

**ASAL USUL FLUIDA MANIFESTASI PANAS BUMI
DAN ESTIMASI TEMPERATUR RESERVOIR DENGAN PENDEKATAN
ANALISIS ISOTOP PADA DAERAH DANAU RANAU,
OGAN KOMERING ULU (OKU) SELATAN, SUMATERA SELATAN****ORIGIN OF GEOTHERMAL MANIFESTATION FLUID AND DETERMINATION OF
RESERVOIR TEMPERATURE USING ISOTOPE ANALYSIS APPROACH
IN THE LAKE RANAU AREA,
SOUTH OGAN KOMERING ULU (OKU), SOUTH SUMATERA****Mochammad Malik Ibrahim, Harnani, Stevanus Nalendra Jati,
dan Rayhan Khairunnan Abiyyu**

Prodi Teknik Geologi, Universitas Sriwijaya, Sumatera Selatan, Indonesia

Email korespondensi: malikibrahim100@ft.unsri.ac.id

Diterima: 21 Februari 2024; Direvisi: 31 Mei 2024; Disetujui: 24 November 2024

DOI: <https://doi.org/10.47599/bsdg.v19i3.467>**ABSTRAK**

Potensi panas bumi Daerah Danau Ranau berasal dari sisa-sisa aktivitas magmatik dari Gunung Seminung. Manifestasi panas bumi di daerah ini berupa mata air panas yang diperkirakan muncul melalui struktur geologi. Keberadaan fluida manifestasi panas bumi sangat menarik untuk diteliti, khususnya terkait asal usul dan perkiraan temperatur reservoir dengan pendekatan komposisi isotop $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$. Asal usul fluida manifestasi penting diketahui untuk menentukan potensi sistem panas bumi dari fluida manifestasi permukaan terkait interaksi magmatik, evaporasi atau batuan. Metode penelitian ini menggunakan analisis isotop untuk menentukan asal usul fluida manifestasi panas bumi dan geotermometer isotop untuk memperkirakan temperatur reservoir. Pengambilan sampel isotop pada fluida manifestasi panas bumi di Desa Kota Batu sebanyak 3 sampel dan di Desa Lombok sebanyak 3 sampel. Hasil analisis isotop pada grafik hubungan antara $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ menunjukkan bahwa semua sampel isotop pada fluida manifestasi panas bumi berasal dari air meteorik. Persamaan nilai garis air meteorik lokal terdapat perbedaan pada nilai *deuterium excess* (DE) dibandingkan dengan persamaan nilai garis air meteorik global. Perubahan nilai DE ini diakibatkan adanya proses interaksi dan pencampuran (*mixing*) antara fluida panas bumi dan batuan (*connate water*) dengan sumber evaporasi dan presipitasi dari Danau Ranau. Hasil perhitungan geotermometer isotop berdasarkan faktor fraksinasi isotop, diperkirakan temperatur reservoir berkisar ± 270 °C. Perkiraan temperatur reservoir menunjukkan bahwa semua sampel isotop pada fluida manifestasi panas bumi tergolong dalam temperatur tinggi.

Kata kunci: Potensi Panas Bumi Danau Ranau, Manifestasi Panas Bumi, Analisis Isotop, Asal Usul Fluida Panas Bumi, Geotermometer Isotop

ABSTRACT

The geothermal potential of the Lake Ranau area comes from the remains of magmatic activity from Mount Seminung. The geothermal manifestation in this area is in the form of hot springs which are thought to arise through geological structures. The existence of geothermal fluid manifestations is very interesting to research, especially regarding the origin and estimation of reservoir temperature using the $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ isotope composition approach. It is important to know the origin of fluid manifestations to determine the potential of geothermal systems from surface manifestations fluid related to magmatic, evaporation or rock interactions. This research method uses isotope analysis to determine the origin of geothermal fluid manifestations and isotope geothermometer to estimate reservoir temperature. Isotope sampling in geothermal manifestation fluids in Kota Batu Village was 3 samples and Lombok Village was 3 samples. The results of isotope analysis on the relationship graph between $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ show that all isotope samples in geothermal manifestation fluids come from meteoric water. The local meteoric water line value equation has a difference in the deuterium excess (DE) value compared to the global meteoric water line value equation. This change in DE value is due to the interaction and mixing process between geothermal fluid and rock (connate water) with the source of evaporation and precipitation from Lake Ranau. The results of isotope geothermometer calculations based on the isotope fractionation factor, it is estimated that the reservoir temperature is around ± 270 °C. Reservoir temperature estimates show that all isotope samples in geothermal manifestation fluids are classified as high temperatures.

Keywords: Geothermal Potential of Lake Ranau, Geothermal Manifestation, Isotope Analysis, Origin of Geothermal Fluids, Isotope Geothermometer

PENDAHULUAN

Indonesia terletak pada pertemuan antara tiga lempeng besar yaitu lempeng Eurasia, Indo-Australia dan Pasifik sehingga menjadikan Indonesia memiliki tatanan tektonik yang kompleks. Pembentukan jalur gunung api Pasifik di sebagian wilayah Indonesia dan aktivitas tektonik dijadikan sebagai konseptual pembentukan sistem panas bumi Indonesia (Kasbani, 2009). Sistem panas bumi di Indonesia umumnya berupa sistem hidrotermal yang mempunyai temperatur tinggi (> 225 °C) (Saptadji, 2009).

Berdasarkan data Badan Geologi (2023), potensi panas bumi di Indonesia mencapai 23,765 GW dan tersebar 361 titik lokasi pada 30 provinsi. Data Tahun 2023 Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi terdapat 55 titik potensi sebesar 42% digolongkan sebagai sumber daya panas bumi temperatur tinggi, 71 titik potensi sebesar 54% sebagai sumber daya panas bumi temperatur menengah dan sisanya sebagai sumber daya panas bumi temperatur rendah. Menurut Ditjen EBTKE

tahun 2023, realisasi kapasitas terpasang pembangkit listrik EBT tahun 2023 mencapai 13.155 MWe atau 13,16 GW, diantaranya berasal PLTP panas bumi sebesar 2.417,7 MWe (KESDM, 2024).

Eksplorasi panas bumi di Indonesia dimulai pada tahun 1970 dengan tujuan untuk menemukan dan mengembangkan sistem panas bumi bertemperatur tinggi. Kegiatan eksplorasi menerapkan gabungan metode geologi, geokimia, dan geofisika secara rinci yang digabungkan untuk menaksir karakteristik lapangan saat penentuan sumur eksplorasi dalam menduga keberadaan reservoir bertemperatur tinggi. (Hochstein & Sudarman, 2008).

Potensi panas bumi daerah Danau Ranau berasal dari sisa-sisa aktivitas magmatik yang berasal dari Gunung Seminung. Aktivitas tektonik yang membentuk danau ini mengakibatkan hadirnya kekar-kekar di daerah tersebut. Daerah penelitian ditemukan Sesar Liwa yang merupakan sesar aktif pada rangkaian sistem Sesar Sumatera (Aribowo dkk, 2017).

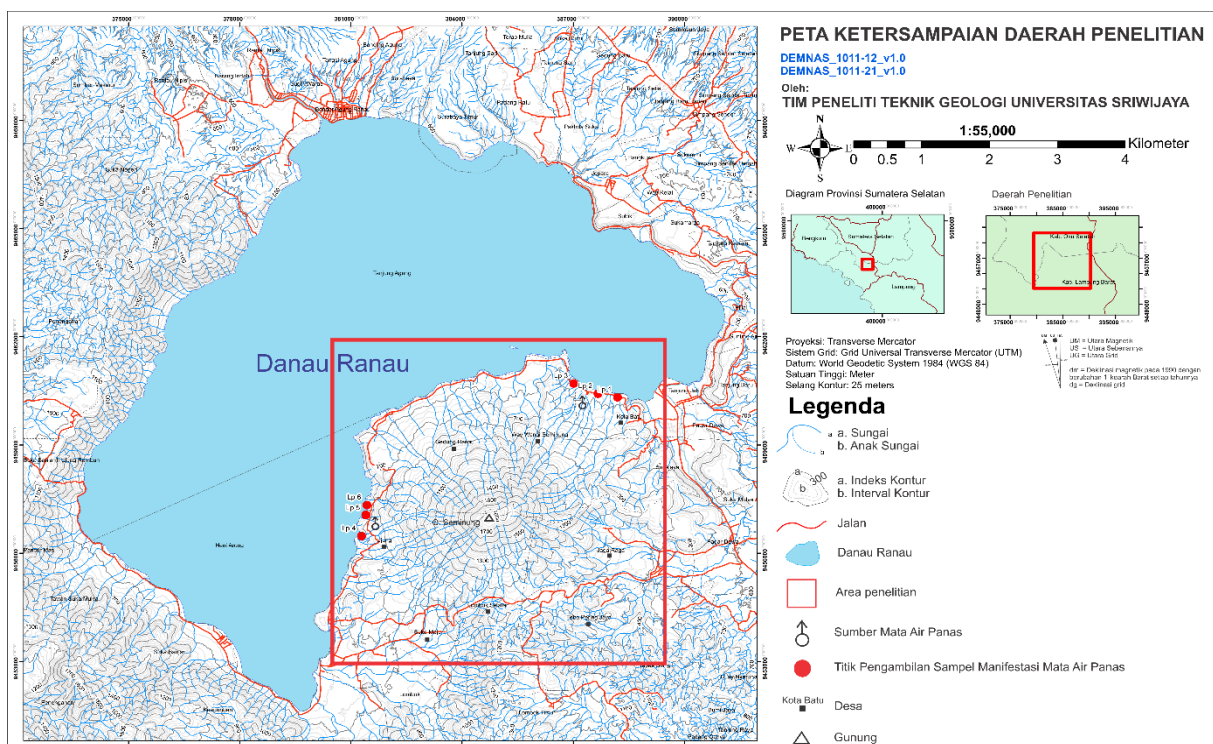
Lapangan panas bumi Danau Ranau merupakan salah satu prospek panas bumi di Indonesia. Manifestasi panas bumi di Danau Ranau terdiri dari delapan mata air panas dan dua batuan teralterasi. Semua mata air panas ini terletak di pinggir danau yaitu Lombok, Talang Kedu, Kota Batu, Kerincing, dan Wai Wangi (Wioso dkk, 2022).

Penelitian mengenai kajian isotop pada manifestasi fluida panas bumi sangat penting untuk melengkapi studi geokimia pada tahap eksplorasi potensi panas bumi di suatu daerah. Pendekatan isotop digunakan dengan tujuan untuk mengetahui asal usul fluida manifestasi panas bumi, seperti terkait interaksi dengan magmatik, evaporasi atau batuan (Hamed, 2014) dan menentukan temperatur reservoir dengan metode geotermometer isotop pada daerah panas bumi (Abidin dkk, 1996).

Asal-usul manifestasi fluida panas bumi pada lokasi penelitian dapat diketahui melalui pendekatan isotop, dengan cara mengukur komposisi isotop $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ dalam sampel air yang diambil (Meng dkk,

2015). Interaksi antara sumber panas dan air tanah dapat ditentukan berdasarkan grafik hubungan $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$, berasal dari pemanasan batuan atau ada pengaruh magma dari aktivitas gunung api. Metode geotermometer isotop dilakukan untuk mendapatkan temperatur reservoir berdasarkan perhitungan formula Mizutani & Rafter (1969).

Secara administratif daerah penelitian ini berada pada koordinat UTM 380000 mE – 392000 mE dan 9462000 mN - 9449200 mN, dengan luas area daratan sekitar 127 km² (Ibrahim dkk, 2022). Daerah penelitian panas bumi Danau Ranau memiliki luas sekitar 12 x 13 km² berada pada ketinggian 500 – 1800 m dari permukaan laut (Gambar 1). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui asal usul fluida manifestasi panas bumi dan menentukan perkiraan temperatur bawah permukaan (reservoir) berdasarkan pendekatan isotop pada daerah panas bumi Danau Ranau. Dengan latar belakang tersebut, penelitian kajian isotop pada manifestasi fluida panas bumi sangat penting dilakukan dan merupakan bagian dari studi potensi panas bumi, selain studi geologi dan geofisika.



Gambar 1. Peta lokasi daerah penelitian (modifikasi dari Ibrahim dkk, 2022)

Kondisi geologi Daerah Danau Ranau (Gambar 2), terbentuk dari deposit Kuartar dan Formasi batuan Tersier. Deposit Kuartar tersusun oleh aluvium, deposit Gunungapi Kukusan, deposit Gunungapi Seminung dan deposit Gunungapi Pugung. Urutan formasi batuan dari paling muda ke tua yang berumur Tersier tersusun oleh Formasi Ranau, Formasi Bal dan Formasi Hulusimpang (Ibrahim dkk, 2020). Kemunculan zona debit di permukaan ditandai dengan manifestasi permukaan yang keluar dari kontak litologi dan sesar yang terbentuk di sekitar Gunung Seminung yang terletak di wilayah Lombok dan Kota Batu (PSDG, 2004).

METODOLOGI

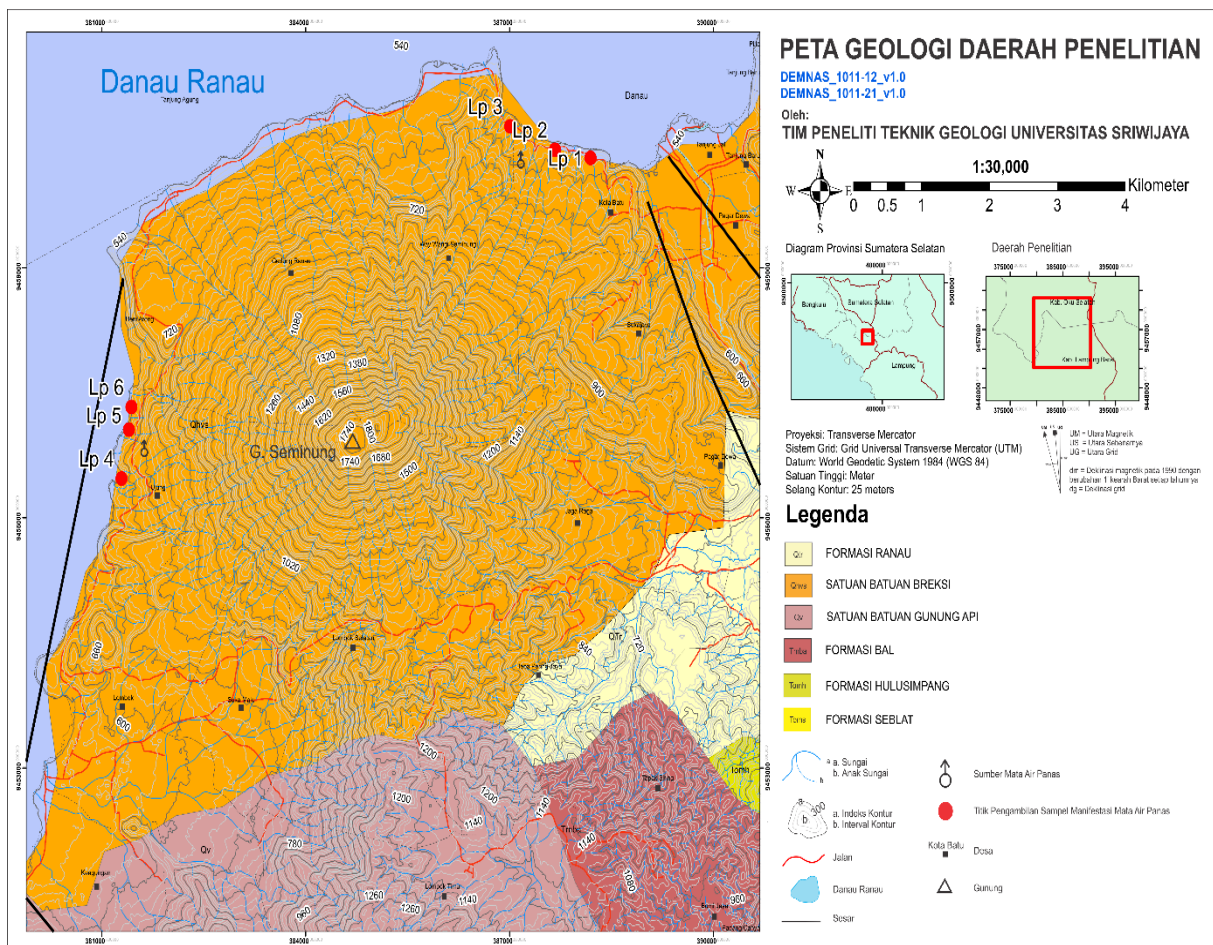
Metode yang digunakan pada penelitian ini meliputi peralatan dan pengambilan sampel, pengukuran nilai isotop, analisis

isotop dan geotermometer isotop.

Peralatan dan Pengambilan Sampel

Peralatan yang digunakan untuk pengambilan sampel adalah botol HDPE (*high density polyethylene*), kertas saring gayung dan corong (Gambar 3). Pengambilan sampel air dimasukkan ke dalam botol HDPE sebanyak 20 ml pada 6 titik lokasi manifestasi panas bumi daerah penelitian. Gelembung udara dalam botol harus dihindari untuk mencegah evaporasi dan meminimalisir fraksinasi isotop.

HDPE merupakan sejenis bahan plastik berkualitas yang digunakan untuk mencegah reaksi kimia dengan bahan yang ditampung di dalamnya. HDPE memiliki sifat bahan yang lebih kuat, keras, buram dan lebih tahan terhadap temperatur tinggi.



Gambar 2. Peta geologi daerah panas bumi Danau Ranau dan sekitarnya (modifikasi dari Ibrahim dkk, 2020)



Gambar 3. Peralatan yang digunakan dalam pengambilan sampel

Pengukuran Nilai Isotop

Pengolahan data dilakukan di laboratorium Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP) Bandung dengan metode *Cavity Ringdown Spectrometer* menggunakan alat Picarro L 2120-i. Hasil perhitungan analisis isotop mengacu pada standar internasional *SMOW (Standard Mean Ocean Water)* yang memiliki nilai sebesar 0 ‰ secara definitif (Aggarwal dkk, 2009). Hasil perhitungan isotop dinyatakan dalam rasio relatif delta (δ) pada persamaan (1) dan (2), sebagai berikut :

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{\text{RH}_2^{18}\text{O}_{\text{sampel}} - \text{RH}_2^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}}{\text{RH}_2^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}} \times 1000 \text{ ‰} \quad (1)$$

$$\delta^2\text{H} = \frac{\text{RH}^2\text{HO}_{\text{sampel}} - \text{RH}^2\text{HO}_{\text{SMOW}}}{\text{RH}^2\text{HO}_{\text{SMOW}}} \times 1000 \text{ ‰} \quad (2)$$

dimana $\text{RH}_2^{18}\text{O}_{\text{sampel}}$ dan $\text{RH}^2\text{HO}_{\text{sampel}}$ adalah kelimpahan molekul H_2^{18}O dan H^2HO dari sampel. $\text{RH}_2^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ dan $\text{RH}^2\text{HO}_{\text{SMOW}}$ adalah kelimpahan molekul H_2^{18}O dan H^2HO dari standar SMOW. $\delta^{18}\text{O}$ adalah kelimpahan ^{18}O sampel (kelimpahan relatif molekul H_2^{18}O dalam satuan ‰). $\delta^2\text{H}$ adalah kelimpahan ^2H

sampel (kelimpahan relatif molekul $\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$ dalam satuan ‰).

Analisis Isotop

Keuntungan dari penggunaan isotop $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ dibandingkan dengan perunut isotop lainnya yaitu komposisi isotop $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ air hujan yang menunjukkan hubungan linier antara $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ berupa garis meteorik global (*global meteoric water line*) (Delattre dkk, 2015). Air hujan atau air meteorik cenderung memiliki komposisi isotop $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ yang lebih ringan (*depleted*) pada daerah lintang yang lebih tinggi (Prada dkk, 2016). Fenomena ini juga terjadi saat kedua isotop tersebut bergerak jauh ke dalam daratan. Dengan alasan ini, hasil plot kedua isotop menghasilkan kemiringan yang sedikit berbeda dan dikenal dengan garis meteorik lokal (Delattre dkk, 2015).

Komposisi isotop $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ sampel air dapat menunjukkan proses fisik yang dialami dalam siklus hidrologi seperti evaporasi, pencampuran, maupun interaksi air-batuan. Proses fisik tersebut dapat diidentifikasi lebih mudah dengan menggunakan bantuan plot $\delta^{18}\text{O}$ terhadap $\delta^2\text{H}$ (Gambar 4).

Proses evaporasi permukaan membuat komposisi $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ menyimpang dari garis meteorik, membentuk garis yang lebih landai dengan *slope* sekitar 5. Sementara di daerah panas bumi dapat terjadi interaksi air–batuan pada temperatur tinggi mengakibatkan pengkayaan komposisi $\delta^{18}\text{O}$ air (*oxygen shift*), namun komposisi $\delta^2\text{H}$ relatif konstan karena mineral batuan sangat sedikit atau tidak mengandung hidrogen (Giggenbach, 1992). Demikian pula proses pencampuran (*mixing*) antara dua sumber air (*end members*) dapat ditunjukkan dengan jelas dalam grafik tersebut (Satrio dkk, 2020).

Geotermometer Isotop

Perhitungan geotermometer isotop berdasarkan data analisis kandungan $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ dalam fluida manifestasi panas bumi (Abidin dkk, 1996). Formula perhitungan geotermometer isotop menggunakan faktor fraksinasi (α) isotop menurut hasil eksperimen yang dikembangkan oleh Mizutani & Rafter (1969). Berikut ini formula perhitungan geotermometer isotop pada

persamaan (3) dan (4).

$$\alpha = \frac{1000 + \delta^{18}\text{O}}{1000 + \delta^2\text{H}} \quad (3)$$

$$1000 \ln \alpha = \frac{2,88 \times 10^6}{T^2} - 4,1 \quad (4)$$

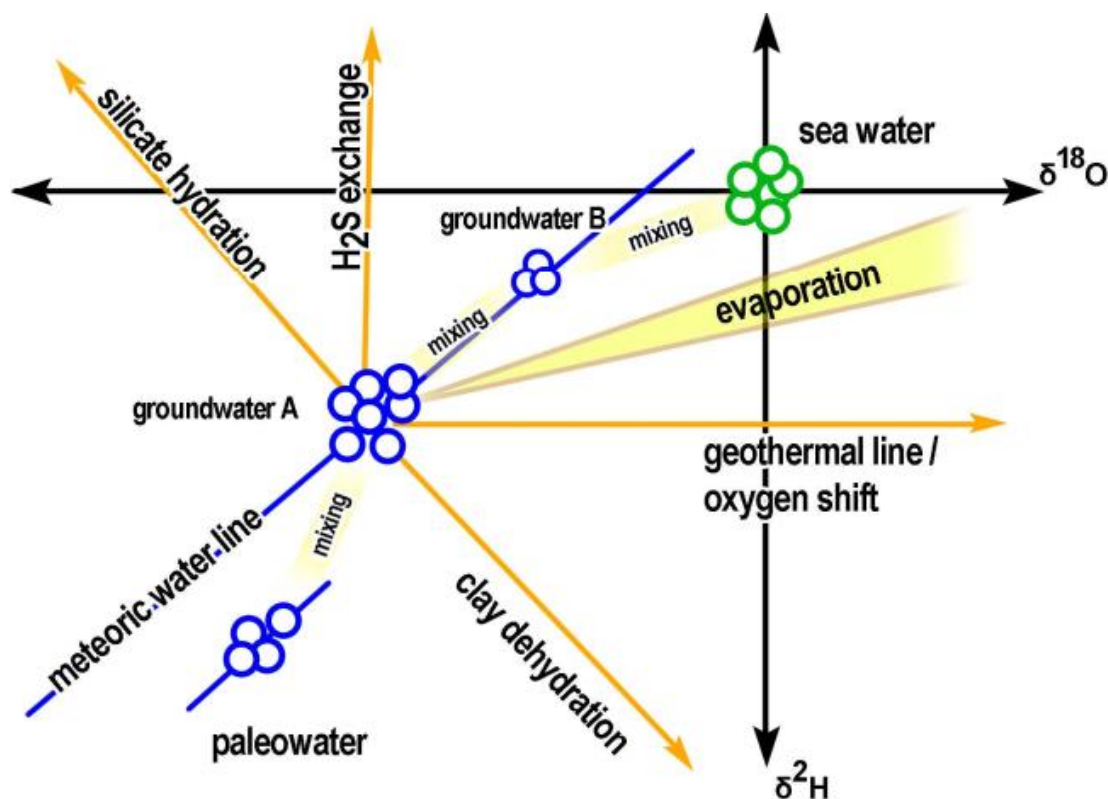
dimana, α adalah faktor fraksinasi dan T adalah temperatur reservoir dalam derajat Kelvin.

Klasifikasi Sistem Panas Bumi Berdasarkan Temperatur Reservoir

Klasifikasi sistem panas bumi berdasarkan temperatur reservoir menurut Hochstein (1990), terbagi menjadi tiga kategori (Tabel 1) sebagai berikut:

Tabel 1. Klasifikasi berdasarkan pada temperatur reservoir (Hochstein, 1990)

Klasifikasi Temperatur	Temperatur Reservoir ($^{\circ}\text{C}$)
Rendah	< 125
Menengah	125 – 225
Tinggi	> 225



Gambar 4. Tipikal grafik $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ dalam siklus hidrologi (Geyh, 2000)

HASIL

Hasil pengamatan di lapangan diketahui bahwa daerah Danau Ranau mempunyai 6 titik kemunculan manifestasi panas bumi akibat adanya struktur geologi berupa mata air panas (*hotsprings*). Deskripsi dan karakteristik pada manifestasi panas bumi dilakukan pengukuran temperatur dan pH pada semua 6 titik lokasi untuk diketahui karakteristik fluida pada manifestasi tersebut (Tabel 2).

Manifestasi panas bumi memiliki rentang nilai temperatur 49,2 – 58,3 °C dan nilai pH 6,3 – 6,8. Karakteristik fluida pada manifestasi panas bumi memiliki ciri fisik berupa kondisi jernih, air bergelembung, berbau belerang dan bersifat netral.

Pengambilan sampel isotop pada fluida manifestasi panas bumi di Desa Kota Batu sebanyak 3 sampel (LP-I, LP-II dan LP-III)

dan pengambilan sampel isotop pada fluida manifestasi panas bumi di Desa Lombok sebanyak 3 sampel (LP-IV, LP-V dan LP-VI) (Gambar 5). Hasil analisis isotop (Tabel 3) menunjukkan rentang komposisi isotop sampel berkisar -7,38 ‰ hingga -7,92 ‰ untuk $\delta^{18}\text{O}$ dan -45,29 ‰ hingga -48,00 ‰ untuk $\delta^2\text{H}$.

Tabel 2. Deskripsi fluida pada manifestasi panas bumi

No.	Kondisi	Temperatur (°C)	pH	Nama Desa
1.	Jernih	54,8	6,5	Kota Batu (1)
2.	Jernih	54,8	6,5	Kota Batu (2)
3.	Jernih	52,6	6,7	Kota Batu (3)
4.	Jernih	49,2	6,4	Lombok (1)
5.	Jernih	58,3	6,8	Lombok (2)
6.	Jernih	51,7	6,3	Lombok (3)



Gambar 5. Pengambilan sampel isotop

Tabel 3. Hasil analisis isotop $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ pada fluida manifestasi panas bumi

No.	Lokasi	Kode Sampel	Koordinat (UTM)		Parameter	
			Bujur (m)	Lintang (m)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
1.	Kota Batu (1)	LP – I	387381	9460559	-7,66	-46,56
2.	Kota Batu (2)	LP – II	387221	9460672	-7,92	-48,00
3.	Kota Batu (3)	LP – III	386960	9460895	-7,38	-47,72
4.	Lombok (1)	LP – IV	381140	9456019	-7,76	-46,90
5.	Lombok (2)	LP – V	381172	9456316	-7,84	-47,32
6.	Lombok (3)	LP – VI	381261	9457000	-7,40	-45,29

PEMBAHASAN

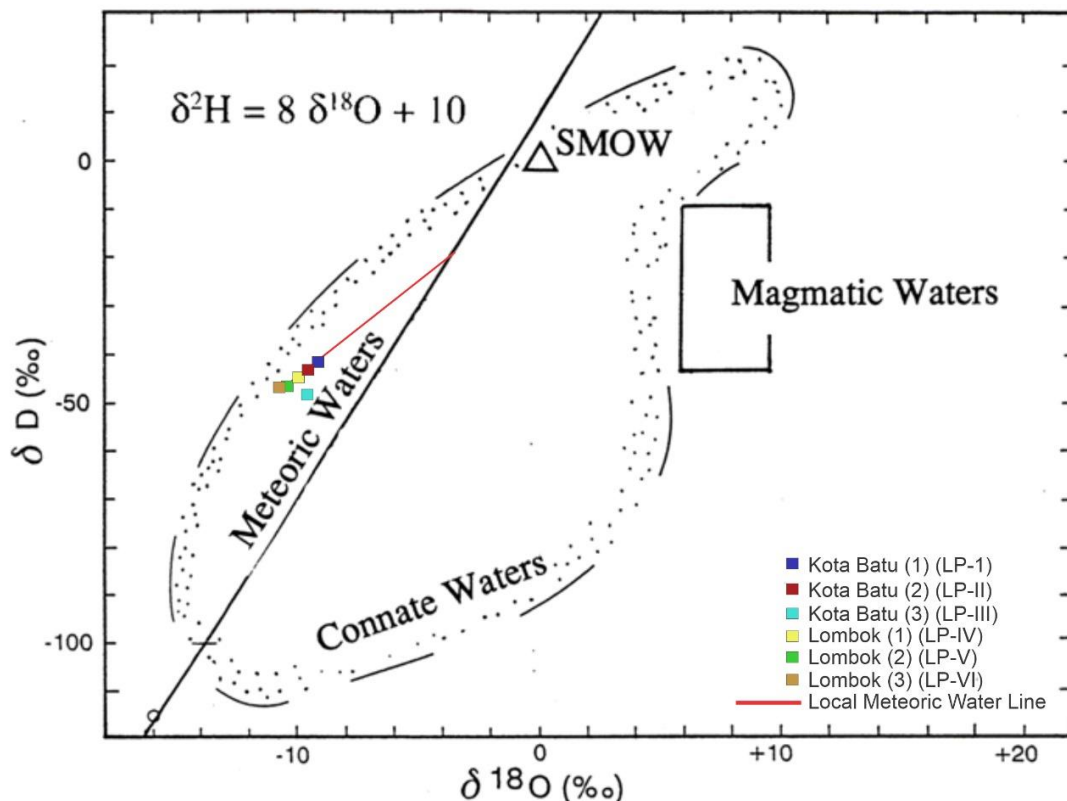
Berdasarkan data hasil analisis isotop dapat dibuat grafik hubungan antara $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ (Gambar 6). Grafik hubungan antara $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ menunjukkan bahwa semua sampel isotop berada pada posisi hampir linier terhadap garis air meteorik global (*global meteoric water line*), menandakan fluida manifestasi panas bumi daerah penelitian berasal dari air meteorik.

Perhitungan persamaan garis regresi linier menggunakan program *excel*, diperoleh persamaan garis air meteorik lokal daerah penelitian sebesar $\delta^2\text{H} = 2,150\delta^{18}\text{O} + 30,49$ dengan $R^2 = 0,25$. Persamaan garis air meteorik global sebesar $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ dengan $R^2 = 1$. Kedua persamaan tersebut terdapat perbedaan pada nilai *deuterium excess* (DE). Nilai DE garis air meteorik global sebesar 10, sedangkan nilai DE untuk garis air meteorik lokal pada daerah penelitian sebesar 30,49. Persamaan nilai garis air meteorik lokal lebih tinggi dibandingkan dengan persamaan nilai garis air meteorik global.

Perubahan nilai DE ini diakibatkan adanya proses interaksi dan pencampuran (*mixing*) antara fluida panas bumi dan batuan (*connate water*) dengan sumber evaporasi dan presipitasi dari Danau Ranau.

Perbedaan dari garis air meteorik lokal daerah penelitian dan garis air meteorik global terjadi karena perbedaan garis lintang dan geografis dari Danau Ranau tempat pengambilan sampel air.

Hasil perhitungan nilai faktor fraksinasi dan geotermometer isotop menggunakan formula dan referensi dari Mizutani & Rafter (1969). Perhitungan nilai faktor fraksinasi menggunakan persamaan (3) pada semua sampel isotop. Nilai faktor fraksinasi yang telah dihitung berkisar 1,039 - 1,042. Nilai faktor fraksinasi ini digunakan untuk menghitung geotermometer isotop $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ menggunakan persamaan (4). Berdasarkan hasil perhitungan geotermometer isotop, diperkirakan temperatur reservoir berkisar ± 270 OC pada semua sampel isotop (Tabel 4).



Gambar 6. Grafik isotop hubungan antara $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ daerah penelitian

Tabel 4. Hasil perhitungan geotermometer isotop $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ pada fluida manifestasi panas bumi menurut formula Mizutani & Rafter (1969)

No.	Lokasi	Kode Sampel	Fraksinasi (α)	Temperatur Reservoir ($^{\circ}\text{C}$)
1.	Kota Batu (1)	LP – I	1,041	269,961
2.	Kota Batu (2)	LP – II	1,042	270,030
3.	Kota Batu (3)	LP – III	1,042	270,043
4.	Lombok (1)	LP – IV	1,041	269,975
5.	Lombok (2)	LP – V	1,041	269,995
6.	Lombok (3)	LP – VI	1,039	269,900

Menurut Abidin dkk (1996), penggunaan geotermometer isotop menunjukkan hasil yang baik dalam menentukan tingginya temperatur reservoir dan saling mendukung dengan hasil geotermometer kimia. Faktor fraksinasi kesetimbangan isotop oksigen dan hidrogen antara cairan air dan uap air telah ditentukan secara tepat dari temperatur 25 hingga 350°C pada skala VSMOW-SLAP (*Vienna Standard Mean Ocean Water-Standard Light Antarctic Precipitation*) menurut Horita & Wesolowski (1994).

Perkiraan temperatur reservoir menunjukkan bahwa semua sampel isotop pada fluida manifestasi panas bumi tergolong dalam temperatur tinggi dan hampir tidak mengalami perubahan temperatur. Penggolongan temperatur tinggi pada temperatur reservoir berdasarkan klasifikasi dari Hochstein (1990).

Pada daerah penelitian sudah dilakukan penelitian tentang geoindikator oleh KESDM (2017). Hasil analisis kimia air menunjukkan bahwa manifestasi fluida panas bumi pada kondisi immature water atau belum mencapai kesetimbangan.

Hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa estimasi temperatur reservoir melalui analisis kimia air dan gas masih terbatas. Namun, penelitian Rera (2020) memperkirakan estimasi temperatur reservoir sebesar $200 - 269^{\circ}\text{C}$ berdasarkan geotermometer kimia pada mata air panas di desa Lombok dengan tipe air *dilute* sulfida-bikarbonat. Temuan ini didukung oleh simulasi model numerik yang dilakukan oleh Afiat (2020), yang memperkirakan temperatur reservoir serupa. Secara perhitungan statistik, nilai

rata-rata temperatur resevoir sebesar $269,984 \pm 40.39$ dengan tingkat kepercayaan 95%.

KESIMPULAN

Hasil analisis isotop pada daerah penelitian menunjukkan asal usul fluida manifestasi panas bumi berasal dari air meteorik. Hal ini terjadi proses interaksi dan pencampuran (*mixing*) antara fluida panas bumi dan batuan (*connate water*) serta evaporasi permukaan. Persamaan nilai garis air meteorik lokal lebih tinggi dibandingkan dengan persamaan nilai garis air meteorik global. Perubahan nilai akibat adanya proses interaksi dan pencampuran (*mixing*) antara fluida panas bumi dan batuan (*connate water*) dengan sumber evaporasi dan presipitasi dari Danau Ranau. Hasil perhitungan geotermometer isotop berdasarkan faktor fraksinasi isotop memiliki temperatur reservoir berkisar $\pm 270^{\circ}\text{C}$, tergolong potensi panas bumi dengan temperatur tinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Perangkat Desa Kota Batu, Desa Lombok dan mahasiswa Teknik Geologi Unsri yang turut terlibat di daerah penelitian. Semua penulis tidak memiliki konflik kepentingan (*conflict of interest*) pada publikasi artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

Abidin, Z., Wandowo, Indrojono, Djiono, Alip & Evarista, 1996, *Penentuan Temperatur Reservoir Panas Bumi Dengan Metode Geotermometer Isotop*, Aplikasi Isotop dan Radiasi.

- Afiat, Idianto, O., Rera, G.F., Wardoyo, G.K., Sutopo, Pratama, H.B. & Hamdani, M.R., 2020, Updated Conceptual Model and Resource Assessment using Numerical Reservoir Simulation of Danau Ranau Geothermal Field Indonesia, ITB International Geothermal Workshop 2020, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 732 (2021) 012027.
- Aggarwal, P., Groening, L., Kulkarni, K.M., Kurttas, T., Newman, B.D. & Tanweer, A., 2009, *Laser Spectroscopic Analysis of Liquid Water Samples for Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes*, IAEA Train. Course Ser. 35.
- Aribowo, S., Muslim, D., Winantris, Danny, H., Natawidjaja, Mudrik, R. & Daryono, 2017, *Sub-Segmentasi Sesar Pada Segmen Kumering Antara Danau Ranau Hingga Lembah Suoh, Lampung Barat*, *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, Vol. 8 No. 1 Hal 31 – 45.
- Badan Geologi, 2023, *Neraca Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panas Bumi Indonesia*, Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi, Badan Geologi, Bandung.
- Delattre, H., Vallet-Coulomb, C., & Sonzogni, C., 2015, *Deuterium Excess In The Atmospheric Water Vapor of A Mediterranean Coastal Wetland: Regional VS. Local Signatures*, *Atmospheric Chemistry and Physics*. 15, 10167–10181. <https://doi.org/10.5194/acp-15-10167-2015>
- Geyh, M., 2000, *Groundwater, Saturated and Unsaturated Zone*, In: Mook, W. G. (ed). *Environmental Isotopes in The Hydrological Cycle, Principles and Applications*. Technical Documents in Hydrology, Vol 4. No 39. UNESCO, Paris.
- Giggenbach, W.F., 1992, *Isotopic Shifts In Waters From Geothermal and Volcanic Systems Along Convergent Plate Boundaries and Their Origin*, *Earth Planet. Sci. Lett.* 113, 495–510.
- Hamed, Y., 2014, *Stable Isotope Ratios in Meteoric Waters in El Kef Region, Northwestern Tunisia: Implications for Changes of Moisture Sources*, *Journal of Earth Science and Climate Change* 05, 1–6. <https://doi.org/10.4172/21577617.1000203>
- Hochstein, M.P., 1990, *Classification and Assessment of Geothermal Resources*, In: Dockson M.H. and Fanelli M. (eds) *Small Geothermal Resources*, UNITAR/UNDP Centre for Small Energy Resources, Rome, Italy.
- Horita, J. & Wesolowski, D.J., 1994, Liquid-vapor fractionation of oxygen and hydrogen isotopes of water from the freezing to the critical temperature, *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol. 58 No. 16. [https://doi.org/10.1016/00167037\(94\)90096-5](https://doi.org/10.1016/00167037(94)90096-5)
- Ibrahim, M.M., Puspita, M., Andarini, D., Marbun, A.G. & Arifianto, D.I., 2020, *Identifikasi Dan Interpretasi Geologi Berdasarkan Citra Penginderaan Jauh Pada Daerah Panas Bumi Danau Ranau, Ogan Komering Ulu (OKU) Selatan, Sumatera Selatan*, *Prosiding Seminar Nasional Teknik Lingkungan Kebumihan Ke-II*, Vol 2, No 1.
- Ibrahim, M.M., Pranata, R., Nababan, B.S., Heriani, N., Maharani, A., Situmorang, A.S.J., Puspita, D., Landia, K. P. & Harfiandri, M.S., 2022, *Karakteristik Manifestasi Dan Rekomendasi Pemanfaatan Potensi Panas Bumi Pada Daerah Danau Ranau, Ogan Komering Ulu (OKU) Selatan, Provinsi Sumatera Selatan*, *Prosiding Seminar Nasional AVoER XIV*, Hal 87-91.
- Kasbani, 2009, *Tipe Sistem Panas Bumi Di Indonesia dan Estimasi Potensi Energinya*, *Buletin Sumber Daya Geologi*, 4 (3):23-30, Badan Geologi, Bandung.

- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM), 2017, *Potensi Panas Bumi Indonesia Jilid 1*, Jakarta : Direktorat Panas Bumi, Direktorat Jenderal EBTKE, Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panas Bumi, Badan Geologi.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM), 2019, Diskusi Peluang Pengembangan Panas Bumi Temperatur Menengah, *Direktorat Jenderal EBTKE*.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM), 2024, Kinerja Subsektor EBTKE 2023 dan Program 2024: Diversifikasi Produk BBN dan Peningkatan Kapasitas Pembangkit EBT, Siaran Pers, Nomor: 62.Pers/04/SJI/2024, *Direktorat Jenderal EBTKE*.
- Meng, Y., Liu, G. & Li, M., 2015, *Tracing The Sources and Processes of Groundwater in An Alpine Glacierized Region in Southwest China: Evidence from Environmental Isotopes*. *Water* 7, 2673–2690. <https://doi.org/10.3390/w7062673>
- Mizutani, Y. & Rafter, T.A, 1969, *Oxygen Isotopic Fractionation in Bisulphate Ion-Water System*, N.Z.J., *Sci.* 12 (54).
- Prada, S., Cruz, J.V., & Figueira, C., 2016, *Using Stable Isotopes To Characterize Groundwater Recharge Sources In The Volcanic Island Of Madeira, Portugal*, *Journal of Hydrology*.536, 409–425. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.009>
- Pusat Sumber Daya Mineral Batubara Panas Bumi, 2022, *Peta Potensi dan Distribusi Panas Bumi Indonesia*.
- PSDG, 2004, *Laporan Geologi, Geokimia dan Geofisika Terpadu Kawasan Panas Bumi Danau Ranau, Kabupaten Lampung Barat, Lampung – OKU Selatan, Sumatera Selatan*, Perpustakaan Subdirektorat Panas Bumi.
- Rera, G.F, 2020, *Studi Pre-Feasibility untuk Lapangan Geotermal Entalpi Medium pada Studi Kasus Lapangan Danau Ranau, Indonesia*, *Tesis*, Program Studi Magister Geotermal, Institut Teknologi Bandung.
- Saptadji, N.M., 2009, *Karakteristik Reservoir Panas Bumi*, Training Advanced Geothermal Reservoir Engineering, 6-7 Juli, Bandung, Indonesia.
- Satrio, Prasetio, R. & Sidauruk, P., 2020, *Karakteristik Isotop ¹⁸O dan ²H dari Beberapa Mataair Panas di Jawa Barat*, *Jurnal Riset Geologi dan Pertambangan*, Vol. 30, No.2, 229-240.
- Wioso, Y.B., Wulandari, Z. & Farhansyah, D., 2022, *Analyze Characteristic and Potential of Geothermal Energy in Danau Ranau, South Sumatera, Indonesia*, *Proceedings PIT IAGI 51st*, Makassar, South Sulawesi.