

Analisis Karakteristik Fluida Dan Estimasi Temperatur Reservoir Desa Sawangan Kabupaten Minahasa Utara

Gloria Permatasari^{1)*}, Armstrong F. Sompotan²⁾, Jeferson Polii³⁾

^{1,2,3} Program Studi Fisika, Universitas Negeri Manado, Kabupaten Minahasa, 95618, Indonesia

*Corresponding author. E-mail: glopermatasari@gmail.com

Diterima 26 Agustus 2024; Disetujui 15 Oktober 2024

ABSTRAK

Energi panas bumi adalah energi yang tersimpan dalam batuan di bawah permukaan bumi dan fluida yang terkandung di dalamnya. Indonesia, yang terletak di *Ring of Fire*, memiliki potensi panas bumi yang besar, terutama di Sulawesi Utara. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji potensi energi panas bumi di Desa Sawangan, Kabupaten Minahasa Utara, khususnya di mata air panas Sungai Kepangian. Penelitian dilakukan dengan menganalisis karakteristik fluida dan memperkirakan temperatur reservoir panas bumi menggunakan metode geokimia fluida dan perhitungan geotermometer. Analisis dilakukan melalui pengujian sampel fluida di laboratorium, diikuti dengan pengolahan data menggunakan geotermometer Na-K dan silika serta plotting diagram ternary Na-K-Mg. Hasil analisis menunjukkan bahwa tipe fluida di mata air panas Sungai Kepangian adalah *immature water*, dengan estimasi suhu reservoir antara 240,04°C hingga 267,01°C, yang termasuk dalam kategori reservoir bersuhu tinggi.

Kata kunci : Panas Bumi, Desa Sawangan, Karakteristik Fluida, Geotermometer.

ABSTRACT

Geothermal energy is the heat stored within the Earth's subsurface rocks and the fluids contained within them. Indonesia, located on the Ring of Fire, has significant geothermal potential, particularly in North Sulawesi. This study aims to assess the geothermal energy potential in Sawangan Village, North Minahasa Regency, specifically at the Kepangian River hot springs. The research was conducted by analyzing the fluid characteristics and estimating the geothermal reservoir temperature using geochemical fluid analysis and geotermometer calculations. The analysis involved laboratory testing of fluid samples, followed by data processing using Na-K and silica geotermometers and plotting on a Na-K-Mg ternary diagram. The results indicate that the fluid type at the Kepangian River hot springs is immature water, with an estimated reservoir temperature ranging from 240.04°C to 267.01°C, which classifies it as a high-temperature reservoir.

Keywords : Geothermal, Sawangan Village, Fluid Characteristics, Geotermometer.

1. PENDAHULUAN

Seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk dan kebutuhan akan energi, permintaan energi terus bertambah. Ini terlihat dari peningkatan aktivitas industri, penggunaan transportasi, dan konsumsi barang elektronik dalam kehidupan sehari-hari. Indonesia sebagai negara berkembang, mengalami peningkatan kebutuhan energi setiap tahunnya. Oleh karena itu, pengembangan energi baru dan terbarukan menjadi sangat penting. Menurut *International Energy Agency* (dalam Purnawan, 2021), energi terbarukan adalah energi yang berasal dari proses alami yang terus-menerus diperbarui dan dapat diproduksi secara berkelanjutan tanpa perlu menunggu waktu yang lama. Salah satu jenis energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan adalah energi panas bumi.

Panas bumi adalah sumber energi panas yang tersimpan di dalam air panas, uap air, serta batuan yang mengandung mineral dan gas lainnya yang secara alami terintegrasi dalam suatu sistem panas bumi. Energi ini terkandung dalam batuan bawah permukaan bumi dan fluida yang ada di dalamnya. Indonesia memiliki potensi sumber daya panas bumi yang sangat besar, karena secara geologis, negara ini berada di jalur gunung api atau *Ring of Fire*, yang menjadikannya kaya akan potensi panas bumi. Potensi ini sedang dikembangkan oleh pemerintah untuk memenuhi kebutuhan energi nasional.

Sumber panas bumi biasanya diidentifikasi dengan adanya manifestasi panas bumi yang muncul ke permukaan. Di Sulawesi Utara, khususnya di Kecamatan Sawangan, Kabupaten Minahasa Utara, terdapat

manifestasi panas bumi berupa mata air panas di Sungai Kepangan, Desa Sawangan, yang menunjukkan adanya potensi panas bumi. Secara geologis, Desa Sawangan berada di atas batuan gunung api muda, yang mengindikasikan potensi panas bumi di wilayah tersebut.

Untuk menentukan potensi panas bumi di suatu daerah, diperlukan penelitian terhadap manifestasi permukaan, salah satunya melalui analisis geokimia untuk memahami sifat kimia-fisik fluida dan memperkirakan suhu reservoir.

2. KAJIAN LITERATUR

Sistem Panas Bumi

Sistem panas bumi (*geothermal*) adalah salah satu bentuk energi panas alami yang dihasilkan dari dalam bumi dengan fluida yang terkandung di dalamnya. Panas bumi menurut Undang-undang Republik Indonesia Nomor 21 Tahun 2014 didefinisikan sebagai sumber energi panas yang terkandung di dalam air panas, uap air, serta batuan bersama mineral ikutan dan gas lainnya yang secara genetika tidak dapat dipisahkan dalam suatu sistem panas bumi. Menurut (Rachmaningtias, Setyawan, & Baru, 2014) terdapat tiga elemen penting yang berpengaruh dalam sistem panas bumi, yaitu sumber panas (*heat source*), fluida panas bumi, dan reservoir.

Adanya material panas pada kedalaman beberapa ribu kilometer di bawah permukaan bumi menyebabkan terjadinya aliran panas dari sumber panas tersebut hingga ke permukaan. Hal ini menyebabkan terjadinya perubahan temperatur dari bawah hingga ke permukaan (Saptadji, 2001).

Fluida panas bumi yang terkandung dalam reservoir hidrotermal berasal dari air permukaan, antara lain air hujan (air meteorik) yang meresap masuk ke bawah permukaan dan terpanaskan oleh suatu sumber panas. Selain itu air panas dalam perjalanannya ke permukaan juga dapat mengalami perubahan fasa sehingga menjadi fluida dua fasa, yaitu campuran uap air. Fluida panas tersebut dapat juga bercampur dengan fluida lainnya, misalnya dengan fluida magmatik (termasuk gas-gas yang berasal dari magma) dan air dingin dari sumber lain. Komposisi fluida panas juga akan berubah akibat oksidasi di dekat permukaan (Saptadji, 2009).

Reservoir adalah formasi batuan di bawah permukaan yang mampu menyimpan dan mengalirkan fluida termal (uap dan atau air

panas). Reservoir biasanya merupakan batuan yang memiliki porositas dan permeabilitas yang baik. Porositas berperan dalam menyimpan fluida termal sedangkan permeabilitas berperan dalam mengalirkan fluida termal.

Menurut (Hochstein, 1990) dalam (Saptadji, 2001), berdasarkan pada besarnya temperatur, sistem panas bumi menjadi tiga, yaitu:

1. Sistem/reservoir bertemperatur tinggi, yaitu suatu sistem yang reservoirnya mengandung fluida bertemperatur diatas 225°C.
2. Sistem/reservoir bertemperatur sedang, yaitu suatu sistem yang reservoirnya mengandung fluida bertemperatur antara 125°C dan 225°C.
3. Sistem panas bumi bertemperatur rendah, yaitu suatu sistem yang reservoirnya mengandung fluida dengan temperatur lebih kecil dari 125°C.

Geokimia

Metode geokimia dalam penelitian eksplorasi panas bumi digunakan untuk mengkaji kemungkinan pengembangan sumber daya panas bumi. Geokimia panas bumi mempelajari dan menganalisis komposisi fluida panas bumi untuk mengetahui jenis fluida, pola aliran fluida, proses-proses yang dialami fluida, dan estimasi suhu reservoir (Jamlean, Bujung, & Rampengan, 2022). Analisis dengan metode geokimia tidak hanya dilakukan pada gas atau fluida pada manifestasi panas bumi di permukaan, tetapi juga untuk melihat kandungan gas dan unsur-unsur yang terkandung dalam tanah pada daerah lainnya yang terbentuk karena adanya aktivitas hidrotermal. Hasil dari analisis gas, isotop air dan kimia fluida dari manifestasi yang keluar dipermukaan bermanfaat untuk memperkirakan asal atau sumber air, sistem hidrologi, karakteristik fluida serta estimasi temperatur reservoir.

Geoindikator

Geoindikator merupakan metode untuk menentukan zona *upflow* dan *outflow* pada sistem panas bumi. Salah satu dari beberapa tipe geoindikator panas bumi adalah Geoindikator (Na-K-Mg) (Giggenbach & Goguel, 1989). Geoindikator Na-K-Mg dapat menunjukkan kesetimbangan reaksi dari air

batuan dengan menggunakan plot diagram ternary dari prentetase Na/1000-K/100- Mg (Giggenbach, 1988).

Nilai Presentase dalam menentukan plot diagram ternary dapat dihitung menggunakan persamaan (1), (2), (3), dan (4) :

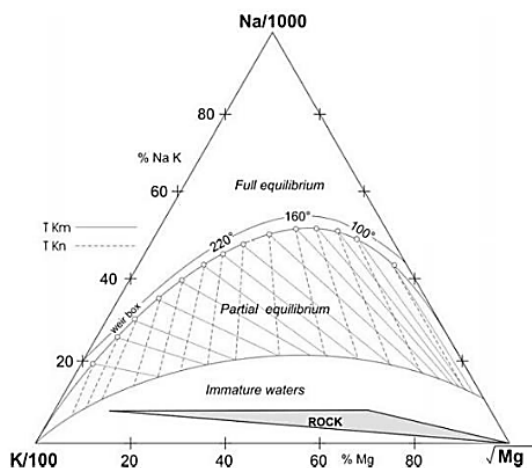
$$\sum Kadar = \frac{Na}{1000} + \frac{K}{100} + \sqrt{Mg} \quad (1)$$

$$\% Ion = \frac{jumlah\ ion}{\sum kadar} \times 100\% \quad (2)$$

$$\% K = \frac{\frac{K}{100}}{\sum Kadar} \times 100\% \quad (3)$$

$$\% Mg = \frac{\sqrt{Mg}}{\sum Kadar} \times 100\% \quad (4)$$

Hasil perhitungan nilai presentase yang dihitung menggunakan persamaan (1), (2), (3), dan (4) kemudian diplot menggunakan diagram ternary Na-K-Mg pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Ternary Na-K-Mg

Tipe fluida panas bumi pada diagram ternary terbagi menjadi tiga, yaitu:

- *Full Equilibrium Waters* adalah kondisi dimana fluida panas bumi berada dalam keadaan setimbang.
- *Partial Equilibrium Waters* adalah kondisi dimana fluida sebagian telah mengalami perubahan sehingga tidak sepenuhnya berada dalam keadaan setimbang.
- *Immature Waters* adalah kondisi dimana fluida tersebut sudah tidak dalam keadaan setimbang dan telah bercampur dengan air meteorik atau air tanah.

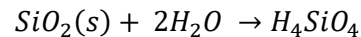
Geotermometer

Geotermometer adalah suatu persamaan yang menggunakan konsentrasi dari unsur unsur kimia fluida panas bumi untuk memperkirakan temperatur reservoir dibawah permukaan (Saptadji, 2009). Menurut (Sismanto & Andayani, 2012), persamaan geotermometer dianggap paling efektif diterapkan karena dapat memberikan hasil perhitungan suhu yang lebih akurat dengan memiliki nilai kesalahan estimasi kurang dari 5%.

Persamaan Geotermometer yang dipakai dalam perkiraan temperatur bawah permukaan (Reservoir) yaitu:

1. Geotermometer Silika

Geotermometer silika dibuat berdasar kelarutan berbagai jenis silika dalam air sebagai fungsi dari temperatur yang ditentukan dengan simulasi/eksperimen. Reaksi yang menjadi dasar pelarutan silika dalam air adalah:



Pada kebanyakan sistem panas bumi, fluida di kedalaman mengalami ekuilibrium dengan kuarsa (Aribowo, 2011). Untuk menentukan temperatur bawah permukaan dengan menggunakan Geotermometer dengan kandungan SiO_2 dapat menggunakan beberapa persamaan diantaranya adalah persamaan (5), (6), dan (7).

a. Quartz-no steam loss (Fournier, 1977)

$$t^{\circ}C = \frac{1309}{5.19 - \log C} - 273.15 \quad (5)$$

b. Quartz-max steam loss (Fournier, 1977)

$$t^{\circ}C = \frac{1309}{5.19 - \log C} - 273.15 \quad (6)$$

c. Quartz (Arnorsson, 1985)

$$t^{\circ}C = 53.500 + 0.11236C - 0.5559 \times 10^{-4}C^2 + 0.1772 \times 10^{-7}C^3 + 88.390 \log C \quad (7)$$

2. Geotermometer Na-K

Persamaan yang digunakan untuk menentukan temperatur bawah permukaan menggunakan geotermometer dalam kandungan Na-K dapat dilihat pada persamaan (8) dan (9).

a. Na-K (Fournier, 1979)

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{1217}{(\log Na/K) + 1,483} - 273 \quad (8)$$

b. Na-K (Giggenbach, 1988)

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{1390}{(\log Na/K) + 1,75} - 273 \quad (9)$$

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di salah satu manifestasi air panas di Sungai Kepangian, Desa Sawangan, Kabupaten Minahasa Utara, Provinsi Sulawesi Utara. Teknik pengumpulan data dilakukan dengan cara mengumpulkan data secara langsung di lapangan manifestasi mata air panas. Data yang diukur berdasarkan sifat fisik yaitu nilai pH, temperatur permukaan dan temperatur udara di lokasi penelitian. Sedangkan untuk sifat kimia, sampel mata air panas akan dibawa ke laboratorium air dan dianalisis untuk mengetahui komposisi kandungan kimiawi fluida mata air panas.

Teknik pengolahan dan analisis data dilakukan dengan metode geokimia yaitu dengan menganalisis komposisi kimia dalam fluida dan memperkirakan temperatur reservoir. Pengolahan data geokimia fluida mata air panas dilakukan dengan uji laboratorium terhadap sampel mata air panas berupa data kandungan ion balance Na, K, dan Mg. Kemudian hasil data yang diperoleh dapat digunakan untuk menentukan tipe fluida mata air panas menggunakan diagram ternary dan perhitungan perkiraan temperatur reservoir panas bumi menggunakan geotermometer air yang sesuai dengan daerah penelitian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Fluida Reservoir Daerah Manifestasi

Penelitian mengenai karakteristik fluida dan estimasi temperatur reservoir ini berlokasi di mata air panas desa Sawangan. Dari hasil

pengamatan langsung di lapangan, kondisi fisik yang terlihat yaitu kondisi air yang keluar dari rekahan (sumber mata air panas) terlihat bening dan batuan disekitarnya terdapat endapan berwarna putih. Kemudian dilakukan pengambilan data lapangan dan sampel air panas manifestasi panas bumi di mata air panas desa Sawangan. Data lapangan yang diukur adalah Temperatur Manifestasi, Temperatur Udara, dan pH air panas. Berdasarkan pengukuran yang dilakukan, mata air panas ini memiliki temperatur 39°C dan temperatur udara $29,7^{\circ}\text{C}$ serta nilai pH 6,4 yang berarti mata air panas ini bersifat asam dan mendekati netral.

Sampel fluida mata air panas desa Sawangan ini diambil dengan menggunakan botol sampel dan disimpan didalam box untuk melindungi botol sampel agar suhu dan kandungan ion sampel tidak berubah. Sampel yang diambil selanjutnya dibawa ke laboratorium PT. Water Laboratory Nusantara (WLN) Indonesia dan dilakukan analisis data serta pengujian sampel untuk memperoleh parameter geokimia fluida. Berikut dibawah ini adalah hasil pengujian sampel ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kandungan senyawa kimia fluida

Sampel	Komposisi Kimia			
Air Panas	(SiO ₂)	(Na)	(K)	(Mg)
	98.1	24.7	3.7	6.49

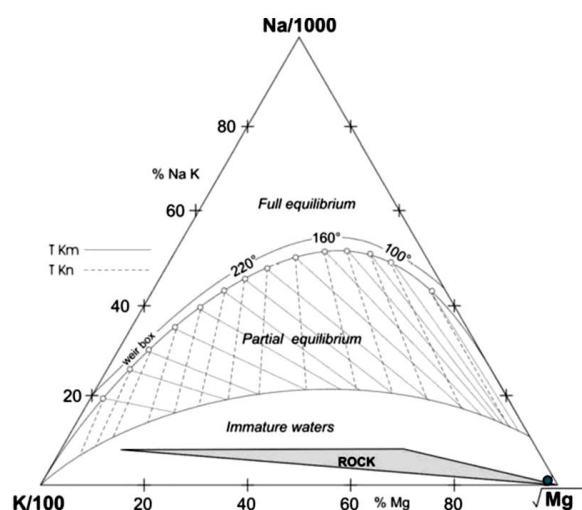
Tipe fluida pada mata air panas ditentukan dengan analisis geokimia fluida, menggunakan plot diagram ternary berdasarkan nilai ion Natrium (Na), Kalium (Kalium), dan Magnesium (Mg) yang terkandung pada sampel. Menurut (Giggenbach, 1988) geoindikator Na-K-Mg dapat menunjukkan kesetimbangan reaksi dari air batuan dengan menggunakan plot diagram ternary dari presentasi $Na/1000-K/100-\sqrt{Mg}$. Geoindikator Na-K-Mg menggunakan perhitungan $\frac{Na}{1000} + \frac{K}{100} + \sqrt{Mg}$ untuk mengetahui jumlah kadar dari Na = 24.7, K = 3.7, dan Mg = 6.49. Untuk mengetahui presentase senyawa masing masing menggunakan persamaan (2), (3), dan (4).

Berdasarkan perhitungan, data presentase senyawa yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Presentase senyawa kimia fluida

Presentase (%)			Total
Na	K	Mg	
0.94 %	1.41 %	97.65 %	100 %

Hasil perhitungan diatas kemudian diplot menggunakan diagram ternary Na-K-Mg seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Plot Diagram Ternary presentase Na-K-Mg

Berdasarkan plot diagram ternari Na-K-Mg yang ditunjukkan pada Gambar 2, manifestasi mata air panas berada pada posisi *Immature Waters* yang artinya kondisi dimana fluida sudah tidak dalam keadaan setimbang dan telah bercampur dengan air meteorik atau air tanah. Hal ini menunjukkan bahwa fluida mata air panas di daerah ini telah bercampur dengan air tanah atau batuan.

Melihat dari konsentrasi Na yang rendah bisa mengindikasikan bahwa sumber panas bumi tersebut tidak memiliki banyak interaksi dengan batuan yang mengandung natrium, konsentrasi Mg yang tinggi mengindikasikan *leaching*/pelarutan batuan di dekat permukaan atau pengenceran oleh air meteorik kaya Mg (Aribowo, 2011), dan unsur K dikontrol oleh interaksi fluida dengan batuan panas dalam sistem panas bumi reservoir yang bertemperatur tinggi. unsur K yang sedikit pada manifestasi mata air panas menunjukkan bahwa aliran fluida panas bumi ke permukaan

bergerak lambat. Ini menandakan adanya campuran pada mata air panas dari fluida panas bumi dan air permukaan yang dekat dengan permukaan. Hal ini menunjukkan bahwa fluida mata air panas di daerah ini telah bercampur dengan air meteorik atau air batuan.

Estimasi Temperatur Reservoir Manifestasi Panas Bumi

Untuk memperkirakan temperatur reservoir manifestasi panas bumi, dapat menggunakan Geotermometer. Menurut (Sismanto & Andayani, 2012), persamaan geotermometer dianggap paling efektif diterapkan karena dapat memberikan hasil perhitungan suhu yang lebih akurat dengan memiliki nilai kesalahan estimasi kurang dari 5%. Menurut (Herman, 2003) dalam (Ardelia, Pujiastuti & Pohan, 2023) bahwa temperatur batuan akan semakin tinggi apabila letaknya semakin kedalam bumi, sehingga dapat diartikan bahwa temperatur reservoir panas bumi akan lebih tinggi daripada temperatur permukaan mata air panas.

Karena Na^+ dan K^+ merupakan ion yang kesetimbangannya lambat, maka pencampuran ion-ion lain tidak akan memberi pengaruh yang cukup besar sehingga hasil geotermometer Na-K dapat menggambarkan suhu bawah permukaan (Bujung, Dungus & Yasin, 2020). Geotermometer Na-K juga tepat untuk air dengan pH netral. Kemudian karena temperatur permukaan mata air panas menunjukkan kondisi mata air hangat dengan temperatur 39°C , maka persamaan geotermometer silika yang paling tepat digunakan pada daerah penelitian adalah persamaan geotermometer silika quartz oleh Arnorsson (1985) yang dibuat dengan mempertimbangkan kondisi manifestasi panas bumi yakni persamaan geotermometer ini lebih sesuai digunakan pada manifestasi sumber mata air hangat.

Maka geotermometer yang digunakan untuk memperkirakan estimasi temperatur reservoir pada daerah penelitian adalah Geotermometer Na-K dan Geotermometer Silika kuarsa oleh Arnorsson. Sehingga perhitungan untuk memperkirakan temperatur reservoir dapat menggunakan persamaan (7), (8), dan (9) dengan hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Estimasi Temperatur Reservoir

Geotermometer	Estimasi Temperatur
Na-K (Fournier, 1979)	254.52°C
Na-K (Giggenbach, 1988)	267.01°C
Quartz (Arnorsson, 1985)	240.04°C

Hasil perhitungan menggunakan Geotermometer Silika Kuarsa oleh Arnorsson mendapatkan estimasi temperatur reservoir adalah 240.04°C yang artinya suhu reservoir bertipe suhu tinggi. Hasil perhitungan menggunakan persamaan Geotermometer Na-K oleh Fournier (1979) mendapatkan estimasi temperatur 254.52°C dan untuk persamaan Geotermometer Na-K oleh Giggenbach (1988) diperoleh hasil 267.01°C yang artinya juga bertipe suhu tinggi.

Adanya perbedaan yang sangat antara temperatur permukaan dan temperaturreservoir atau hasil nilai perhitungan geotermometer yang berbeda beda ini bisa terjadi Karena menurut (Emianto & Aribowo, 2011) permukaan di daerah *immature water* cenderung memiliki temperatur yang rendah akibat pengaruh interaksi fluida panas bumi dengan unsur yang mengendap di permukaan seperti silika sehingga temperatur fluida panas bumi pada reservoir di daerah penelitian bisa lebih tinggi dari temperatur pada permukaan. Hal ini bisa terjadi karena fluida panas bumi telah bercampur dengan air permukaan yang lebih dingin sehingga temperatur fluida panas bumi yang sampai ke permukaan manifestasi mengalami penurunan.

Berdasarkan hasil yang didapatkan, diperkirakan temperatur reservoir manifestasi panas bumi di Mata Air Panas, Sungai Kepangian berada di kisaran 240.04°C hingga 267.01°C. Sehingga dapat dilihat bahwa estimasi temperatur yang menggunakan Geotermometer Silika dan Geotermometer Na-K sama sama memiliki temperatur tipe tinggi sesuai dengan klasifikasi temperatur sistem panas bumi dalam (Saptadji, 2009).

5. KESIMPULAN

1. Fluida air panas pada daerah manifestasi memiliki temperatur 39°C, temperatur udara di daerah manifestasi adalah 29.7°C, dan nilai pH 6.4 dengan ciri fisik air panas yang

bening dan adanya endapan berwarna putih di batuan sekitar air panas dan rekahan sumber air panas. Dan dengan menggunakan geoindikator Na-K-Mg dapat diketahui bahwa tipe fluida atau air panas di mata air panas sungai kepangian desa Sawangan adalah *immature water*.

2. Estimasi temperatur reservoir ditentukan menggunakan persamaan Geotermometer Silika dan Geotermometer Na-K. Hasil perhitungan yang didapatkan untuk persamaan Geotermometer Silika adalah 240.04°C, hasil perhitungan menggunakan Geotermometer Na-K Fournier (1979) adalah 254.52°C dan hasil perhitungan menggunakan persamaan Geotermometer Na-K Giggenbach (1988) adalah 267.01°C. Rata – rata keseluruhan estimasi temperatur diperkirakan adalah 253.85°C, sehingga dapat dilihat bahwa temperatur reservoir merupakan reservoir bertipe suhu tinggi.

6. REFERENSI

- 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.
- Aribowo, Y. (2011). *Prediksi Temperatur Reservoir Panasbumi Dengan Menggunakan Metoda Geotermometer Kimia Fluida*. 32(3), 236–237.
- Arnorsson, S. (1985). The Use Of Mixing Models And Chemical Geothermometers for Estimating Underground Temperatures in Geothermal Systems. *Elsevier Science*, 23, 299–335.
- Bujung, C. A. N., Dungus, F., & Yasin, K. C. (2020). Karakteristik Reservoir Panas Bumi Berdasarkan Analisis Kimia Fisik Fluida Area Bolaang Mongondow Timur. *JSME*, 8.
- Emianto, Y., & Aribowo, Y. (2011). *Studi Geokimia Fluida Panasbumi Daerah Prospek Panasbumi Nglimit, G. Ungaran Kecamatan Limbangan, Kabupaten Kendal Jawa Tengah*. 32(3), 230–231.
- Fournier, R. . (1977). *Chemical Geothermometers And Mixing Models For Geothermal Systems*. 5(1970), 41–50.
- Fournier, R. O. (1979). A revised equation for the Na/K geotermometer. *Geothermal*

- Resources Council*, 221–224.
- Giggenbach, W. F. (1988). *Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers*. Vol. 52, 2749–2765.
- Giggenbach, W. F., & Goguel, R. . (1989). *Collection and Analysis of Geothermal and Volcanic Water and Gas Discharges* (4th ed.). Chemistry Division, Department of Scientific and Industrial Research.
- Herman, D. (2003). *Studi Sistem Panas Bumi Aktif Dalam Rangka Penyiapan Konservasi Energi Panas Bumi*.
- Hochstein, M. P. (1990). Classification and Assessment of Geothermal Resources. In *Small Geothermal Resources - A guide to Development and Utilization*. UNITAR.
- Jamlean, V., Bujung, C. A. N., & Rampengan, A. M. (2022). Studi kimia fisik fluida pada manifestasi panas bumi danau linow. *FISTA*, 3(2), 33–38.
- Rachmaningtias, N., Setyawan, A., & Baru, I. (2014). Identifikasi Struktur Resistivitas Daerah Geothermal “ T ” Berdasarkan Hasil Pemodelan 2D Datamagnetotelurik. *Youngster Physics Journal*, 3(2), 143–146.
- Saptadji, N. (2001). *Teknik panasbumi*. Institut Teknologi Bandung.
- Saptadji, N. (2009). Karakterisasi Reservoir Panas Bumi. *Training Advance Geothermal Engineering*, 6–17.
- Sismanto, & Andayany, H. (2012). *Pengembangan Persamaan Geotermometer Empiris Untuk Estimasi Suhu Reservoir Sumber Mata Air Panas*. *April*, 191–195.