter, serta lokasi titik sampling air panas dicatat dengan bantuan *google earth*. Peta geologi daerah penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Peta geologi daerah penelitian di Desa Sampiri dan sekitarnya

Peta geologi daerah penelitian di Desa Sampiri dan sekitarnya yang menunjukkan distribusi litologi, struktur geologi, serta lokasi manifestasi panas bumi. Area penelitian didominasi oleh batuan vulkanik yang berasosiasi dengan sistem panas bumi, serta dipengaruhi oleh struktur geologi berupa sesar yang berperan sebagai jalur aliran fluida panas bumi. Daerah penelitian disusun oleh litologi berupa aliran piroklastik dan lava. Sumber panas di wilayah ini diinterpretasikan berasal dari aktivitas Gunung Mahawu yang posisinya berada di barat daya, di luar daerah penelitian. Pengambilan data lapangan dilakukan pada dua titik manifestasi mata air panas di Desa Sampiri. Kegiatan pengukuran suhu dan pengambilan sampel fluida dilakukan secara langsung di lapangan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Kegiatan pengukuran parameter fisik pada manifestasi mata air panas di Desa Sampiri Titik 1 dan titik 2.

Titik 1 sampel air panas Desa Sampiri terletak pada koordinat  $1^{\circ}23'27''\text{N}$  &  $124^{\circ}55'57''\text{E}$  dengan ketinggian 288,3 m menurut *google earth*. Hasil pengukuran menunjukkan temperatur sampel  $42,3^{\circ}\text{C}$

dan pH 7,00 sehingga mata air panas pada titik ini diklasifikasikan bersifat netral, dengan kondisi fisik yang diamati yaitu air yang jernih, terdapat endapan lumpur, serta sedikit berbau dan terletak di samping telaga.

Sedangkan titik 2 di desa Sampiri berada pada koordinat  $1^{\circ}23'47N$  &  $124^{\circ}55'54E$  dengan elevasi 259,17 m dan temperatur fluida panas bumi sebesar  $32,0^{\circ}C$  dengan pH fluida 6,99 mata air panas di titik ini diklasifikasikan bersifat asam. Hasil pengamatan langsung pada area manifestasi menunjukkan kondisi fisik berupa air jernih, terdapat endapan lumpur, serta tercium sedikit bau. Data lengkap dapat dilihat dalam Tabel 1.

**Tabel 1.** Hasil Pengukuran Lapangan

| Manifestasi | Lokasi Sampel | Koordinat           |                   | Temperatur Fluida | Elevasi  | pH   |
|-------------|---------------|---------------------|-------------------|-------------------|----------|------|
|             |               | X                   | Y                 |                   |          |      |
| Air Panas   | Titik 1       | $124^{\circ}55'57E$ | $1^{\circ}23'27N$ | $42,3^{\circ}C$   | 288,3 m  | 7.00 |
|             | Titik 2       | $124^{\circ}55'54E$ | $1^{\circ}23'47N$ | $32,0^{\circ}C$   | 259,17 m | 6.99 |

Hasil analisis laboratorium menunjukkan bahwa kandungan ion utama pada sampel fluida panas bumi di Desa Sampiri didominasi oleh silika ( $SiO_2$ ), diikuti oleh natrium (Na), magnesium (Mg), dan kalium (K). Dominasi silika mengindikasikan adanya interaksi fluida dengan batuan reservoir pada temperatur tinggi, yang merupakan karakteristik umum sistem panas bumi hidrotermal. Dapat dilihat pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Hasil Uji Sampel Laboratorium

| Titik | Sampel    | Parameter |      |      |      | Total (mg/L) |
|-------|-----------|-----------|------|------|------|--------------|
|       |           | $SiO_2$   | Na   | K    | Mg   |              |
| 1     | Air panas | 145       | 34.4 | 10.2 | 16.6 | 206.1        |
| 2     | Air panas | 118       | 19   | 4.8  | 10.1 | 151.9        |

Data laboratorium pada Tabel 2 digunakan untuk menghitung geoindikator Na-K-Mg. Nilai yang diperoleh pada titik 1  $Na/1000 = 34.4$  mg/L,  $K/100 = 10.2$  mg/L, dan  $\sqrt{Mg} = 16.6$  mg/L. Sedangkan pada titik 2 tercatat  $Na/1000 = 19$  mg/L,  $K/100 = 4.8$  mg/L, dan  $\sqrt{Mg} = 10.1$  mg/L. Untuk mengetahui presentase senyawa dan  $\Sigma$  kadar digunakan Persamaan 1, 2, 3, dan 4 ([Giggenbach, 1988](#); [Utami & Putra, 2018](#)).

$$\Sigma \text{ kadar} = \frac{Na}{1000} + \frac{K}{100} + \sqrt{Mg} \quad (1)$$

$$\%Na = \frac{\frac{Na}{1000}}{\Sigma \text{ kadar}} \times 100 \% \quad (2)$$

$$\%Mg = \frac{\sqrt{Mg}}{\Sigma \text{ kadar}} \times 100 \% \quad (3)$$

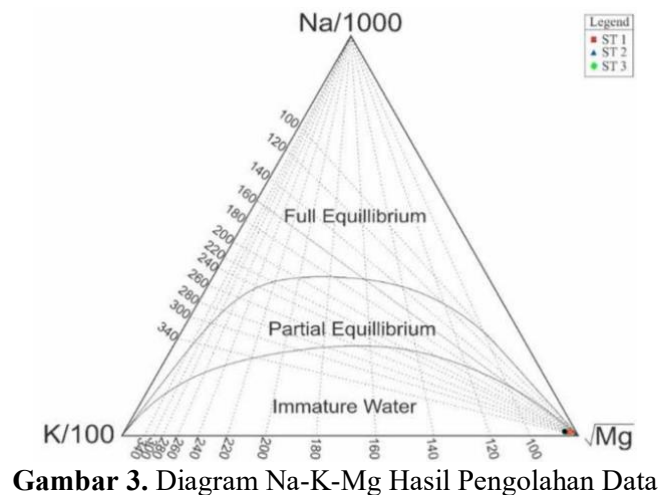
$$\%K = \frac{\frac{K}{100}}{\Sigma \text{ kadar}} \times 100 \% \quad (4)$$

Hasil analisis disajikan pada Tabel 3 yang memuat data persentase kandungan kimia dari sampel yang diuji.

**Tabel 3.** Hasil Uji Sampel Laboratorium

| Titik     | Na    | K     | Mg     |
|-----------|-------|-------|--------|
| Sampiri 1 | 0.8 % | 2.4 % | 96.8 % |
| Sampiri 2 | 0.5 % | 1.4 % | 98.1 % |

Hasil perhitungan  $\text{Na}/1000 + \text{K}/100 + \sqrt{\text{Mg}}$  serta persentase kadarnya yang diperoleh melalui persamaan, selanjutnya diplot pada diagram ternary Na-K-Mg seperti ditunjukkan Gambar 3. Plot tersebut mengindikasikan bahwa manifestasi air panas termasuk dalam zona *Immature Water*.



**Gambar 3.** Diagram Na-K-Mg Hasil Pengolahan Data

Berdasarkan Tabel 2, kandungan ion utama pada kedua titik sampel didominasi oleh silika ( $\text{SiO}_2$ ), masing-masing sebesar 145 mg/L dan 118 mg/L. Kandungan natrium (Na) tercatat sebesar 34,4 mg/L dan 19 mg/L, diikuti oleh magnesium (Mg) sebesar 16,6 mg/L dan 10,1 mg/L, sedangkan kalium (K) merupakan unsur dengan konsentrasi terendah, yaitu 10,2 mg/L dan 4,8 mg/L. Dominasi silika dalam fluida panas bumi menunjukkan adanya interaksi intensif antara fluida dan batuan reservoir pada temperatur tinggi, yang merupakan karakteristik umum sistem panas bumi hidrotermal.

Identifikasi tipe fluida dilakukan melalui analisis geokimia menggunakan diagram ternary Na-K-Mg berdasarkan metode Werner F. Giggenbach. Hasil plotting menunjukkan bahwa kedua sampel termasuk dalam zona *immature water*. Kondisi ini mengindikasikan bahwa fluida belum mencapai kesetimbangan kimia dan kemungkinan telah mengalami pencampuran dengan air meteorik selama proses migrasi menuju permukaan.

Hasil penelitian ini sejalan dengan studi terbaru yang menunjukkan bahwa fluida panas bumi umumnya mengalami proses pencampuran dengan air meteorik sebelum mencapai permukaan, yang menyebabkan kondisi tidak setimbang secara kimia (Bai et al., 2025; Jamlean et al., 2022). Dominasi magnesium (Mg) yang tinggi pada sampel juga mengindikasikan adanya pengaruh pencampuran air permukaan, sebagaimana dilaporkan pada beberapa sistem panas bumi di Indonesia. Selain itu, penelitian lain pada sistem panas bumi di Indonesia juga menunjukkan bahwa manifestasi permukaan umumnya didominasi oleh fluida tipe *immature water*, terutama pada daerah yang belum mengalami eksplorasi intensif.

Selain itu, penelitian pada sistem panas bumi Way Ratai menunjukkan bahwa karakteristik fluida dan temperatur reservoir sangat dipengaruhi oleh proses interaksi fluida-batuan serta kondisi geologi setempat (Rahayudin et al., 2020). Hal ini memperkuat interpretasi bahwa fluida di Desa Sampiri masih berada pada tahap evolusi geokimia awal.

Jika dibandingkan dengan sistem panas bumi lain di Indonesia, seperti pada penelitian sebelumnya fluida yang telah mencapai kesetimbangan kimia umumnya menunjukkan kandungan magnesium yang lebih rendah dan berada pada kondisi *mature water* (Rahayudin et al., 2020), yang mencerminkan interaksi fluida-batuan yang lebih intensif dan stabil (Assa & Isnawan, 2022). Perbedaan ini menunjukkan bahwa sistem panas bumi di Desa Sampiri kemungkinan masih dipengaruhi oleh proses pencampuran dan belum berkembang secara optimal.

Metode Giggenbach diterapkan dengan memplotkan persentase  $\text{Na}/1000$ ,  $\text{K}/100$  dan  $\sqrt{\text{Mg}}$  pada diagram ternary. Untuk mengetahui persentase senyawa dan  $\Sigma \text{kadar}$  digunakan persamaan  $\Sigma \text{Kadar} = \frac{\text{Na}}{1000} + \frac{\text{K}}{100} + \sqrt{\text{Mg}}$ ,  $\% \text{Na} = \frac{\frac{\text{Na}}{1000}}{\Sigma \text{kadar}} \times 100 \%$ ,  $\% \text{Mg} = \frac{\sqrt{\text{Mg}}}{\Sigma \text{kadar}} \times 100 \%$ ,  $\% \text{K} = \frac{\frac{\text{K}}{100}}{\Sigma \text{kadar}} \times 100 \%$  dengan hasil presentase pada Tabel 3. Presentase Na pada titik 1 dan titik 2 sebesar

0.8% dan 0.5%. Presentase K pada titik 1 dan 2 sebesar 2.4% dan 1.4% sedangkan presentase Mg adalah yang paling tinggi dimana pada titik 1 dan 2 sebesar 96.8% dan 98.1%.

Kadar Kalium (K) dipengaruhi oleh proses interaksi antara fluida dan batuan panas pada reservoir panas bumi bersuhu tinggi. Konsentrasi K yang rendah mengindikasikan laju aliran fluida panas bumi menuju permukaan berlangsung lambat. Kondisi tersebut juga menandakan terjadinya pencampuran antara fluida panas bumi dan air permukaan. Tahap berikutnya adalah proses pendinginan secara konduktif. Kondisi ini mengindikasikan bahwa mata air panas diperkirakan berasal langsung dari zona dalam dengan temperatur tinggi, meskipun relatif dipengaruhi oleh air permukaan atau pengenceran air meteorik di Desa Sampiri. Dengan demikian, hasil analisis kandungan tersebut dapat digunakan untuk memprediksi temperatur reservoir sekaligus mengidentifikasi sistem panas bumi non-vulkanik pada zona *upflow*.

Hasil plot pada diagram ternary Na-K-Mg pada Gambar 3 menunjukkan kedua sampel masuk ke dalam zona *immature water* serta memiliki kandungan Mg lebih dominan daripada Na dan K. Keberadaan sampel pada *immature water* menunjukkan bahwa fluida panas bumi di lokasi penelitian tidak berada dalam kondisi setimbang dan telah mengalami interaksi dengan unsur lain ketika naik ke permukaan. Kadar Mg yang tinggi menandakan bahwa air panas bumi telah mengalami pencampuran dengan air meteorik atau air tanah.

### Estimasi Temperatur Reservoir

Estimasi temperatur reservoir dilakukan menggunakan geotermometer silika kuarsa berdasarkan metode Arnorsson seperti pada Persamaan 5.

$$T = 53,500 + 0,11236 C - 05559 \times 10^{-4} C^2 + 0,1772 \times 10^{-7} C^3 + 88,390 \text{ Log} C \quad (5)$$

Dimana C=konsentrasi SiO<sub>2</sub>. Pada titik 1 nilai SiO<sub>2</sub> sebesar 145 mg/L dan pada titik 2 nilai SiO<sub>2</sub> sebesar 118 mg/L. Dari hasil analisa diperoleh temperatur 261,2°C di titik 1 dan 250,1°C di titik 2. Dengan demikian, temperatur reservoir diperkirakan berada pada rentang 250,1°C - 261,2°C dan termasuk kategori reservoir suhu tinggi.

Nilai temperatur ini menunjukkan kesesuaian dengan karakteristik sistem panas bumi hidrotermal yang berkembang di daerah vulkanik aktif (Li et al., 2024). Dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, kisaran temperatur tersebut relatif tinggi dan menunjukkan potensi sistem panas bumi yang prospektif untuk pengembangan energi. Studi lain juga menunjukkan bahwa temperatur reservoir di atas 225°C umumnya berkaitan dengan sistem panas bumi yang layak untuk dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik tenaga panas bumi.

Namun demikian, meskipun temperatur reservoir tergolong tinggi, keberadaan fluida dalam kategori *immature water* mengindikasikan bahwa fluida yang teramati di permukaan belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi reservoir (Ardelia et al., 2023). Hal ini disebabkan oleh proses pencampuran dengan air meteorik serta pendinginan selama migrasi fluida ke permukaan.

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, fluida panas bumi di lokasi penelitian diklasifikasikan sebagai *immature water*, yang ditunjukkan oleh dominasi kandungan magnesium (Mg) dan mengindikasikan bahwa fluida belum mencapai kesetimbangan kimia akibat proses pencampuran dengan air meteorik selama migrasi ke permukaan.

Estimasi temperatur reservoir menggunakan geotermometer silika kuarsa menunjukkan kisaran suhu antara 250,1°C - 261,2°C. Rentang temperatur tersebut mengklasifikasikan sistem panas bumi pada lokasi penelitian sebagai reservoir bersuhu tinggi. Meskipun fluida permukaan belum mencerminkan kondisi kesetimbangan reservoir, hasil ini menunjukkan bahwa sistem panas bumi di Desa Sampiri memiliki potensi yang signifikan untuk dikembangkan. Hasil penelitian ini memberikan informasi awal mengenai karakteristik sistem panas bumi di wilayah non-Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP) serta dapat menjadi dasar dalam kegiatan eksplorasi dan pengembangan sumber energi panas bumi di masa mendatang.

## REFERENSI

- Agustiyar, F. (2022). Kajian Potensi Panas Bumi Sebagai Renewable Energy dan Pemanfaatannya pada Daerah Prospek Panas Bumi Gunung Telomoyo Magelang. *Jurnal Offshore: Oil, Production Facilities and Renewable Energy*, 6(2), 85–95. <https://doi.org/10.30588/jo.v6i2.1217>
- Ardelia, A., Pujiastuti, D., & Pohan, A. F. (2023). Identifikasi Karakteristik Fluida dan Estimasi Temperatur Reservoir Panas Bumi di Tanjung Raya dan Palupuh, Kabupaten Agam. *Jurnal Fisika Unand*, 12(3), 395–401. <https://doi.org/10.25077/jfu.12.3.394-400.2023>
- Assa, M. M. V., & Isnawan, D. (2022). EVALUATION OF GEOTHERMAL RESERVOIR CONDITIONS BASED ON WELL PADS GEOCHEMICAL DATA IN LX GEOTHERMAL FIELD. *KURVATEK*, 7(1), 43–50. <https://doi.org/10.33579/krvtk.v7i1.3133>
- Bai, Y., Shi, Z., Tong, J., Ye, H., Zhou, X., Wang, G., Liu, K., & Zhang, S. (2025). Mixing mechanisms control the hydrogeochemical composition in medium-low enthalpy geothermal areas. *Geothermics*, 128, 103270. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2025.103270>
- Bonita, D. P., Wihadanto, A., & Rusdiyanto, E. (2025). Analisis Keberlanjutan Pemanfaatan Energi Panas Bumi di Kawasan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Ulumbu Nusa Tenggara Timur. *SENTRI: Jurnal Riset Ilmiah*, 4(11), 3372–3388. <https://doi.org/10.55681/sentri.v4i11.4912>
- Buburanda, H., Ode, L., Sarif, M., Safiuddin, L. O., Aba, L., Halu, U., Kendari, O., & Sulawesi, P. (2024). Identifikasi Struktur Geologi Dasar Perairan Pulau Sulawesi Berdasarkan Interpretasi Data Geofisika. 2(2), 32–35.
- 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/10.1016/0016-7037\(88\)90143-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90143-3)
- Irmawati. (2021). *Energi Panas Bumi di Indonesia*. 1–9.
- Jamlean, V., Bujung, C. A. N., & Rampengan, A. M. (2022). STUDI KIMIA FISIK FLUIDA PADA MANIFESTASI PANAS BUMI DANAU LINOW. *Jurnal FisTa : Fisika Dan Terapannya*, 3(2), 33–38. <https://doi.org/10.53682/fista.v3i2.211>
- Li, Q., Hao, Y., Liu, C., Huang, J., & Yuan, X. (2024). Representative High-Temperature Hydrothermal Activities in the Himalaya Geothermal Belt (HGB): A Review and Future Perspectives. *Water*, 16(10), 1378. <https://doi.org/10.3390/w16101378>
- Lontoh, T., Taunaumang, H., & Polii, J. (2022). ANALISIS KARAKTERISTIK FLUIDA DAN ESTIMASI TEMPERATUR RESERVOIR MENGGUNAKAN GEOINDIKATOR Na-K-Mg DI KECAMATAN TOMPASO BARU. *Jurnal FisTa : Fisika Dan Terapannya*, 3(2), 26–32. <https://doi.org/10.53682/fista.v3i2.210>
- Mauliza, P., Yana, S., Susanti, S., Rahmi, R., Ikhar, S., Maryam, M., & Syamsuddin, N. (2023). Kendala Pemenuhan Suplai dan Permintaan Energi Terbarukan Biomassa Indonesia. *Jurnal Serambi Engineering*, 8(3). <https://doi.org/10.32672/jse.v8i3.6449>
- Permatasari, G., Sompotan, A. F., & Polii, J. (2024). Analisis Karakteristik Fluida dan Estimasi Temperatur Reservoir Desa Sawangan Kabupaten Minahasa Utara. *Jurnal FisTa : Fisika Dan Terapannya*, 5(2), 66–72. <https://doi.org/10.53682/fista.v5i2.355>
- Primadanty, R. P. (2024). Potensi Biomassa Dalam Transisi Energi di Indonesia. *PARAHYANGAN ECONOMIC DEVELOPMENT REVIEW*, 2(2), 136–143. <https://doi.org/10.26593/pedr.v2i2.7707>
- Rahayudin, Y., Kashiwaya, K., Tada, Y., Iskandar, I., Koike, K., Atmaja, R. W., & Herdianita, N. R. (2020). On the origin and evolution of geothermal fluids in the Patuha Geothermal Field, Indonesia based on geochemical and stable isotope data. *Applied Geochemistry*, 114, 104530. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104530>
- Rukait, R., Palilingan, R. N., & Polii, J. (2022). ANALISIS KARAKTERISTIK FLUIDA DAN ESTIMASI TEMPERATUR RESERVOIR DI DESA KARUMENGA KECAMATAN LANGOWAN UTARA. *Jurnal FisTa : Fisika Dan Terapannya*, 3(2), 8–11. <https://doi.org/10.53682/fista.v3i2.208>
- Syuly Ratag, A., Bujung, C. A. N., Tumimomor, F. R., & Polii, J. (2022). ANALISIS TIPE FLUIDA MATA AIR PANAS BERDASARKAN DIAGRAM Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> DI DESA PINAESAN KABUPATEN MINAHASA SELATAN. *Jurnal FisTa : Fisika Dan Terapannya*, 3(2), 1–7. <https://doi.org/10.53682/fista.v3i2.206>

- Utami, Z. D., & Putra, A. (2018). Penentuan Karakteristik Fluida dan Estimasi Temperatur Reservoir Panas Bumi di Sekitar Gunung Talang. *Jurnal Fisika Unand*, 7(2), 130–137. <https://doi.org/10.25077/jfu.7.2.130-137.2018>
- Zainal, P. A., Sutriyono, E., & Ibrahim, M. M. (2024). Perkiraan Temperatur Reservoir Panas Bumi Berdasarkan Metode Geotermometer Silika (SiO<sub>2</sub>) pada Daerah Danau Ranau dan Sekitarnya. *Jurnal Penelitian Sains*, 26(3), 376. <https://doi.org/10.56064/jps.v26i3.1064>