

	Bulletin of Scientific Contribution GEOLOGY Fakultas Teknik Geologi UNIVERSITAS PADJADJARAN homepage: http://jurnal.unpad.ac.id/bsc p-ISSN: 1693-4873; e-ISSN: 2541-514X	 Volume 23, No.1 April 2025
---	---	---

**KARAKTERISTIK GEOKIMIA AIR PANAS DENGAN MENGGUNAKAN METODE
ANATOMIC ABSORPTION SPRECTROPHOTOMETER (AAS), GEOTHERMOMETER DAN
GEOINDIKATOR, STUDI KASUS: ULU BELU, KABUPATEN TANGGAMUS PROVINSI
LAMPUNG**

Anisa Nurjanah, Aditya Raihan Armandani, Khanaya Syafarah Aulia, Salma Aulia Azzahra, Suci Febria Lestari,
Yogie Zulkurnia Rochmana

Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya
Korespondensi email : yogie.zrochmana@ft.unsri.ac.id

ABSTRACT

Geochemical characteristics of geothermal fluids act as the main indicator in understanding reservoir conditions and evaluating the potential of geothermal energy in an area. One of the areas that has geothermal potential is in the Ulu Belu area, Tanggamus Regency, Lampung Province. This study aims to determine the chemical elements, geothermal reservoir temperature and type of spring. This research uses AAS (Atomic Absorption Spectrophotometer), geothermometer, and geoinicator methods. The AAS method was used to analyze the content of chemical elements in the hot water samples, the geothermometer helped in estimating the reservoir temperature, the geoinicator was used to determine the type of hot water based on its chemical composition. This study revealed the presence of Magnesium (Mg^{2+}) at 12.79 ppm - 6.64 ppm, Calcium (Ca^{2+}) at 11.90 ppm - 6.66 ppm, then Iron (Fe^{3+}) at 17.35 ppm - 1.22 ppm. The results of processing using a geothermometer obtained an estimated temperature of the Ulu Belu reservoir between 54.59°C - 60.26°C. Therefore, it can be said that the influence of surface water is indicated by the high magnesium content in the hot water manifestation. The results of data processing using geoinicators showed that the hot springs located at the research site are immature water type with relatively high Mg content indicating that the hot water samples have been mixed with groundwater.

Keywords: AAS, Geochemistry, Geoinicator, Geothermal, Geothermometer

ABSTRAK

Karakteristik geokimia fluida panas bumi berperan sebagai indikator utama dalam memahami kondisi reservoir dan mengevaluasi potensi energi panas bumi di suatu wilayah. Salah satu wilayah yang memiliki potensi panas bumi berada di daerah Ulu Belu, Kabupaten Tanggamus Provinsi Lampung. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui unsur-unsur kimia, suhu reservoir geotermal dan jenis mata air. Penelitian ini menggunakan metode AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometer*), geotermometer, dan geoindikator. Metode AAS digunakan untuk menganalisis kandungan unsur-unsur kimia dalam sampel air panas, geotermometer membantu dalam memperkirakan suhu reservoir, geoindikator digunakan untuk menentukan tipe air panas berdasarkan komposisi kimianya. Studi ini mengungkapkan terdapat unsur Magnesium (Mg^{2+}) berkisar 6,64 ppm - 12,79 ppm, unsur Kalsium (Ca^{2+}) berkisar 6,66 ppm - 11,90 ppm, kemudian unsur Iron (Fe^{3+}) berkisar 1,22 ppm - 17,35 ppm. Hasil pengolahan menggunakan geotermometer diperoleh estimasi suhu reservoir Ulu Belu antara 54,59°C - 60,26°C. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa pengaruh air permukaan ditunjukkan oleh tingginya kandungan magnesium dalam manifestasi air panas. Hasil pengolahan data dengan menggunakan geoindikator didapatkan bahwa mata air panas yang berada pada lokasi penelitian bertipe *immature water* dengan kandungan Mg yang relatif tinggi mengindikasikan bahwa sampel air panas telah tercampur dengan air tanah.

Kata kunci: AAS, Geoindikator, Geokimia, Geotermal, Geotermometer

PENDAHULUAN

Pemanfaatan panas bumi memerlukan pemahaman mendalam tentang karakteristik geokimia fluida reservoir, seperti komposisi kimia, pH, temperatur di permukaan, dan unsur logam yang terkandung. Karakteristik geokimia pada pemanfaatan panas bumi cukup berperan dalam memahami sifat fisik dan kimia fluida geothermal. Analisis ini penting untuk menentukan kondisi reservoir, temperatur bawah permukaan dan tingkat kematangan air. Kendala utama dalam studi ini adalah variabilitas karakteristik geokimia antar lokasi. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang holistik untuk mengidentifikasi dan menganalisis parameter geokimia dengan menggunakan metode ASS, geoindikator dan geotermometer guna mengetahui karakteristik geokimia panas bumi secara optimal. Geothermal ini dapat ditemukan pada beberapa daerah salah satunya Sumatera yang memiliki potensi panas bumi besar akibat keberadaannya di zona tektonik aktif dengan aktivitas vulkanik yang tinggi.

Salah satu daerah yang memiliki sistem geothermal signifikan adalah Ulu Belu, yang terletak di Provinsi Lampung (Gambar 1). Di daerah Ulu Belu, ditemui beberapa titik sumber geothermal yang ditandai oleh keberadaan manifestasi permukaan seperti mata air panas, yang menunjukkan adanya sistem panas bumi aktif di bawah permukaan seperti yang ditemukan pada daerah penelitian (Gambar 2). Geologi daerah Ulu Belu ditandai oleh keberadaan batuan sedimen laut, batuan gunung api, dan struktur geologi yang terbentuk akibat aktivitas magma serta pergerakan lempeng tektonik, yang mempengaruhi pembentukan zona permeabilitas dan prospek panas bumi di wilayah tersebut (Panjaitan, 2010). Pada peta *lineament* dapat dilihat dilokasi penelitian berada pada zona patahan, sehingga dapat mengindikasikan keterdapat air panas di atas permukaan (Gambar 3). Sejumlah fenomena panas bumi seperti fumarol, aliran tanah, danau panas, dan mata air panas telah ditemukan di wilayah Suoh dan sekitarnya (Alfalah et al., 2023). Hal ini diyakini memiliki hubungan langsung dengan keberadaan sumber panas bumi yang dalam (Alfalah et al, 2023). Untuk mengoptimalkan eksplorasi dan pemanfaatan energi geothermal, diperlukan pemahaman yang mendalam mengenai karakteristik geokimia air panas di daerah tersebut.

Tujuan dari karakterisasi ini adalah untuk menganalisis komposisi kimia air panas, memahami karakteristik sistem panas bumi di daerah penelitian, mengetahui unsur-unsur kimia, suhu reservoir geothermal dan jenis mata air. Berbagai metode yang telah

digunakan memiliki peran penting dalam mengidentifikasi struktur bawah permukaan, zona permeabilitas tinggi, serta distribusi fluida hidrotermal yang berhubungan dengan sistem panas bumi yang memberikan gambaran awal mengenai potensi sumber daya panas bumi di suatu lokasi (Hasim et al., 2014). Namun pada penelitian sebelumnya belum dilakukan analisis lebih lanjut mengenai unsur-unsur kimia yang terkandung didalam fluida hidrotermal, suhu reservoir geothermal serta jenis mata air yang berada pada lokasi penelitian. Meskipun potensinya besar, penggunaan energi geothermal di daerah ini masih terbatas karena minimnya pemahaman tentang sifat kimia air panas yang ada. Hingga saat ini, penelitian secara sistematis untuk mengidentifikasi dan menganalisis komposisi kimia serta sifat fisik air panas di Ulu Belu masih belum dilakukan secara mendetail. Maka dari itu, diperlukan penelitian yang menerapkan metode analisis geokimia guna mengevaluasi fisik dan kimia air panas, dan mengevaluasi kemungkinan sumber daya energi panas bumi di wilayah tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk melengkapi pengetahuan yang telah ada

dan memberikan landasan ilmiah untuk pengembangan lebih lanjut dari potensi geothermal di Ulu Belu.

METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini menggunakan tiga metode berupa AAS yang dipilih untuk menganalisis kandungan unsur-unsur kimia dalam sampel air panas, geotermometer membantu dalam memperkirakan suhu reservoir dan geoindikator digunakan untuk menentukan tipe air panas berdasarkan komposisi kimianya. Dasar pendekatan AAS adalah gagasan bahwa atom menyerap cahaya. Panjang gelombang cahaya tertentu diserap oleh atom, tergantung pada unsurnya. Metode geokimia dipilih metode ini memberikan penilaian menyeluruh terhadap komposisi kimia fluida panas bumi yang menggambarkan keadaan dan fitur reservoir di bawah permukaan. Unsur-unsur natrium (Na), kalium (K), kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan logam berat yang mungkin ada dalam gas panas bumi dan air panas semuanya dianalisis menggunakan AAS. Data ini sangat penting dalam mengidentifikasi proses geokimia yang terjadi di dalam sistem hidrotermal serta dalam menghitung suhu reservoir menggunakan metode geotermometer, seperti geotermometer Na-K dan SiO₂. Geoindikator dapat menghasilkan data awal tentang manifestasi panas bumi permukaan, seperti fumarol, mata air panas, dan komposisi gas, yang merupakan penanda

aktivitas panas bumi bawah permukaan. Metode geotermometer adalah teknik dalam memperkirakan temperatur bawah permukaan pada sistem panas bumi dengan menganalisis komposisi kimia air panas, di mana dalam penelitian ini, geotermometer silika SiO_2 dan geotermometer Na-K digunakan untuk memberikan estimasi suhu yang akurat berdasarkan kandungan ion dalam fluida (William et al., 2020). Berbagai jenis geotermometer, seperti geotermometer K-Mg, digunakan sebagai parameter untuk menentukan suhu reservoir. Ketika terdapat konsentrasi magnesium yang nyata, geotermometer ini digunakan. Manifestasi dengan kandungan magnesium yang tinggi dipengaruhi oleh air permukaan di dekat permukaan. Ketika suhu turun antara 50-300°C, geotermometer ini dapat digunakan. Persamaan pertama geotermometer ini adalah:

$$T^{\circ}\text{C} = \frac{4410}{13,95 + \log\left(\frac{\text{K}_2}{\text{Mg}}\right)} - 273,15 \dots \dots (1)$$

Fournier (1977) merumuskan serangkaian persamaan untuk menghitung perkiraan suhu reservoir panas bumi. Dalam persamaan tersebut, memanfaatkan parameter kelarutan silika dalam fluida, karena fluida panas bumi umumnya berada dalam keseimbangan kimia dengan silika (kuarsa). Salah satu contoh persamaan semacam ini adalah (C = kandungan silika):

- a. *No Steam Loss*, Geotermometer berfungsi dalam mengukur cairan yang mendingin karena konduksi saat bergerak ke permukaan atau untuk air panas yang berada di bawah suhu didih.

Rumus persamaan 2.1:

$$T = 1309 / (5,19 - \log C) - 273,15 \dots \dots (2)$$

- b. *Max Steam Loss*, keberadaan kehilangan panas uap dalam fluida yang diteliti diperkirakan menggunakan geotermometer ini. Ketika air panas mencapai titik didih, yang biasanya terjadi di dekat sumur limbah, persamaan ini digunakan.

Rumus persamaan 2.2

$$T = 1522 / (4,69 - \log C) - 273,15 \dots \dots (3)$$

- c. *Chalcedony*, Geotermometer berfungsi dengan baik apabila air telah mencapai kondisi jenuh dan suhu fluida berada di bawah 150°C, sehingga dapat digunakan untuk memperkirakan temperatur reservoir dalam sistem geotermal dengan kondisi tersebut. Rumus persamaan 2.3 :

$$T = 1032 / (4,69 - \log C) - 273,15 \dots \dots (4)$$

Melalui proses pertukaran kation yang bergantung pada suhu, geotermometer Na-K (Fournier, 1979) menggambarkan bagaimana rasio konsentrasi Na terhadap K berubah seiring dengan suhu fluida. Dimungkinkan untuk menyelidiki reservoir klorida air dengan suhu lebih tinggi dari 180°C menggunakan pendekatan geotermometer. Manfaat utama geotermometer Na-K yaitu ketidakepekaannya terhadap kehilangan uap air. Rumus matematis yang menjadi dasar geotermometer ini adalah:

$$T^{\circ}\text{C} = \frac{4410}{1483 + \log\left(\frac{\text{Na}}{\text{K}}\right)} - 273,15 \dots \dots (5)$$

Analisis geoindikator merupakan studi terhadap parameter geologi dan geokimia yang mencerminkan kondisi serta perubahan dalam sistem panas bumi. Tujuan dari penggunaan geoindikator adalah untuk mengidentifikasi area aliran air panas dan aliran keluar dalam sistem geotermal yang sedang diteliti. Geoindikator Cl-SO₄-HCO₃ merupakan salah satu tipe geoindikator yang penting dalam studi geotermal (Giggenbach, 1988). Salah satu teknik untuk mengidentifikasi jenis fluida reservoir panas bumi dan mencapai sifat reservoir yang dibutuhkan adalah diagram segitiga Cl- SO₄- HCO₃. Konsentrasi sulfat (SO₄), bikarbonat (HCO₃), dan klorida (Cl) adalah parameter yang digunakan dalam grafik ini. Geoindikator Cl-Li-B. Perbandingan konsentrasi Cl/100 dan B/4 yang dinyatakan dalam persentase, diagram segitiga Cl-Li-B memiliki peranan krusial dalam mengevaluasi proses pemanasan dan pencairan.

Menentukan zona outflow dan upflow adalah aspek lain dari penggunaan gambar ini. Fluida yang keluar dengan energi panas dikatakan berada di zona aliran atas, sedangkan fluida yang keluar tanpa energi panas dikatakan berada di zona aliran keluar. Diagram segitiga Na-K-Mg dibuat dengan menggabungkan geotermometer Na-K dan KMg, yang ditampilkan sebagai titik dalam geoindikator Na-K-Mg (Giggenbach, 1988). Rasio Na/K yang murni muncul dari reaksi kimia yang seimbang antara Na dan K yang berlangsung di dalam reservoir.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran nilai pH pada tiga titik pengamatan (Tabel 1) menunjukkan bahwa nilai pH maksimal terletak di titik pengamatan 2 dengan nilai sebesar 7,42 (Gambar 4), pH minimal terletak di titik pengamatan 3 dengan nilai sebesar 5,80 (Gambar 4) dan nilai serta nilai rata-rata sebesar 6,81. Dari hasil pengukuran dapat diklasifikasikan bahwa manifestasi air panas yang berada di daerah Ulu Belu Kabupaten Tanggamus, Lampung tergolong kedalam air yang memiliki sifat asam-netral. Pada grafik

analisis laboratorium unsur-unsur yang ada di sumber air panas, magnesium memiliki nilai tertinggi dalam kaitannya dengan nilai unsur-unsur lainnya. Sampel 1 dan 3 masing-masing berwarna biru, jingga, dan abu-abu (Gambar 5). Setiap unsur sumber air panas memiliki nilai yang berbeda dalam tiga hasil sampel yang dianalisis untuk kandungan unsur di laboratorium. Proses geokimia sumber air panas di area studi diketahui melibatkan transmisi panas dan interaksi kimia antara sumber panas dan media (batuan penutup dan reservoir) yang dilalui panas hingga mencapai permukaan. Tingkat kandungan ketiga sampel menunjukkan bukti perpindahan panas dan reaksi kimia. Temuan geokimia utama dalam sampel 1 sebagaimana ditunjukkan oleh hasil karakterisasi, adalah Mg^{2+} sebesar 10,80 ppm, Ca^{2+} sebesar 6,66, dan $K+ Na+ Fe^{3+}$ yang semuanya memiliki kandungan unsur di bawah 5 ppm (Tabel 2). Hasil karakterisasi sampel 2 menunjukkan bahwa hasil kimia yang paling umum pada sampel 1 adalah Mg^{2+} sebesar 12,79 ppm, Ca^{2+} sebesar 8,15 ppm, $Na+$ (7,05 ppm), dan $K+ Fe^{3+}$ (kurang dari 5 ppm) (Tabel 2). Fe^{3+} (17,35 ppm), $Na+$ (11,93 ppm), Ca^{2+} sebesar 11,90 ppm, dan $K+ Mg^{2+}$ sebesar kurang dari 10 ppm merupakan hasil kimia yang paling umum pada sampel 1, menurut hasil karakterisasi sampel 3 (Tabel 2).

Hasil Analisis Geotermometer

Dengan menggunakan keberadaan bahan kimia yang terlarut dalam cairan panas bumi yang konsentrasinya sangat dipengaruhi oleh suhu, geotermometer dapat menentukan suhu sumber panas bumi. Setiap geotermometer yang digunakan perlu berhati-hati dalam aplikasinya agar tidak terjadi kesalahan dalam interpretasi (William et al., 2020). Bila terdapat konsentrasi magnesium yang nyata, geotermometer K-Mg ini digunakan. Kadar magnesium yang tinggi merupakan tanda bahwa air permukaan dan fluida reservoir tercampur (Alfalah et al., 2023). Suhu reservoir dapat dipastikan berdasarkan analisis indikator geologi K-Mg dari hasil perhitungan plot K-Mg. Merujuk pada rumus persamaan 1 diperoleh hasil magnesium yang tinggi berasal dari pengukuran reservoir Ulu Belu berada pada kisaran $54,59^{\circ}C$ hingga $60,26^{\circ}C$. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa pengaruh air permukaan ditunjukkan oleh kandungan magnesium yang tinggi pada manifestasi air panas. Hal ini semakin diperkuat oleh fakta bahwa jika suhu reservoir turun, konsentrasi magnesium akan naik (Tabel 4). Suhu reservoir di wilayah Ulu Belu diperkirakan antara $103,3^{\circ}C$ dan $106,6^{\circ}C$ berdasarkan perhitungan yang

dilakukan dengan geotermometer kalsedon. Perhitungan ini menggunakan parameter konsentrasi silika dalam sampel air, yang diaplikasikan dalam Geotermometer Kuarsa untuk memperkirakan suhu reservoir dengan merujuk rumus persamaan 4. Kalsedon menjadi teknik yang digunakan dalam situasi ini, terutama untuk air jenuh dengan suhu sekitar $150^{\circ}C$. Karena perkiraan ini didasarkan pada sifat saturasi manifestasi dan suhu permukaan yang tidak melebihi $150^{\circ}C$, hasilnya memberikan nilai acuan yang bermanfaat (Tabel 5). Karakteristik elemen Na-K digunakan untuk memperkirakan suhu reservoir berdasarkan geoindikator Na-K-Mg. Perhitungan ini menggunakan rumus persamaan 5, yang diterapkan untuk menganalisis reservoir klorida dengan suhu di atas $180^{\circ}C$. Geotermometer Na-K mengamati perubahan dalam rasio konsentrasi Na terhadap K seiring dengan meningkatnya suhu cairan. Hal ini berkaitan dengan reaksi pertukaran kation yang bergantung pada suhu (Fournier, 1979). Menurut hasil analisis yang dilakukan dengan geotermometer Na-K, suhu rata-rata di wilayah Suo adalah $272,3^{\circ}C$, dengan perkiraan berkisar antara $272,32^{\circ}C$ hingga $272,3^{\circ}C$ (Tabel 8). Perlu disebutkan bahwa hasil analisis mungkin tidak mencerminkan suhu reservoir secara akurat. Hal ini karena aliran fluida panas bumi yang dekat dengan permukaan bumi menyebabkan elemen terlarut, terutama elemen Na-K mengendap. Akibatnya, susunan kimia fluida reservoir mungkin berbeda (Tabel 6).

Hasil Analisis Geoindikator

Perubahan atau variasi cairan dalam reservoir dianalisis menggunakan diagram geoindikator $Cl-SO_4-HCO_3$. Diagram segitiga $Cl-SO_4-HCO_3$ dibuat dengan mengubah data dari analisis kimia air menjadi persentase (Tabel 7). Fluida asam sulfat adalah jenis fluida yang ditemukan di wilayah penelitian, menurut hasil plot diagram segitiga $Cl-SO_4-HCO_3$. Dengan kadar air klorida (Cl) yang rendah dan konsentrasi bikarbonat (HCO_3) yang tidak terpantau, air asam sulfat (SO_4) ditemukan sebagai komponen utama di lokasi penelitian 1, 2, dan 3 (Gambar 6). Dengan membandingkan persentase konsentrasi $Cl/100$ dan $B/4$, geoindikator $Cl-Li-B$ digunakan untuk menilai fenomena pemanasan dan pencairan. Diagram segitiga $Cl-Li-B$ kemudian digunakan untuk mengilustrasikan temuan analisis (Gambar 7). Fluida di zona dominan klorida (Cl) menunjukkan penyerapan gas boron yang sederhana, seperti yang terlihat pada plot diagram $Cl-Li-B$, yang menunjukkan bahwa gas tersebut berasal dari kondisi hidrotermal yang telah stabil selama jangka waktu yang

cukup lama. Karena boron (B) dan klorida (Cl) tahan terhadap reaksi pada suhu hidrotermal, fenomena ini terjadi. Oleh karena itu, diperkirakan bahwa reservoir atau kondisi suhu yang sebanding merupakan sumber dari tujuh mata air panas bumi. Keseimbangan kimia sampel air diperiksa dan suhu reservoir diperkirakan menggunakan geoindikator Na-K-Mg. Karena Na, K, dan Mg dihasilkan sebagai akibat dari variasi suhu dalam cairan panas bumi, konsentrasinya diperiksa dalam analisis kesetimbangan ini. Kemudian, data ini ditampilkan dalam diagram segitiga Na-K-Mg. Untuk menentukan jenis fluida, diperlukan informasi tentang kandungan suhu magnesium (Mg), kalium (K), dan natrium (Na). Data ini, yang selanjutnya ditampilkan dalam diagram segitiga Na-K-Mg (Gambar 8), dihasilkan dengan menghitung persentase komponen Na, K, dan Mg. Temuan analisis dan nilai kandungan yang ditunjukkan dalam diagram Na-K-Mg membuatnya sangat jelas bahwa air di sumber air panas pada lokasi penelitian belum matang (*immature water*). Studi diagram segitiga Na-K-Mg mengungkapkan bahwa konsentrasi Mg sampel secara signifikan lebih besar daripada kandungan Na dan K-nya, yang menunjukkan bahwa air tersebut masih dalam tahap belum matang. Selain itu, kondisi air yang masih muda menunjukkan bahwa batuan reservoir terpapar pada suhu dan tekanan yang sangat tinggi. Batuan tersebut telah diencerkan dan tercampur oleh air pada suhu tersebut sebelum mencapai puncak, sehingga menghasilkan komposisi yang mengandung banyak komponen magnesium. Berdasarkan hasil analisis didapatkan hasil berupa tingginya suhu fluida air panas pada daerah penelitian tersebut yang menunjukkan bahwa telah terjadi pencampuran antara air panas dengan air tanah. Dengan menganalisis data kimia berupa kandungan relatif bikarbonat (HCO_3), sulfat (SO_4), dan klorida (Cl) yang sebelumnya telah diolah dengan menentukan persentase masing-masing unsur, dapat ditentukan karakteristik fluida panas dalam reservoir berdasarkan jenisnya didapatkan bahwa fluida reservoir termasuk kedalam kategori *immature water*. Hal ini selaras dengan penelitian terdahulu yang berinteraksi dengan air meteorik yang kaya magnesium, dikategorikan sebagai air yang belum matang (*immature water*) (William et al., 2020). Namun, berdasarkan hasil plot diagram segitiga pada jenis fluida yang ditemukan di daerah penelitian adalah fluida asam sulfat (H_2SO_4) yang dibuktikan dengan adanya kandungan air asam sulfat (SO_4) sebagai komponen utama, dengan kandungan klorida (Cl) air yang rendah dan

tidak terpantau kandungan bikarbonat (HCO_3) yang mana hal ini tidak selaras dengan penelitian sebelumnya memperlihatkan tipe mata air panas berupa Klorida-Bikarbonat yang memiliki kandungan klorida (Cl) lebih dominan bila dibandingkan dengan kandungan bikarbonat (HCO_3) dan sangat kecil memiliki kandungan SO_4 pada kondisi "*mature water*", (William et al., 2020). Penelitian ini menunjukkan jenis mata air panas diidentifikasi berdasarkan hasil perhitungan proporsi kandungan relatifnya berupa Cl, SO_4 , dan HCO_3 (Tabel 3). Selain itu, pada penelitian ini juga dilakukan pengukuran *temperature* secara langsung di lapangan, hasil pengukuran memperoleh nilai tertinggi yaitu sebesar $93,9^\circ\text{C}$ pada titik pengamatan satu dan nilai *temperature* terendah berada di titik pengamatan tiga yaitu sebesar $88,9^\circ\text{C}$ namun, hal ini tidak selaras dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan penginderaan jauh yang diintegrasikan menggunakan metode geokimia berupa data manifestasi daerah penelitian, temperatur permukaan tertinggi pada daerah penelitian sebesar $35,55^\circ\text{C}$ (Al Dhiya et al., 2023). Perbedaan hasil ini dapat disebabkan oleh perbedaan metode yang digunakan dalam pengukuran suhu. Pengukuran langsung yang pada penelitian ini dilakukan pada sumber manifestasi panas bumi, sehingga suhu yang tercatat mencerminkan suhu fluida panas bumi yang muncul ke permukaan.

KESIMPULAN

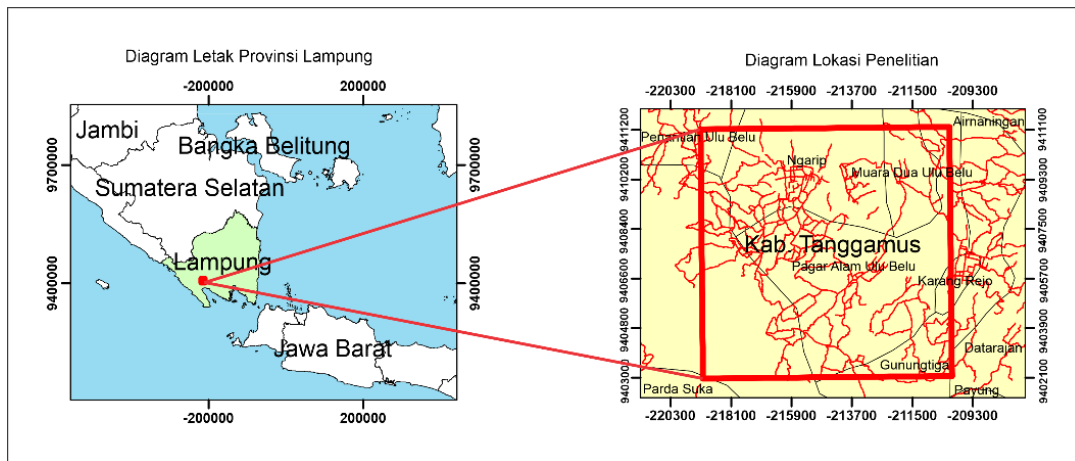
Berdasarkan pengukuran lapangan, pH air panas rata-rata berkisar $5,80^\circ\text{C}$ - $7,22^\circ\text{C}$. Suhu permukaan yang terdeteksi berada dalam rentang $88,9^\circ\text{C}$ hingga $93,9^\circ\text{C}$. Fluida reservoir dikategorikan sebagai *immature water* dengan kandungan Mg yang tinggi, di mana suhu tinggi menunjukkan adanya pencampuran air panas dengan air tanah. Berdasarkan hasil plot diagram Cl- SO_4 - HCO_3 , air panas termasuk dalam jenis cairan asam sulfat. Analisis diagram Na-K-Mg juga menunjukkan bahwa fluida reservoir tergolong sebagai *immature water* dengan kandungan Mg yang tinggi, mengindikasikan adanya pencampuran dengan air tanah. Menurut hasil studi diagram Cl-Li-B, fluida di zona dominan klorida (Cl) memiliki sedikit penyerapan gas boron, yang menunjukkan bahwa fluida tersebut berasal dari sistem hidrotermal purba. Perhitungan geotermometer memperkirakan suhu reservoir di Ulu Belu berkisar antara $54,59^\circ\text{C}$ hingga $60,26^\circ\text{C}$. Tingginya kadar magnesium dalam manifestasi air panas menunjukkan pengaruh air permukaan. Berdasarkan geotermometer kuarsa, suhu reservoir diperkirakan antara $103,3^\circ\text{C}$ dan $106,6^\circ\text{C}$,

sedangkan perhitungan menggunakan geotermometer kalsedon memberikan estimasi suhu bawah permukaan sebesar 150°C , menawarkan nilai referensi yang signifikan. Perkiraan suhu reservoir dengan geotermometer Na-K menunjukkan nilai antara $272,32^{\circ}\text{C}$ hingga $272,33^{\circ}\text{C}$, dengan rata-rata $272,33^{\circ}\text{C}$. Presipitasi unsur-unsur terlarut, terutama Na dan K, dalam aliran fluida panas bumi yang mencapai permukaan biasanya menjadi alasan tingginya suhu ini.

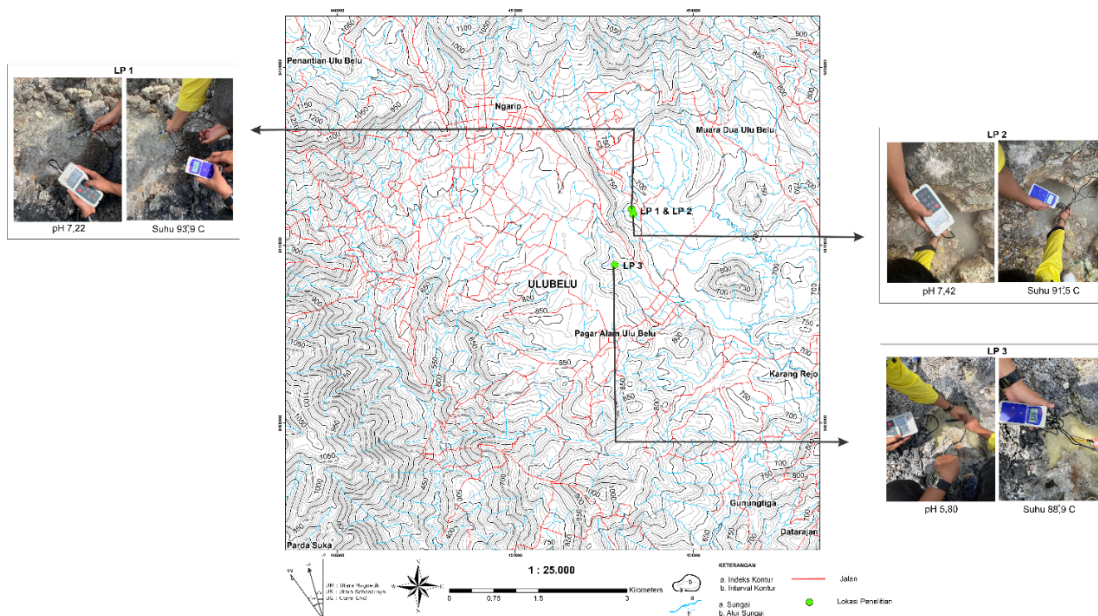
DAFTAR PUSTAKA

- Advokaat, E.L., Bonger, M.L.M., Rudyawan, A., BouDagher-Fadhel, M.K., Langereis, C.G., van Hinsbergen, D.J.J., 2018. Early Cretaceous origin of the Woyla Arc, Sumatra, Indonesia on the Australian plate. *Earth and Planetary Science Letters*. 498. Hal. 348-361.
- Agustina et al. 2020. Karakteristik Air Daerah Panas Bumi Pencong dengan Metode AAS (Anatomic Absorption Spectrophotometer) di Kecamatan Biring Buku Kabupaten Goa Provinsi Sulawesi Selatan. *Jurnal Geoelebes*.
- Ahmad Zaeludin. 2020. Delineasi Subsiden pada Zona Alterasi di Lapangan Panas Bumi Ulu Belu Berdasarkan *Interferometry Synthetic Aperture Radar Time Series*. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 2-3.
- Alfalalah, J. A., Sutriyono, E., & Ibrahim, M. M. 2023. Karakteristik Geokimia Air Panas Dan Estimasi Suhu Permukaan Panas Bumi Di Daerah Suoh Kabupaten Lampung Barat Provinsi Lampung. *Jurnal Ilmiah Global Education*, 4(3), 1657-1668.
<https://doi.org/10.55681/jige.v4i3.1167>
- D.N. Sahdaraani et al. 2020. Geothermal Energy As An Alternative For Indonesia Energy Security: The Prospect And Challenges, 3-4.
- Direktorat Panas Bumi Kementerian Energi Direktorat Jenderal EBTKE dan Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panas Bumi Indonesia 2017, Badan Geologi. *Potensi Panas Bumi Indonesia Jilid 1*. Jakarta : Direktorat Panas Bumi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Febriansyah, Putra Aldo, et al. 2016. Pull-Apart Basin of Sumatran Fault: Pekerjaan Sebelumnya dan Perspektif Saat Ini . Prosiding , Seminar Nasional Kebumian ke-9. Peran Riset Ilmu Kebumian dalam Pemberdayaan Masyarakat 6-7 Oktober 2016; Grha Sabha Pramana.
- Fournier, Robert O. 1989. Geotermometer Air Diterapkan pada Energi Panas Bumi. AS: Survei Geologi AS.
- Giggenbach, WF. 1988. Teknik Kimia Dalam Eksplorasi Panas Bumi. Selandia Baru: Divisi Kimia, DSIR, Private Bag.
- Hasim, L.F., Robyansah, dan Hasan, T.A. 2014. Aplikasi Geofisika Terhadap Eksplorasi Sumber Daya Panas Bumi. Makassar: Jurusan Fisika FMIPA UNHAS.
- Husein, S., et al. 2015. Tectonic Control to Geothermal System of Way Panas, Lampung, Indonesia. *World Geothermal Congress*, 1-12.
- Ilmu Kebumian dalam Pemberdayaan Masyarakat 6-7 Oktober 2016; Grha Sabha
- Jasmin Arya Alfalah, et al. 2023. Karakteristik Geokimia Air Panas dan Estimasi Suhu Permukaan Panas Bumi di Daerah Suoh Kabupaten Lampung Barat Provinsi Lampung. *Jurnal Ilmiah Global Education*, 4-5.
- Minister of Energy and Mineral Resources. 2017. *Potensi Panas Bumi Jilid 1*. Jakarta: Ditjen EBTKE.
- Mohammad Husni. 2016. *Steam Field Design Overview of The Ulu Belu Geothermal Project* , Indonesia. Department of Engineering Science, the University of Auckland, 1-2.
- Olvera-García, E., Simbe, S., Mangahas, L., Marbello, A., Mandig, A., Alcantara, C. S., Ayling, B., Richards, M., Wilmarth, M., Lindsey, C., Halcon, R., & Fronda, A. (2024). Expert-driven geothermal play fairway analysis for low to medium temperature hidden systems in northwestern Luzon Island, Philippines. *Geothermics*, 123(July), 103130. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.103130>
- Pramana. Putra Aldo Febriansyah, Husein Salahuddin, 2016. Pull-Apart Basin of Sumatran Fault: Pekerjaan
- Putra Aldo Febriansyah, Husein Salahuddin. 2016. Pull-Apart Basin of Sumatran Fault: Pekerjaan Sebelumnya dan Perspektif Saat Ini . Prosiding , Seminar Nasional Kebumian ke-9. Peran Riset Ilmu Kebumian dalam Pemberdayaan Masyarakat 6-7 Oktober 2016; Grha Sabha Pramana.
- Panjaitan, S. (2010). Geologi Daerah Panas Bumi Ulubelu Tanggamus, Lampung Utara Berdasarkan Analisis Metode Magnetotellurik (Mt). *Jsdg*, 20(2), 69-91.
- Taide, V. Y., Sinharay, R. K., Chavan, H. K., & Dandge, D. B. (2024). Selection of suitable geothermometers for predicting the subsurface temperatures with higher accuracy: A study based on globally distributed geothermal field data. *Geothermics*, 122(July), 103088. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.103088>

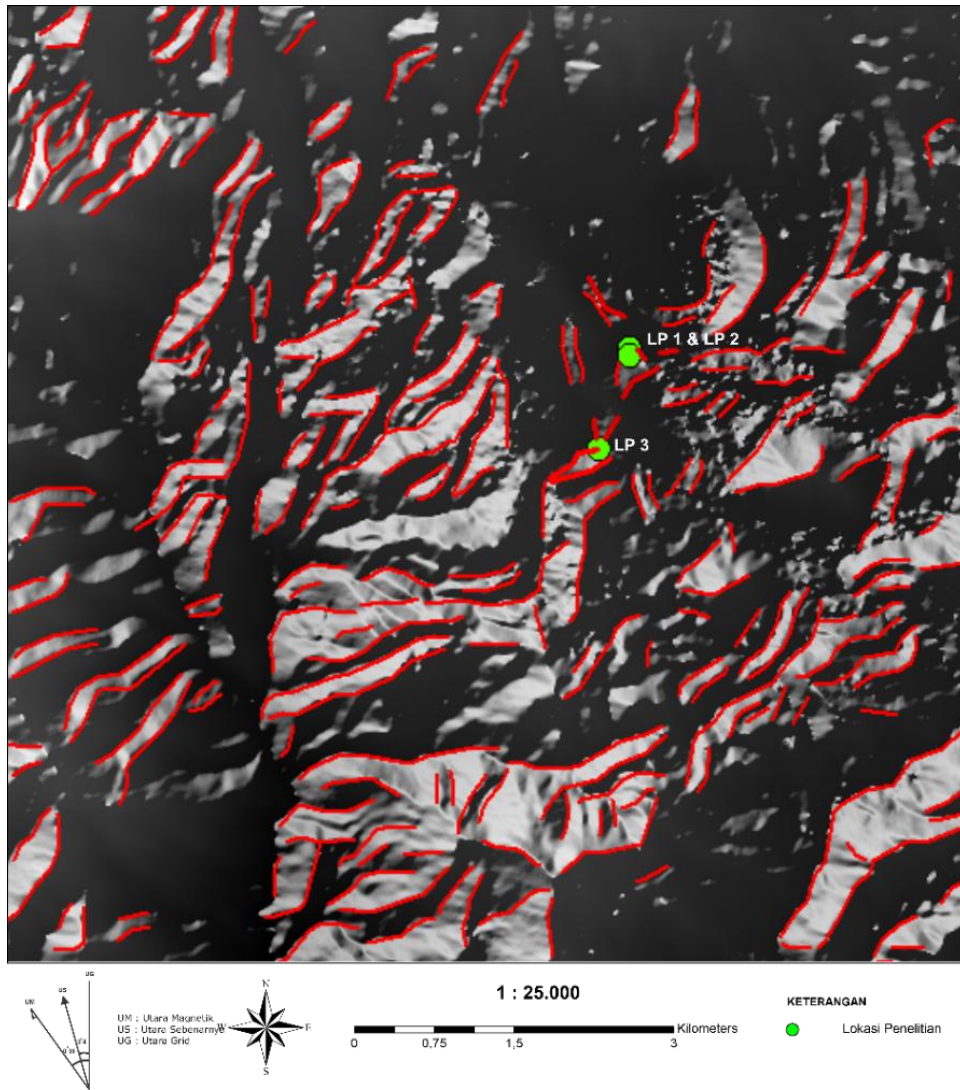
- Widyatmanti, W et al. 2016. Identifikasi Komposisi Elemen Topografi Berdasarkan Batas Bentuk Lahan dari Segmentasi Interferometri Radar (Studi Pendahuluan Pemetaan Bentuk Lahan Digital) . Konferensi dan Pameran Internasional IGRSM ke-8 tentang Penginderaan Jauh & GIS, 1-8.
- William et al. 2020. Karakteristik Geokimia Air Panas dan Perkiraan Temperatur Bawah Permukaan Panas Bumi Daerah Oma dan Telehu Kabupaten Maluku Tengah. *Padjajaran Geoscience Journal*, 1-5. Alfalah, J. A., Sutriyono, E., & Ibrahim, M. M. (2023). Karakteristik Geokimia Air Panas Dan Estimasi Suhu Permukaan Panas Bumi Di Daerah Suoh Kabupaten Lampung Barat Provinsi Lampung. *Jurnal Ilmiah Global Education*, 4(3), 1657-1668. <https://doi.org/10.55681/jige.v4i3.1167>
- Lolo, A., Patandean, C. F., & Ruslan, E. (2020). Karakterisasi Air Daerah Panas Bumi Pencong Dengan Metode Aas (Atomic Absorption Spectrophotometer) Di Kecamatan Biringbulu, Kabupaten Gowa Propinsi Sulawesi Selatan. *Jurnal Geoelebes*, 4(2), 102-110. <https://doi.org/10.20956/geoelebes.v4i2.8928>
- Panjaitan, S. (2010). Geologi Daerah Panas Bumi Ulubelu Tanggamus, Lampung Utara Berdasarkan Analisis Metode Magnetotellurik (Mt). *Jsdg*, 20(2), 69-91.
- William, T. S., Agus, H. D., Johanes, H., & Dewi, G. (2020). Karakteristik Geokimia Air Panas dan Perkiraan Temperatur Bawah Permukaan Panas Bumi Daerah Oma dan Tulehu Kabupaten Maluku Tengah. *Padjajaran Geoscience Journal*, 4(4), 338-348.



Gambar 1. Peta Indeks Lokasi Penelitian



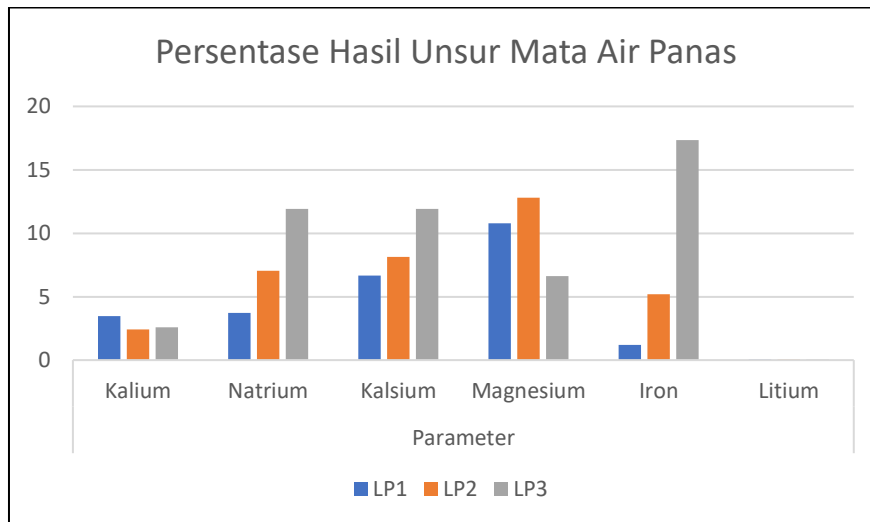
Gambar 2. Peta Mountage Lokasi penelitian



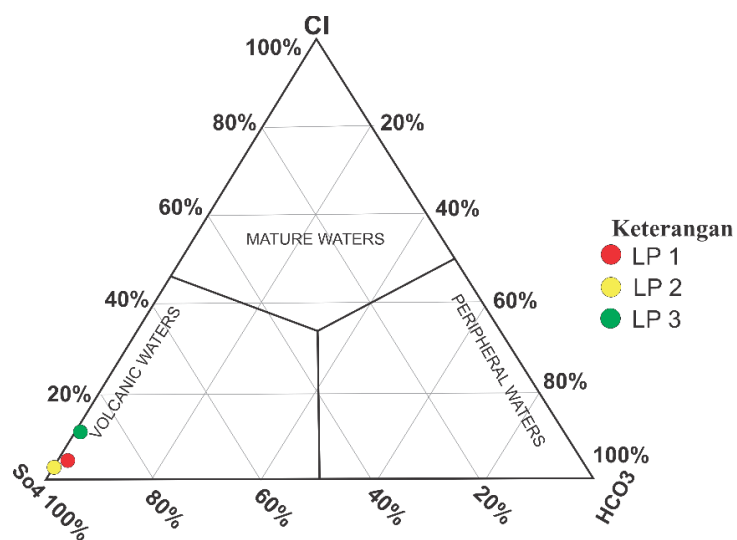
Gambar 3. Peta *Lineament* Daerah Ulu Belu



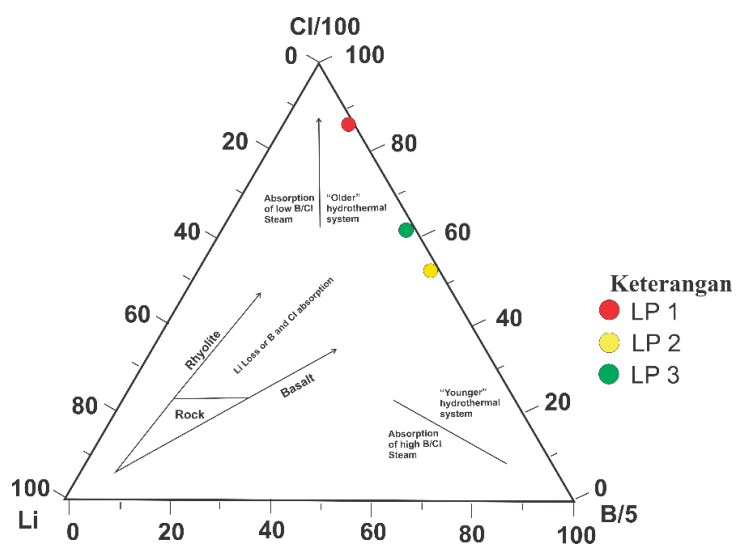
Gambar 4. Pengukuran manifestasi air panas pada lokasi pengamatan 2 (A dan B) dan pengamatan 3 (C dan D).



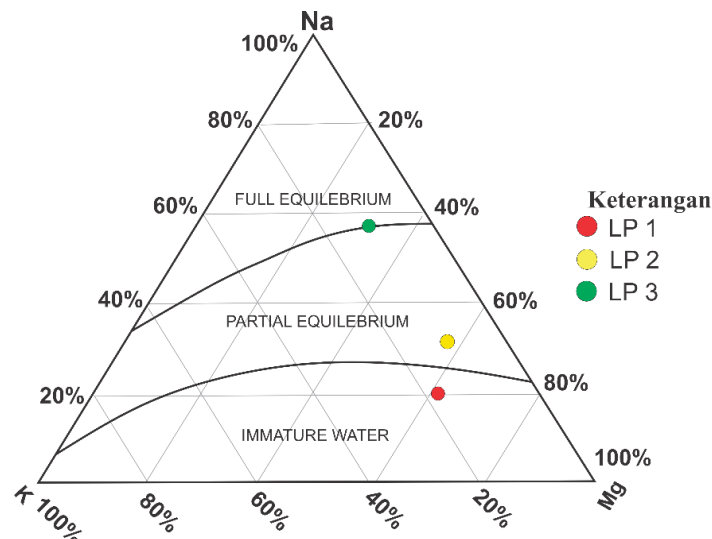
Gambar 5. Diagram Persentase Hasil Unsur Mata Air Panas



Gambar 6. Diagram Segitiga Sumber Air Panas Cl- SO₄- HCO₃



Gambar 7. Diagram Segitiga Sumber Air Panas Cl-Li-B



Gambar 8. Diagram Segitiga Sumber Air Panas Na, K, Mg

Tabel 1. Hasil Pengukuran pH dan Temperatur Air Panas .

LP	Koordinat		pH	Suhu
	X	Y		
1	452964	9411610	7,22	93,9 °C
2	452679	9410670	7,42	91,5 °C
3	449675	9410489	5,80	88,9 °C

Tabel 2. Hasil analisis laboratorium kandungan unsur-unsur mata air panas daerah penelitian.

Parameter	Satuan	Hasil Sampel		
		LP1	LP2	LP3
TDS	ppm	680	436	620
Kalium (K ⁺)	ppm	3,46	2,42	2,60
Natrium (Na ⁺)	ppm	3,73	7,05	11,93
Kalsium (Ca ²⁺)	ppm	6,66	8,15	11,90
Magnesium (Mg ²⁺)	ppm	10,80	12,79	6,64
Iron (Fe ³⁺)	ppm	1,22	5,18	17,35
Litium (Li ⁺)	ppm	0,0027	0,0027	0,0027

Tabel 3. Tabel hasil perhitungan persentase Cl- SO₄-HCO₃

Parameter	Satuan	Hasil Sampel		
		LP 1	LP 2	LP 3
HCO ₃ ⁻	ppm	0	0	0
SO ₄ ²⁻	ppm	321,36	157,64	195,65
Cl ⁻	ppm	1	1,2	0,49
Σ	ppm	322,36	158,84	196,14
HCO ₃ ⁻	ppm	0	0	0
SO ₄ ²⁻	ppm	99,7	99,2	99,8
Cl ⁻	ppm	0,3	0,8	0,2

Tabel 4. hasil perhitungan persentase Cl-Li-B.

Hasil Sampel	
--------------	--

Parameter	Satuan	LP 1	LP 2	LP 3
Cl	ppm	1	1,2	0,49
Li	ppm	0,0027	0,0027	0,0027
B	ppm	0,14	1,06	0,28
Σ	ppm	1,1427	2,2627	0,7727
Cl	ppm	87,5	53,0	63,4
Li	ppm	0,2	0,1	0,3
B	ppm	12,3	46,8	36,2

Tabel 5. Tabel hasil perhitungan persentase Na, K, Mg.

Hasil Sampel				
Parameter	Satuan	LP 1	LP 2	LP 3
Na	ppm	3,72	7,05	11,93
K	ppm	3,46	2,42	2,60
Mg	ppm	10,8	12,79	6,64
Σ	ppm	17,98	22,26	21,17
Na	ppm	20,7	31,7	31,7
K	ppm	19,2	10,9	12,3
Mg	ppm	60,1	57,5	31,4

Tabel 6. Tabel Hasil pengukuran suhu geothermometer K-Mg

Lokasi Penelitian	Temperatur Reservoir (°C)	Temperatur di Permukaan (°C)
1	54,59	93,9
2	60,26	91,5
3	52,48	88,9

Tabel 7. Tabel Hasil perhitungan suhu geothermometer Kuarsa

Geothermometer Kuarsa	
Suhu	T° C
93,9	106,6
91,5	105,1
88,9	103,3

Tabel 8. Tabel Hasil perhitungan suhu geothermometer Na-K

Lokasi Penelitian	Temperatur Reservoir (°C)
1	272,32
2	272,33
3	272,33