



KAJIAN HIDROGEOKIMIA PADA FENOMENA TRAVERTIN WISATA BANYU PANAS GEMPOL-PALIMANAN

YUNDHERA DANAZAHRA¹, MUHAMMAD I. MUSTHOFA¹, YAUMUN N. CHOTIMAH¹, HANIFA OCTAVIANI¹,
IRWAN ISKANDAR^{1*}

1. Program Studi Magister Teknik Air Tanah, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung (ITB),
Jl. Ganesha No.10, Bandung, Jawa Barat, Indonesia
*Korespondensi: irwan.iskandar.ii@gmail.com

Sari – Fenomena travertin yang berkembang di lokasi wisata Banyu Panas Gempol–Palimanan, Kabupaten Cirebon, terbentuk sebagai hasil aktivitas hidrotermal yang berkaitan dengan sistem panas bumi regional. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik hidrogeokimia air yang berperan dalam pembentukan travertin di daerah Palimanan. Metode yang digunakan meliputi analisis *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (ICP-MS), *Ion Chromatography* (IC), alkalinitas, serta isotop stabil air ($\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$). Hasil analisis menunjukkan bahwa sampel manifestasi utama (PL24-1, PL24-2, PL24-3, dan PL24-5) didominasi fasies Na–Cl pada Diagram Piper, yang mencirikan fluida kaya klorida dan merepresentasikan pengaruh sistem panas bumi. Sebaliknya, sampel PL24-4 berada pada fasies Ca–HCO₃, terpisah dari kluster manifestasi utama, dan diinterpretasikan sebagai air non-geotermal/air meteorik yang tidak merepresentasikan fluida geotermal. Analisis ternary plot Cl–Li–B menunjukkan bahwa sebagian besar manifestasi berasal dari satu sistem reservoir yang sama, sedangkan PL24-4 tidak dipengaruhi sistem panas bumi. Analisis isotop stabil mengindikasikan bahwa air panas tidak merepresentasikan air magmatik murni, melainkan merupakan hasil pencampuran antara air meteorik dan fluida hidrotermal, sementara PL24-4 dikategorikan sebagai air meteorik. Temuan ini menegaskan bahwa karakteristik hidrogeokimia air di daerah penelitian dikontrol oleh evolusi fluida sistem panas bumi dan proses pencampuran fluida.

Kata kunci: Geotermal, hidrogeokimia, *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (ICP-MS), *Ion Chromatography* (IC), alkalinitas, isotop stabil air.

Abstract – *Travertine deposits developed at the Banyu Panas Gempol–Palimanan geothermal tourism area, Cirebon Regency, are formed as a result of hydrothermal activity associated with the regional geothermal system. This study aims to analyze the hydrogeochemical characteristics of waters involved in travertine formation in the Palimanan area. The applied methods include Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS), Ion Chromatography (IC), alkalinity analysis, and stable water isotope analysis ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$). The results indicate that the main geothermal manifestations (PL24-1, PL24-2, PL24-3, and PL24-5) are dominated by the Na–Cl facies on the Piper diagram, reflecting chloride-rich fluids representative of the geothermal system. In contrast, sample PL24-4 plots in the Ca–HCO₃ facies and deviates from the main cluster, suggesting that it does not represent geothermal fluids and is more consistent with non-geothermal/meteoric water. The Cl–Li–B ternary plot shows that most geothermal manifestations originate from a single reservoir system, whereas PL24-4 is not influenced by the geothermal system. Stable isotope analysis indicates that the hot spring waters do not represent pure magmatic water but result from mixing between meteoric water and hydrothermal fluids, while PL24-4 is classified as meteoric water. These findings highlight that the hydrogeochemical characteristics of waters in the study area are controlled by geothermal fluid evolution and fluid mixing processes.*

Key words: Geothermal, hydrogeochemistry, *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (ICP-MS), *Ion Chromatography* (IC), alkalinity, stable water isotope

1. PENDAHULUAN

Fenomena geotermal merupakan salah satu manifestasi aktivitas vulkanik yang tersebar di wilayah-wilayah dengan potensi tektonik dan vulkanik tinggi. Indonesia, sebagai salah satu negara yang terletak pada jalur Cincin Api Pasifik, memiliki banyak sistem hidrotermal yang menghasilkan berbagai fenomena geologi unik, seperti sumber air panas, geysir, dan endapan mineral. Salah satu fenomena yang sering

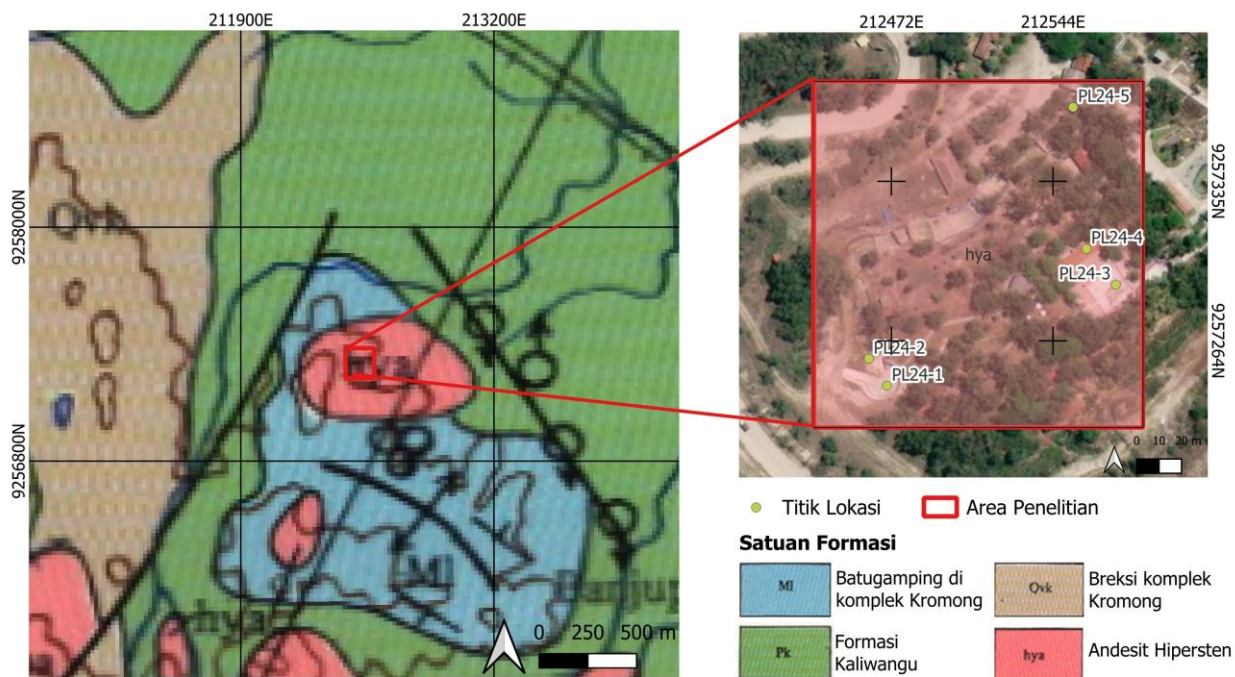
ditemukan pada sistem hidrotermal adalah pembentukan travertin, yaitu batuan karbonat (Djuri, 1973) seperti pada **Gambar 1** yang terbentuk dari presipitasi kalsium karbonat akibat interaksi air panas dengan batuan di sekitarnya (Firdaus dkk., 2021). Travertin tidak hanya menjadi objek penelitian geologi dan hidrogeokimia, tetapi juga memiliki nilai ekowisata yang tinggi. Di berbagai tempat di dunia, travertin sering dijadikan daya tarik

wisata alam karena bentuknya yang unik dan proses pembentukannya yang menarik untuk dipelajari. Secara ilmiah, keberadaan travertin memberikan informasi penting mengenai dinamika bawah permukaan, seperti karakteristik sistem hidrotermal, sumber air panas, dan potensi vulkanisme (Chafetz, dkk., 1984).

Menurut Pentecost (2005), traverti merupakan bagian dari batuan sedimen karbonat terrestrial atau darat yang dibentuk oleh pengendapan atau presipitasi mineral karbonat dari larutan dalam tanah dan permukaan air, dan atau secara pemanasan dari mata air panas. Studi di Jawa Barat, khususnya pada lapangan geotermal Cisolok dan Ciseeng, menunjukkan bahwa travertin ini terutama terdiri atas kalsit dan karbonat mikrokristalin (Kurniadi, dkk., 2021). Tidak adanya mineral aragonit dalam endapan tersebut mengindikasikan bahwa sistem geotermal yang terlibat memiliki suhu rendah hingga menengah geothermal (Kurniadi dkk., 2021). Di Cisolok, evolusi dari sinter silika menjadi travertin bikarbonat menunjukkan adanya penurunan suhu secara bertahap akibat interaksi antara fluida reservoir dengan batu gamping pada kedalaman 350-600 meter (Gleamen dkk., 2019).

Fenomena pembentukan travertin juga ditemukan di wilayah Indonesia lainnya, seperti Barasanga di Sulawesi Tenggara, yang diklasifikasikan sebagai Incoherent Travertines (Umar dan Jamaluddin, 2018).

Fenomena travertin yang ditemukan di lokasi wisata Banyu Panas Gempol-Palimanan, Kabupaten Cirebon, merupakan salah satu contoh manifestasi geotermal yang menarik untuk diteliti. Travertin di lokasi ini terbentuk akibat aktivitas hidrotermal yang kemungkinan besar dipengaruhi oleh sistem gunung api di sekitarnya. Gunung Ciremai, sebagai salah satu gunung api aktif terdekat, diduga memiliki hubungan dengan sumber air panas tersebut melalui sistem hidrotermal yang kompleks. Namun, hingga saat ini, belum banyak kajian yang secara spesifik membahas karakteristik hidrogeokimia dan hubungan fenomena travertin di Banyu Panas Gempol-Palimanan dengan aktivitas sistem gunung api di sekitarnya. Kajian ini penting dilakukan untuk menganalisis karakteristik hidrogeokimia pada fenomena travertin di Banyu Panas Palimanan guna memahami proses pembentukannya.



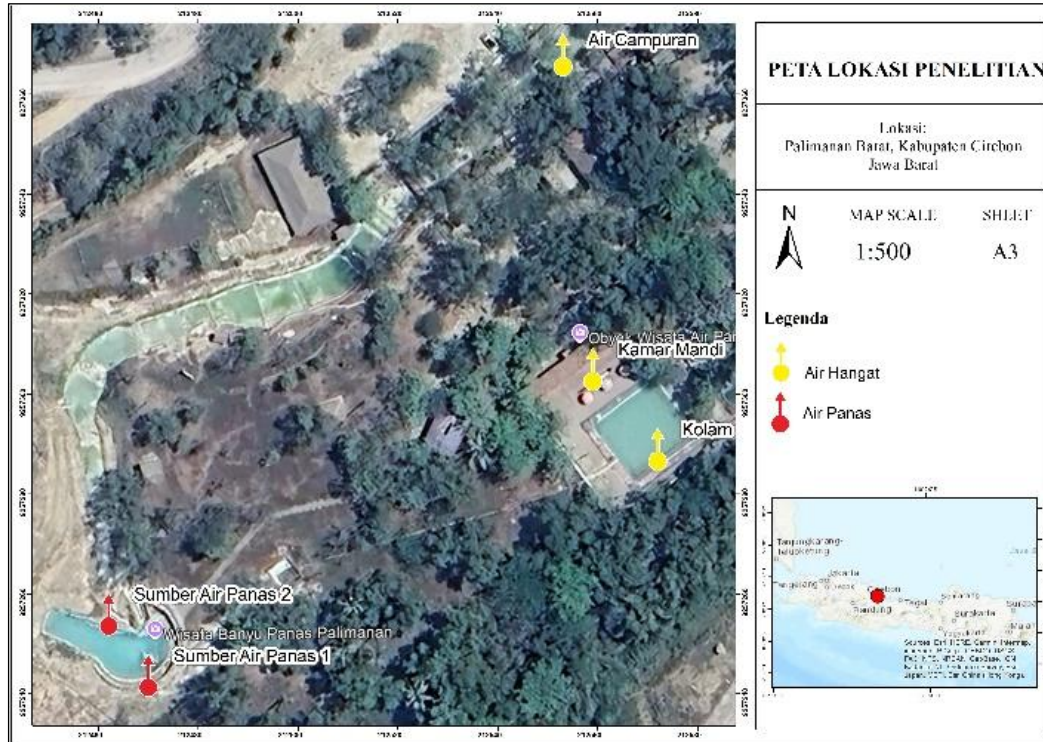
Gambar 1 Geologi Regional Lokasi Penelitian

2. DATA DAN METODE PENELITIAN

2.1. Data

Penelitian ini dilakukan melalui pengambilan sampel dari lima lokasi berupa sedimen dan air yang mewakili beberapa tipe sumber, yaitu air yang

berasal langsung dari sumber panas bumi, air panas yang telah mengalami transportasi, air kolam panas, air kamar mandi, serta air pada zona percampuran (**Gambar 2** dan **Tabel 1**).



Gambar 2 Lokasi Penelitian

Sebaran titik koordinat lokasi pengambilan sampel air di pemandian air panas Gempol-Palimanan sebagai berikut (Tabel 1).

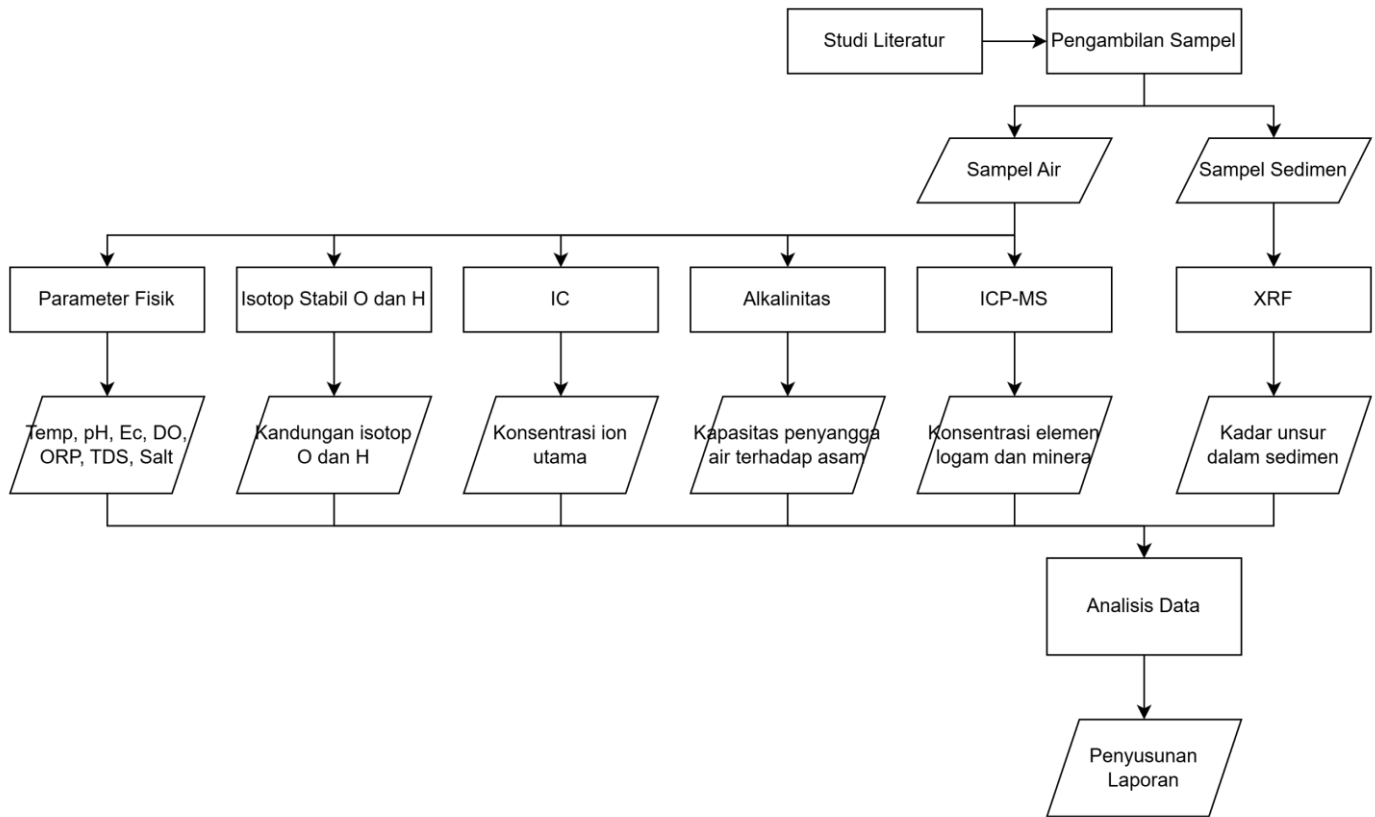
Tabel 1 Titik koordinat pengambilan sampel air

Titik Lokasi	X	Y	Z	Keterangan
PL24-1	212470	9257244	42	Sumber Air Panas 1
PL24-2	212462	9257256	40	Sumber Air Panas 2
PL24-3	212572	9257289	37	Kolam
PL24-4	212559	9257305	37	Kamar Mandi
PL24-5	212553	9257368	35	Air Campuran

2.2. Metode

Tahapan penelitian secara keseluruhan dirangkum dalam diagram alir penelitian yang disajikan pada **Gambar 3**. Pengambilan sampel sedimen dilakukan secara langsung di lapangan dan ditiriskan dari air bebas sebelum dianalisis. Sampel air diambil pada titik koordinat yang telah ditentukan menggunakan peralatan yang telah disterilkan untuk mencegah

kontaminasi, kemudian parameter fisika air meliputi suhu, pH, konduktivitas, dan salinitas diukur secara in situ menggunakan Water Quality Meter (WQM). Sampel air selanjutnya dipisahkan untuk analisis isotop stabil, unsur terlarut, dan alkalinitas, dengan perlakuan filtrasi dan pengasaman mengikuti standar analisis air alami (APHA, 2017).



Gambar 3 Diagram Alir Penelitian

Analisis laboratorium terhadap sedimen dilakukan menggunakan metode X-ray Fluorescence (XRF) untuk menentukan komposisi unsur penyusun sedimen (Rollinson, 1993). Sampel air dianalisis menggunakan Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS), ion chromatography, analisis alkalinitas, serta analisis isotop stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ untuk mengidentifikasi karakteristik kimia air, asal fluida, dan proses pencampuran. Kualitas data kimia air dievaluasi melalui perhitungan keseimbangan ion dengan batas kesalahan kurang

dari $\pm 5\%$ (Freeze dan Cherry, 1979), sedangkan interpretasi hidrogeokimia dan isotop dilakukan menggunakan diagram klasifikasi serta perbandingan terhadap Global Meteoric Water Line (Craig, 1961).

3. DATA DAN PENGOLAHAN

3.1 Karakteristik Sifat Fisik

Dari hasil uji parameter fisik dengan *water quality meter* (WQM) secara insitu didapat hasil sebagai berikut (Tabel 2)

Tabel 2 Karakteristik sifat fisik

Data Lapangan	Unit	PL24-1	PL24-2	PL24-3	PL24-4	PL24-5
Temperatur	°C	54,1	48,9	38,2	32	34,8
pH		6,81	7,45	7,48	7,8	7,23
Eh	mV	321	23	382	102	89
TDS	Ppm	1111	6030	959	1138	891
Salinitas	%	0,95	0,51	0,8	0	0,7
DO	mg/L	1,1	4,7	1,3	4,3	2

3.2 Ion Chromatography (IC)

Hasil uji ion utama diperoleh dari Ion Chromatography (IC) untuk anion–kation terlarut. Konsentrasi bikarbonat (HCO_3^-) tidak diukur langsung oleh IC dan dihitung dari hasil alkalinitas

(sebagai CaCO_3) pada Subbab 3.3. Parameter yang berada di bawah batas deteksi dilaporkan sebagai <DL, dengan rincian sebagai berikut (**Tabel 3**):

Tabel 3 Komposisi ion utama

Kode Sampel		PL24-1	PL24-2	PL24-3	PL24-4	PL24-5
Konsentrasi Anion (ppm)	F ⁻	-6,708	-6,773	-6,799	-7,917	-6,825
	Cl ⁻	3507,530	3481,803	3532,087	4,667	3375,164
	NO ³⁻	<DL	<DL	<DL	4,433	4,589
	SO ₄ ²⁻	15,171	18,733	9,230	-2,938	16,939
	HCO ₃ ⁻ (hasil perhitungan dari alkalinitas sebagai CaCO ₃ ; lihat Subbab 3.4)	1165,100	966,240	1049,200	136,640	863,76
Konsentrasi Kation (ppm)	Na ⁺	2261,974	2245,438	2276,976	9,542	2172,456
	K ⁺	139,633	138,216	139,971	3,133	134,147
	Ca ²⁺	199,784	144,794	151,034	57,460	122,291
	Mg ²⁺	46,943	47,086	47,814	12,779	45,331
	Li ²⁺	2,002	1,963	2,002	<DL	1,872
Σ Kation (meq)		116,086	112,593	114,386	4,414	108,033
Σ Anion (meq)		114,916	111,593	113,928	1,967	107,1702
Ion Balance (%)		0,970	0,817	1,142	30,105	0,776114

3.3 Alkalinitas

Hasil uji alkalinitas dinyatakan sebagai konsentrasi ekuivalen kalsium karbonat (CaCO_3) dalam satuan ppm. Untuk keperluan interpretasi hidrogeokimia dan penyajian data pada Diagram Piper, nilai alkalinitas tersebut dikonversi menjadi konsentrasi ion bikarbonat (HCO_3^-) dengan menggunakan hubungan stoikiometri berdasarkan kesetaraan ekuivalen karbonat dalam sistem air alami. Konversi alkalinitas CaCO_3 menjadi HCO_3^- dilakukan menggunakan faktor konversi berdasarkan massa

molar CaCO_3 (100 g/mol) dan HCO_3^- (61 g/mol), sehingga diperoleh hubungan sebagai berikut:

$$\text{HCO}_3^- \text{ (ppm)} = \text{CaCO}_3 \text{ (ppm)} \times \frac{122}{100}$$

Konversi ini merepresentasikan perubahan satuan alkalinitas ke dalam bentuk spesies dominan sistem karbonat pada kondisi pH netral hingga sedikit basa, di mana ion bikarbonat (HCO_3^-) merupakan bentuk karbonat yang paling stabil. Hasil perhitungan konsentrasi HCO_3^- selanjutnya disajikan pada **Tabel 4**.

Tabel 4 Alkalinitas

Kode Sampel	CaCO ₃	HCO ₃ ⁻
	ppm	ppm
PL24-1	955	1.165,1
PL24-2	792	966,24
PL24-3	860	1.049,2
PL24-4	112	136,64
PL24-5	708	863,76

3.4 Ternary

3.4.1 Data Cl – Li - B

Dari hasil uji ICP-MS pada sampel air didapat hasil data Cl - Li – B sebagai berikut (**Tabel 5**).

Tabel 5 Data Cl – Li – B

Titik Sampel	Cl	Li	B
PL24-1	269,810	0,456	2,978
PL24-2	267,831	0,455	2,959
PL24-3	271,699	0,513	3,248
PL24-4	0,359	0,003	0,058
PL24-5	259,628	0,478	3,035

3.4.2 Data Ca – Mg - Fe

Dari hasil uji XRF pada sampel air didapat hasil data Ca – Mg - Fe sebagai berikut (**Tabel 6**).

Tabel 6 Data hasil uji XRF

Titik Sampel	CaCO ₃	MgCO ₃	FeCO ₃
	Mass%		
PL24-1	91.954	1.191	0.526
PL24-5	87.872	0.988	1.838

3.5 Isotop Stabil

Dari hasil uji isotop stabil pada sampel air didapat hasil sebagai berikut (**Tabel 7**).

Tabel 7 Isotop stabil air

Titik Lokasi	$\delta^{18}O$ (‰)	δ^2H (‰)
PL24-1	-4,732 ± 0,005	-44,772 ± 0,027
PL24-2	-4,811 ± 0,076	-46,882 ± 0,098
PL24-3	-3,662 ± 0,062	-41,323 ± 0,088
PL24-4	-8,834 ± 0,057	-56,429 ± 0,039
PL24-5	-3,555 ± 0,050	-36,842 ± 0,047

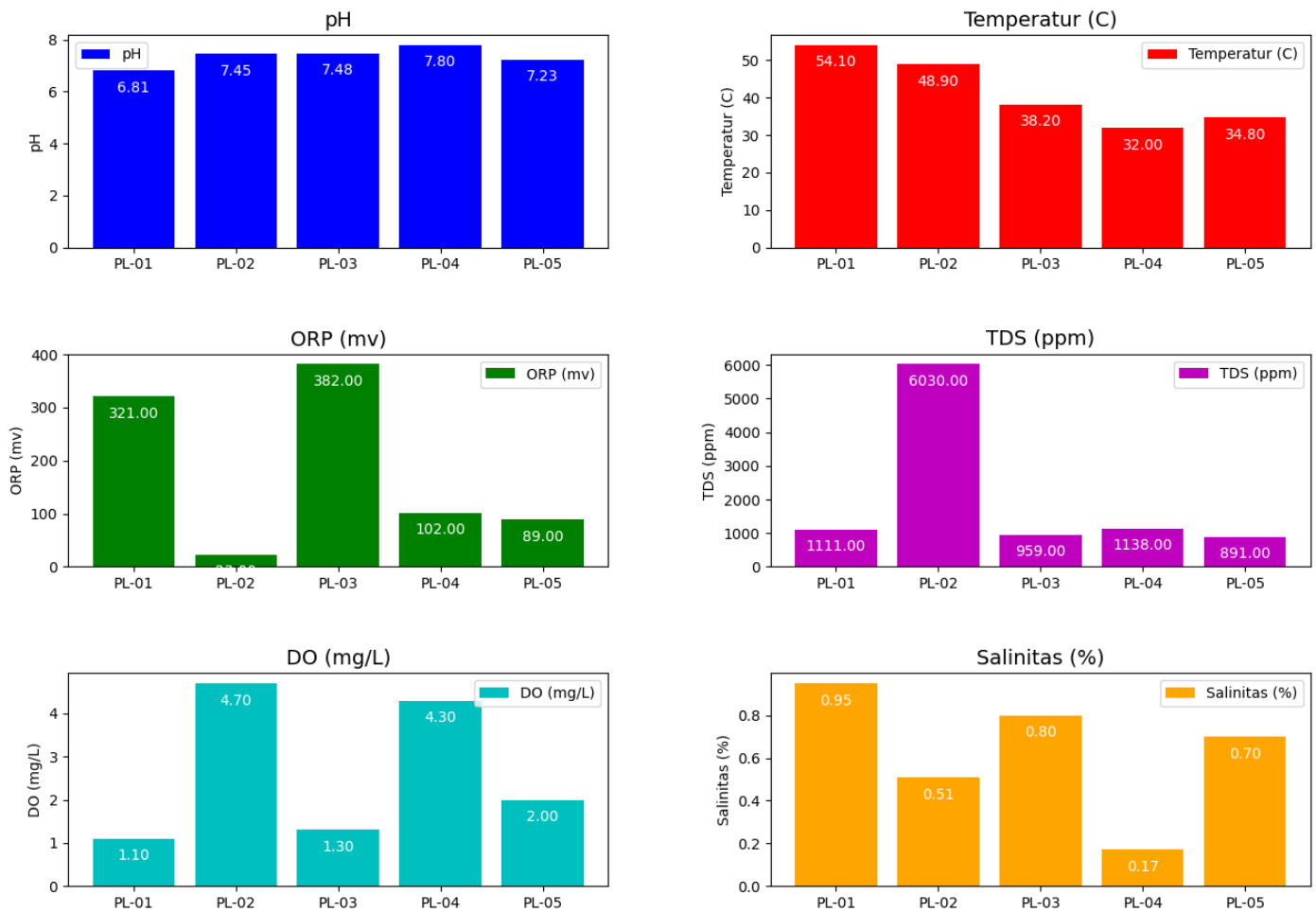
4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakter Fisik dan Kimia

Titik PL24-1 menunjukkan karakteristik sumber air panas utama dengan suhu tertinggi (54,1°C) dan pH 6,81, mencerminkan sifat *slightly acid* dari sumber air panas. Nilai TDS yang cukup tinggi (1111 ppm) dan salinitas 0,95% mengindikasikan konsentrasi ion yang tinggi akibat pengaruh mineral dari sumber panas. DO yang rendah (1,1 mg/L) mendukung kondisi minim oksigen pada air bersuhu tinggi. Pada PL24-2, suhu menurun menjadi 48,9°C karena aliran telah mengalami perpindahan dari sumber panas utama. Penurunan suhu ini memungkinkan pH naik (Veysey dkk.,

2008) menjadi 7,45, mendekati netral. TDS yang sangat tinggi (6030 ppm) mengindikasikan penambahan mineral saat aliran bergerak lebih jauh dari sumber panas. Kenaikan DO menjadi 4,7 mg/L mencerminkan peningkatan kontak air dengan udara. Titik PL24-3 (kolam) mencatat suhu yang lebih rendah (38,2°C) akibat pencampuran dengan air dingin, yang juga menyebabkan pH sedikit meningkat menjadi 7,48. Nilai ORP tinggi sebesar 382 mV, mengindikasikan oksidasi yang tinggi. Penurunan TDS ke 959 ppm, salinitas ke 0,8%, dan DO yang rendah hanya 1.3 mg/L seperti pada **Gambar 4**.

Sifat Fisik Sampel Air pada Fenomena Travertin - Palimanan



Gambar 4 Diagram karakteristik sifat fisik

Pada PL24-4 (kamar mandi), suhu lebih rendah (32°C) dan pH mencapai 7,80. Penurunan ORP menjadi 102 mV menunjukkan bahwa reaksi oksidasi yang kecil. Nilai TDS yang kembali meningkat menjadi 1138 ppm dan salinitas yang terbaca sangat rendah (mendekati 0 pada WQM) mengindikasikan kadar garam terlarut yang rendah atau berada di bawah batas deteksi alat, konsisten dengan karakter air non-geotermal. DO tinggi 4,3 mg/L. Pada titik PL24-5 (air campuran), suhu stabil di 34,8°C dengan pH 7,23. Nilai TDS (891 ppm) dan salinitas (0,7%) tetap rendah, mencerminkan

4.2 Karakteristik Hidrogeokimia Air

Berdasarkan hasil analisis ion utama (IC) yang dikombinasikan dengan HCO₃⁻ hasil konversi alkalinitas, perhitungan kesetimbangan ion (ion balance, IB) pada sebagian besar sampel manifestasi

kondisi air campuran yang tidak lagi terpengaruh oleh sumber panas secara langsung. DO 2 mg/L, menunjukkan adanya sedikit pencampuran dengan udara, akan tetapi tidak sebesar PL24-2. Suhu tinggi pada titik PL24-1 hingga PL24-2 dipengaruhi oleh keberadaan sumber panas di utara Gunung Kromong, yang kemungkinan menjadi sumber energi geotermal. Nilai pH, TDS, dan salinitas menunjukkan perubahan bertahap akibat pencampuran air panas dengan air dingin serta reaksi kimia selama perjalanan air.

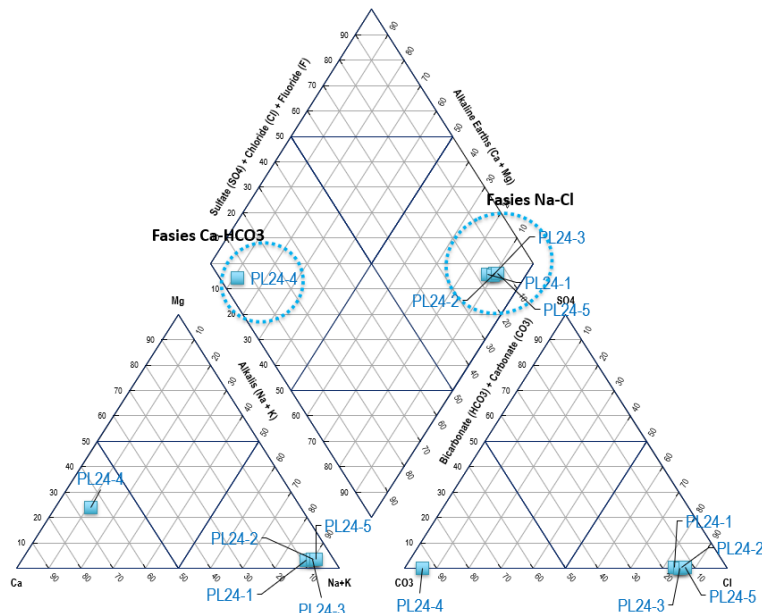
menunjukkan nilai IB < 5%, sehingga data kimia air dapat dianggap andal untuk interpretasi hidrogeokimia (Nicholson, 1993). Pengecualian terjadi pada sampel PL24-4, yang memiliki nilai ketidakseimbangan ion lebih besar dibandingkan sampel lainnya. Sampel PL24-4 menunjukkan

jumlah kation yang jauh lebih tinggi dibandingkan anionnya, dengan kandungan ion klorida, sulfat, dan bikarbonat yang berbeda dari manifestasi lain. Kondisi ini diduga berkaitan dengan sumber air PL24-4 yang berasal dari air kamar mandi (air dingin), sehingga tidak mengalami proses hidrogeokimia yang sama dengan manifestasi air panas lainnya, khususnya interaksi fluida–batuan di zona sistem panas bumi. Oleh karena itu, nilai ketidakseimbangan ion yang relatif tinggi pada sampel ini dianggap wajar dan tidak mempengaruhi interpretasi hidrogeokimia sistem panas bumi secara keseluruhan. Dengan demikian, sampel PL24-1, PL24-2, PL24-3, dan PL24-5 dianggap representatif dan dapat dianalisis lebih lanjut sebagai bagian dari sistem geothermal.

Seluruh manifestasi yang dianalisis (PL24-1, PL24-2, PL24-3, dan PL24-5) memiliki kandungan ion klorida (Cl^-) dan bikarbonat (HCO_3^-) yang relatif tinggi. Kondisi ini berkaitan dengan posisi manifestasi yang berada di bagian utara Gunung Ciremai dan Gunung Kromong. Secara geologi regional, daerah ini tersusun oleh sedimen sebagai batuan dasar yang didominasi oleh litologi batupasir,

batulempung, dan batugamping, yang berperan penting dalam mengontrol komposisi kimia air melalui proses pelarutan dan interaksi fluida–batuan.

Hasil plot Diagram Piper (Piper, 1944) menunjukkan bahwa sampel PL24-1, PL24-2, PL24-3, dan PL24-5 berada pada fasies Na–Cl (**Gambar 5**), yang dicirikan oleh dominasi kation Na^+ (dengan kontribusi K^+) dan anion Cl^- . Fasies Na–Cl umum dijumpai pada manifestasi air panas dan mencerminkan fluida dengan kandungan klorida tinggi yang merepresentasikan sistem panas bumi. Kesamaan posisi keempat sampel tersebut pada bidang diamond mengindikasikan keseragaman karakter kimia air panas di lokasi penelitian. Sebaliknya, sampel PL24-4 berada pada fasies Ca– HCO_3 dan terpisah dari kluster manifestasi utama pada Diagram Piper. Perbedaan fasies ini menunjukkan bahwa PL24-4 memiliki karakter hidrogeokimia yang berbeda dibandingkan manifestasi air panas lainnya dan diinterpretasikan sebagai air non-geotermal yang tidak merepresentasikan karakter kimia sistem panas bumi di daerah penelitian.



Gambar 5 Fasies air sampel penelitian di Wisata Banyu Panas Gempol-Palimanan

Berdasarkan hasil pengukuran alkalinitas (Tabel 4), sampel PL24-1, PL24-2, PL24-3, dan PL24-5

menunjukkan konsentrasi alkalinitas (sebagai CaCO_3) dan ion bikarbonat (HCO_3^-) yang relatif

tinggi, yaitu lebih dari 500 ppm. Tingginya nilai alkalinitas ini menunjukkan kapasitas penyangga karbonat yang besar pada fluida air panas, yang berkaitan dengan keberadaan sistem panas bumi dan interaksi fluida dengan batuan karbonat di daerah penelitian. Kondisi tersebut mendukung terjadinya presipitasi karbonat, yang tercermin dari banyaknya endapan travertin yang dijumpai sepanjang kanal dan jalur aliran air panas. Travertin merupakan batuan karbonat yang terbentuk akibat presipitasi kalsium karbonat (CaCO₃) dari mata air panas yang kaya CO₂ terlarut (Browne, 1991). Ketika fluida panas bumi mencapai permukaan, perubahan kondisi fisik-kimia, terutama penurunan tekanan dan pelepasan CO₂ terlarut (degassing), akan menggeser kesetimbangan sistem karbonat menuju kondisi lewat jenuh terhadap kalsit, sehingga memicu presipitasi CaCO₃ dan pembentukan travertin (Umar dan Jamaluddin, 2018). Proses ini secara umum dapat dijelaskan melalui reaksi kesetimbangan karbonat berikut:

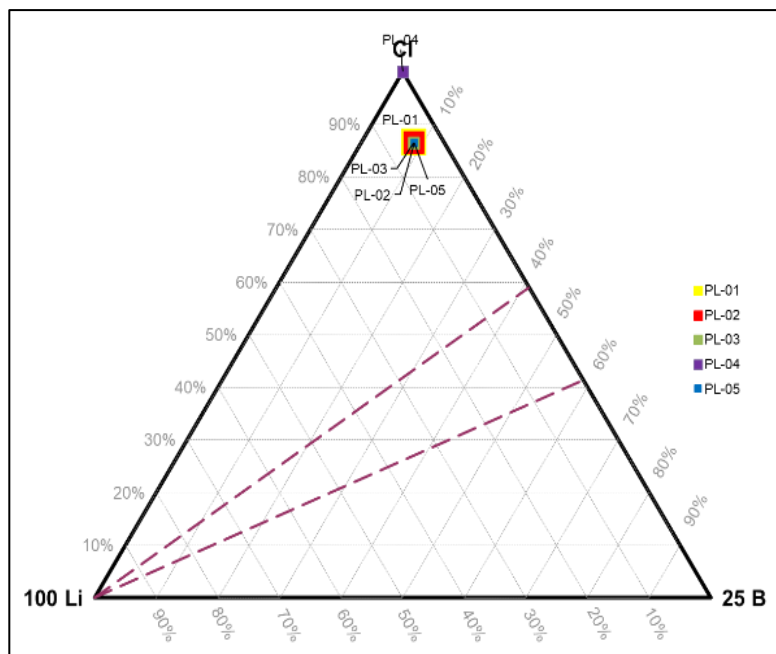


Sebaliknya, sampel PL24-4 memiliki nilai alkalinitas dan konsentrasi ion bikarbonat yang relatif rendah. Kondisi ini mencerminkan sumber air

yang tidak terpengaruh oleh sistem panas bumi, karena berasal dari air dingin kamar mandi yang memanfaatkan akuifer berbeda dibandingkan dengan manifestasi air panas lainnya. Oleh karena itu, PL24-4 tidak menunjukkan kondisi yang mendukung pembentukan endapan travertin secara signifikan.

4.3 Asal Fluida dan Sistem Reservoir

Berdasarkan hasil plot diagram ternary Cl–Li–B yang ditunjukkan pada **Gambar 6**, seluruh manifestasi air panas berada pada kluster yang sama. Kondisi ini mengindikasikan bahwa seluruh sampel berasal dari satu sistem reservoir yang sama. Seluruh sampel menunjukkan konsentrasi Cl yang jauh lebih tinggi dibandingkan Li dan B, yang mengindikasikan bahwa fluida tersebut berasosiasi dengan aktivitas vulkanik–magmatik. Konsentrasi klorida yang tinggi merupakan ciri khas fluida geothermal yang berasal dari sistem panas bumi aktif. Sampel PL24-4 menunjukkan nilai Cl, Li, dan B yang jauh lebih rendah dibandingkan sampel lain, sehingga posisinya menjadi outlier dan tidak merepresentasikan fluida reservoir panas bumi. Dengan demikian, interpretasi asal reservoir terutama didasarkan pada PL24-1, PL24-2, PL24-3, dan PL24-5 yang membentuk satu kluster yang sama.

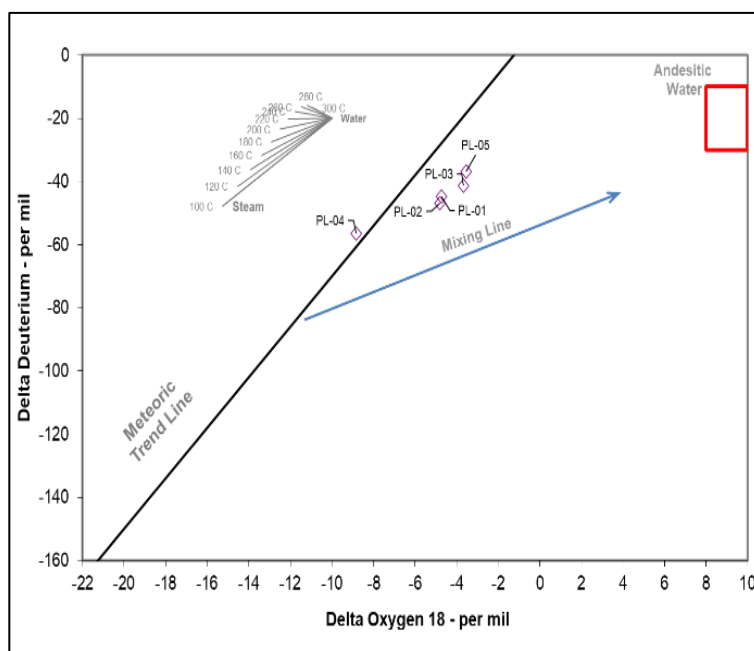


Gambar 6 Diagram Ternary Cl–Li–B

Analisis isotop $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ menunjukkan perbedaan karakteristik yang jelas antara sampel PL24-4 dan sampel manifestasi air panas lainnya (**Gambar 7**). Berdasarkan diagram isotop, titik PL24-4 dikategorikan sebagai air meteoric. Karakteristik isotopnya menunjukkan bahwa air ini berasal dari presipitasi atmosfer, seperti curah hujan, yang kemudian mengalami infiltrasi ke dalam sistem hidrogeologi tanpa mengalami interaksi signifikan dengan sistem panas bumi di kedalaman. Hal ini sejalan dengan lokasi pengambilan sampel yang berasal dari air dingin kamar mandi bilas pemandian. Komposisi isotop air meteorik umumnya berada di sekitar garis meteoric global (Global Meteoric Water Line, GMWL) atau garis meteoric lokal, yang mencerminkan minimnya pengaruh proses hidrotermal.

Sebaliknya, sampel PL24-1, PL24-2, PL24-3, dan PL24-5 menunjukkan karakteristik isotop yang berbeda dan diinterpretasikan sebagai air hasil pencampuran antara air meteorik dan fluida magmatik atau hidrotermal. Air tersebut telah

berinteraksi dengan sistem panas bumi di kedalaman dan dipengaruhi oleh aktivitas vulkanik atau geothermal. Karakteristik isotop ditunjukkan oleh pergeseran komposisi isotop yang menjauhi garis meteoric akibat pencampuran dengan fluida hidrotermal atau volatiles yang berasal dari magma (Fekete dkk., 2016). Pada diagram isotop, air panas menunjukkan arah pergeseran dari garis meteoric menuju komposisi isotop fluida panas bumi, meskipun masih mempertahankan pengaruh air meteorik. Variasi komposisi isotop ini mencerminkan proses pencampuran antara air meteorik yang masuk ke dalam sistem geothermal dengan fluida magmatik dari kedalaman. Semakin besar kontribusi fluida panas bumi, semakin jauh posisi titik sampel dari karakteristik isotop air meteoric (Dotsika dkk., 2021). Dengan demikian, air meteorik seperti PL24-4 berpotensi sebagai sumber air segar yang lebih sesuai untuk kebutuhan domestik, sedangkan air panas hasil pencampuran meteorik–magmatik seperti PL24-1, PL24-2, PL24-3, dan PL24-5 lebih relevan untuk kajian sistem panas bumi dan dinamika hidrotermal.



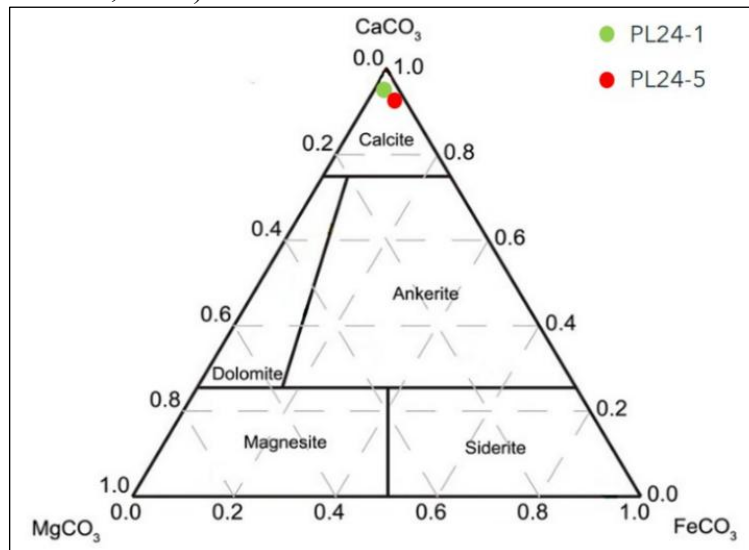
Gambar 7 Diagram Isotop OH

4.4 Proses Geokimia dan Pembentukan Mineral
Berdasarkan hasil plot diagram Ca–Mg–Fe yang ditunjukkan pada **Gambar 8**, sampel sedimen yang

diambil dari titik PL24-1 dan PL24-5 tergolong sebagai batuan dengan komposisi utama kalsit. Travertine yang menyusun batuan tersebut

didominasi oleh mineral kalsit, yang mengindikasikan bahwa pada lokasi tersebut berlangsung proses pembentukan sedimen travertine secara aktif (Gao dkk., 2025). Dominasi

kalsit ini juga sejalan dengan hasil analisis geokimia dan tingginya konsentrasi kalsium serta bikarbonat pada air panas yang mengalir di lokasi penelitian.



Gambar 8 Diagram Ca-Mg-Fe

Berdasarkan kondisi geologi regional, daerah penelitian berada dalam lokasi batugamping yang diintrusi oleh Andesit. Dalam kondisi tersebut, mineral karbonat yang berpotensi terbentuk dari larutan terutama adalah kalsit dan dolomit. Hasil perhitungan saturasi indeks (SI) yang ditampilkan pada **Tabel 8** menunjukkan bahwa sebagian besar sampel berada pada kondisi lewat jenuh (supersaturated) terhadap kalsit dan dolomit ($SI > 0$). Sampel PL24-1, PL24-2, PL24-3, dan PL24-5

menunjukkan nilai SI kalsit mendekati hingga lebih besar dari satu, yang mengindikasikan supersaturasi relatif kuat dan memungkinkan terjadinya presipitasi kalsit secara kinetik. Sebaliknya, sampel PL24-4 memiliki nilai SI yang lebih rendah, mencerminkan kondisi yang mendekati jenuh hingga supersaturasi lemah, sejalan dengan karakter air meteorik yang tidak terpengaruh secara signifikan oleh sistem geothermal.

Tabel 8 Hasil saturasi indeks

Sampel	SI Kalsit	SI Dolomit
PL24-1	0,94	1,60
PL24-2	1,36	2,57
PL24-3	1,44	2,73
PL24-4	0,46	0,61
PL24-5	1,02	1,95

Meskipun nilai SI dolomit pada beberapa sampel lebih tinggi dibandingkan kalsit, hasil analisis XRF dan diagram Ca-Mg-Fe menunjukkan bahwa mineral karbonat yang dominan terbentuk di lokasi penelitian adalah kalsit, bukan dolomit. Hal ini berkaitan dengan faktor kinetika pembentukan dolomit yang umumnya memerlukan waktu yang

lebih lama serta kondisi suhu yang lebih tinggi umumnya $>60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Warren, 2000), sehingga tidak sepenuhnya tercapai dalam sistem ini. Dengan demikian, nilai SI dolomit yang relatif lebih tinggi merepresentasikan kondisi kejenuhan secara termodinamika, namun tidak secara langsung menunjukkan pembentukan dolomit yang signifikan

di lapangan. Temuan ini menegaskan bahwa presipitasi karbonat di daerah penelitian lebih dikontrol oleh supersaturasi kalsit dan faktor kinetika, yang konsisten dengan keberadaan endapan travertine yang didominasi oleh kalsit.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa manifestasi PL24-1, PL24-2, PL24-3, dan PL24-5 merepresentasikan air panas yang dipengaruhi oleh sistem panas bumi, sedangkan PL24-4 merupakan air meteorik yang berasal dari akuifer dangkal tanpa pengaruh geotermal. Analisis hidrogeokimia menunjukkan bahwa air panas didominasi oleh fasies Na–Cl, sedangkan PL24-4 berada pada fasies Ca–HCO₃. Analisis isotop stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ mengindikasikan bahwa air panas tidak merepresentasikan air magmatik murni, melainkan merupakan hasil pencampuran antara air meteorik dan fluida hidrotermal. Pergeseran komposisi isotop dari garis meteoric mencerminkan kontribusi fluida panas bumi dalam sistem, sementara komponen air meteorik masih berperan dominan dalam mengontrol karakteristik isotop air panas di daerah penelitian.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada para peserta mata kuliah Hidrogeokimia dan Hidrogeologi atas bantuan dalam kegiatan pengambilan sampel. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada Laboratorium Hidrogeologi dan Hidrogeokimia, Institut Teknologi Bandung atas fasilitasi pengujian dan analisis sampel.

REFERENSI

APHA (2017): *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association, Washington, DC. 1796 pp.

Browne, P. R. L. (1991): Mineralogical guides to interpreting the shallow paleohydrology of epithermal mineral-depositing environments. *Proceedings of the 13th New Zealand Geothermal Workshop*, Auckland, hlm. 263–270.

Chafetz, H. S., dan Folk, R. L. (1984): Travertines:

depositional morphology and the bacterially constructed constituents. *Journal of Sedimentary Research*, 54(1), 289–316. <https://doi.org/10.1306/212F8404-2B24-11D7-8648000102C1865D>.

- Craig, H. (1961): Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133(3465), 1702–1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>.
- Djuri (1973): *Peta Geologi Lembar Ardjawanangun, Jawa*. Direktorat Geologi, Departemen Pertambangan Republik Indonesia, Bandung.
- Dotsika, E., Dalampakis, P., Spyridonos, E., Diamantopoulos, G., Karalis, P., Tassi, M., Raco, B., Arvanitis, A., Kolios, N., dan Michelot, J. L. (2021): Chemical and isotopic characterization of the thermal fluids emerging along North–Northeastern Greece. *Scientific Reports*, 11(1), 16291. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95656-6>.
- Fekete, S., Weis, P., Driesner, T., Bouvier, A.-S., Baumgartner, L., dan Heinrich, C. A. (2016): Contrasting hydrological processes of meteoric water incursion during magmatic–hydrothermal ore deposition: an oxygen isotope study by ion microprobe. *Earth and Planetary Science Letters*, 451, 263–271. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.07.009>.
- Firdaus, A., Kurniadi, D. T., Sahradani, D. N., dan Supriyanto (2021): Mineralogy of travertine deposit in Cislok geothermal field, Sukabumi, West Java, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 846(1), 012017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/846/1/012017>.
- Freeze, R. A., dan Cherry, J. A. (1979): *Groundwater*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall. 604 pp.
- Gao, W., Liu, X., Zhang, W., Sun, D., Chen, Z., Zhang, Q., Zhang, Z., Liu, S., Dong, J., Wang, S., Zhang, J., Xu, H., Zhang, W., dan Zheng, J. (2025): Travertine mineralogical characteristics and spatial distribution in Huanglong, China, a World Natural Heritage: derived from Late Pleistocene to

- Early Holocene glacial U-shaped valley carbonate deposits. *ACS Omega*, 10(1), 1331–1343.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.4c08897>.
- Gleamen, T., Giffari, F. R., dan Mandradewi, W. (2019): Identification of sinter silica evolutionary manifestation as a bicarbonate travertine based on $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ isotope review of local meteoric water line curves as determinant of outflow fluid reservoir in the Ciselok–Cisukarame geothermal system. *Journal of Physics: Conference Series*, 1363, 012047. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1363/1/012047>.
- Kurniadi, D. T., Sahdarani, D. N., Ponka, M. A., Yoga, D. A., Sihombing, F. M. H., dan Supriyanto (2021): Mineralogy of travertine deposit in the Ciseeng geothermal field, Parung, West Java, Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1725(1), 012076. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1725/1/012076>.
- Nicholson, K. (1993): *Geothermal Fluids: Chemistry and Exploration Techniques*. Berlin: Springer. 263 pp.
- Pentecost, A. (2005): *Travertine*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers. 446 pp.
- Piper, A. M. (1944): *A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses*. U.S. Geological Survey, Portland, Oregon.
- Rollinson, H. R. (1993): *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. London: Longman Scientific dan Technical. 384 pp.
- Umar, E. P., dan Jamaluddin, J. (2018): Karakteristik endapan sinter travertin panas bumi Barasanga, Kabupaten Konawe Utara, Sulawesi Tenggara. *Jurnal Geocelebes*, 2(2), 64–69.
- Veysey, J., Fouke, B. W., Kandianis, M. T., Schickel, T. J., Johnson, R. W., dan Goldenfeld, N. (2008): Reconstruction of water temperature, pH, and flux of ancient hot springs from travertine depositional facies. *Journal of Sedimentary Research*, 78(2), 69–76.
<https://doi.org/10.2110/jsr.2008.013>.
- Warren, J. (2000): Dolomite: occurrence, evolution, and economically important associations. *Earth-Science Reviews*, 52(1–3), 1–81.
[https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00022-2).