



Perbandingan Sistem Hidrotermal Air Panas Ciater dan Palimanan: Analisis berdasarkan Komposisi Hidrogeokimia

Zulis Septian, Wirandika Mayzzani Hadiana, Fildzah Ayunda, Mary Agustina Putri, Irwan Iskandar 

Program Studi Teknik Air Tanah, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received: July 26, 2025

Accepted: September 15, 2025

Published: November 25, 2025

Keywords:

ciater
hidrogeokimia
palimanan
sistem hidrotermal
vulkanik

Corresponding author:

Irwan Iskandar

Email: irwan@itb.ac.id

Read online:



Scan this QR code with your smart phone or mobile device to read online.

Copyright © 2025 Authors



This work is licensed under a Creative Commons

Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

ABSTRAK

Penelitian ini membandingkan sistem hidrotermal air panas di dua lokasi di Jawa Barat, yaitu Ciater (Subang) dan Palimanan (Cirebon), berdasarkan komposisi hidrogeokimia. Ciater, yang terletak di kaki Gunung Tangkuban Parahu, dipengaruhi oleh aktivitas vulkanik aktif, sementara Palimanan berada di kawasan cekungan sedimen yang kaya karbonat. Hasil pengukuran in-situ menunjukkan perbedaan signifikan dalam pH, temperatur, TDS, salinitas, dan DO antara kedua lokasi. Ciater memiliki pH asam, temperatur stabil, serta TDS dan salinitas tinggi, mencerminkan pengaruh vulkanik, sedangkan Palimanan memiliki pH netral, temperatur lebih tinggi, dan fluktuasi TDS serta salinitas, yang dipengaruhi oleh batuan karbonat. Analisis ion menunjukkan bahwa air panas Palimanan didominasi oleh anion klorida (Na-Cl), sedangkan Ciater oleh anion sulfat (Ca-SO₄). Pengujian logam berat mengungkapkan konsentrasi logam yang lebih tinggi di Ciater, mencerminkan interaksi dengan batuan vulkanik, sedangkan Palimanan memiliki kandungan logam yang rendah. Hasil analisis isotop menunjukkan bahwa air panas di Ciater cenderung tercampur dengan air hujan, sedangkan Palimanan menunjukkan interaksi signifikan dengan mineral, terutama karbonat. Penelitian ini memberikan wawasan penting tentang perbedaan sistem hidrotermal di kedua lokasi dan implikasinya terhadap pemanfaatan sumber daya geotermal.

ABSTRACT

This study compares hot water hydrothermal systems in two locations in West Java, namely Ciater (Subang) and Palimanan (Cirebon), based on hydrogeochemical composition. Ciater, located at the foot of Mount Tangkuban Parahu, is affected by active volcanic activity, while Palimanan is in a carbonate-rich sedimentary basin area. The results of the in-situ measurements showed significant differences in pH, temperature, TDS, salinity, and DO between the two sites. Ciater has an acidic pH, stable temperature, as well as high TDS and salinity, reflecting volcanic influences, while Palimanan has a neutral pH, higher temperatures, and fluctuations in TDS and salinity, which are affected by carbonate rocks. Ion analysis showed that Palimanan hot water is dominated by chloride anion (Na-Cl), while Ciater by sulfate anion (Ca-SO₄). Heavy metals testing revealed higher concentrations of metals in Ciater, reflecting interactions with volcanic rocks, whereas Palimanan has a low metal content. The results of isotope analysis showed that the hot water in Ciater tended to mix with rainwater, while Palimanan showed significant interactions with minerals, especially carbonates. This study provides important insights into the differences in hydrothermal systems at the two sites and their implications for the utilization of geothermal resources.

How to cite: Septian, Z., Hadiana, W. M., Ayunda, F., Putri, M.A., Iskandar, I. (2025). Perbandingan Sistem Hidrotermal Air Panas Ciater dan Palimanan: Analisis berdasarkan Komposisi Hidrogeokimia. *OPHIOLITE: Jurnal Geologi Terapan*, 7(2), pp. 83-92. <https://doi.org/10.56099/ophi.v7i2.p83-92>

1 Pendahuluan

Sumber daya geotermal di Indonesia, khususnya air panas, memiliki potensi besar yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai sektor, termasuk energi terbarukan, pariwisata, dan penelitian ilmiah (Munandar dkk. 2022; Yuan dkk. 2025). Aktivitas vulkanik yang tersebar di berbagai wilayah Indonesia memberikan kontribusi signifikan terhadap pembentukan sistem hidrotermal yang mengandung air panas (Alfianita, 2024; Jamaluddin dkk. 2024). Dua lokasi yang menarik untuk diteliti adalah Ciater di Kabupaten Subang, Jawa Barat, dan Palimanan di Kabupaten Cirebon, Jawa Barat. Kedua lokasi ini menunjukkan karakteristik unik pada sistem hidrotermalnya yang dipengaruhi oleh perbedaan geologi dan proses geokimia yang membentuk komposisi kimia air panas di masing-masing kawasan. Ciater terletak di kaki Gunung Tangkuban Perahu, yang memiliki aktivitas vulkanik aktif, sementara Palimanan berada di kawasan cekungan sedimen yang kaya karbonat. Penelitian terhadap sistem hidrotermal di kedua lokasi ini penting untuk memahami mekanisme transportasi fluida, reaksi batuan-air, serta potensi pemanfaatan energi panas bumi.

Penelitian ini berfokus pada perbandingan sistem hidrotermal air panas di Ciater dan Palimanan, dengan tujuan untuk menganalisis perbedaan komposisi hidrogeokimia antara kedua lokasi tersebut. Air panas di Ciater dominan oleh anion sulfat (SO_4^{2-}), yang terbentuk melalui oksidasi gas belerang seperti SO_2 dan H_2S akibat aktivitas vulkanik aktif (Ardelia dkk. 2023). Sebaliknya, air panas di Palimanan didominasi oleh anion klorida (Cl^-), yang dihasilkan dari pelarutan mineral evaporit dan air formasi (*connate water*), mencerminkan sistem hidrotermal yang lebih stabil dan dipengaruhi oleh cekungan sedimen (Waruwu, 2022). Perbedaan dominasi anion ini mencerminkan perbedaan proses geokimia yang terjadi di kedua lokasi, yang menjadi fokus utama dalam penelitian ini. Pemahaman tentang karakteristik geokimia kedua sistem hidrotermal ini tidak hanya penting untuk tujuan ilmiah, tetapi juga untuk pemanfaatan sumber daya geotermal yang efisien (Bintang dkk. 2019; Indarto dan Azis. 2022).

Penelitian sebelumnya telah banyak membahas potensi geotermal di Indonesia, termasuk analisis komposisi kimia air panas. Beberapa studi memfokuskan pada potensi endapan mineral yang dihasilkan dari aktivitas vulkanik (Abdullah dkk. 2023; Hanawindy dan Mawardi, 2023). Namun, penelitian-penelitian tersebut belum secara mendalam membandingkan dua sistem hidrotermal yang berbeda secara geokimia, seperti yang ditemukan di Ciater dan Palimanan. Penelitian yang

lebih spesifik mengenai perbedaan dominasi anion, interaksi air dengan batuan, serta analisis komposisi isotop stabil di kedua lokasi ini masih terbatas. Selain itu, beberapa studi yang ada tidak memberikan analisis yang komprehensif mengenai hubungan antara kondisi geologi dan sifat kimia air panas di kedua lokasi. Oleh karena itu, gap penelitian ini adalah belum adanya studi yang membandingkan secara langsung perbedaan sistem hidrotermal berdasarkan komposisi hidrogeokimia, yang merupakan fokus utama dalam penelitian ini. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis parameter fisik dan kimia air panas di Ciater dan Palimanan, mengidentifikasi kondisi geologi masing-masing lokasi, serta membandingkan komposisi kimia dan genesis air panas di kedua kawasan tersebut.

2 Geologi Regional Daerah Ciater dan Palimanan

Palimanan terletak di kawasan batuan sedimen Tersier yang kaya karbonat dan klorida, terbentuk melalui sedimentasi di laut dangkal dan diangkat oleh aktivitas tektonik. Sistem hidrotermal di Palimanan dipengaruhi oleh interaksi air tanah dengan batuan sedimen, menghasilkan panas bumi tanpa pengaruh vulkanik langsung. Sementara itu, Ciater terletak di kaki Gunung Tangkuban Perahu, di mana aktivitas vulkanik menghasilkan batuan vulkanik muda kaya silika dan sulfida. Sistem hidrotermal di Ciater dipengaruhi oleh intrusi magma dangkal yang menghasilkan gas vulkanik, yang berkontribusi pada sifat asam air panas di daerah tersebut. Meskipun kedua wilayah terletak di daerah dengan aktivitas vulkanik aktif, panas di Palimanan dihasilkan oleh gradien geotermal alami tanpa pengaruh magmatik, sedangkan di Ciater, panas berasal dari intrusi magma dangkal (Hochstein & Sudarman, 2008, 2015). Batuan di Palimanan didominasi oleh sedimen karbonat, sementara di Ciater didominasi oleh batuan vulkanik muda kaya silika.

3 Metode

3.1 Pengukuran insitu

Pengukuran parameter fisik dan kimia air dilakukan menggunakan *water quality meter* yang telah terkalibrasi (Gambar 1), meliputi pH, suhu, TDS, DO, salinitas, dan ORP (Rohim, 2023). Pengukuran dilakukan di tiga titik sampling di Palimanan dan Ciater, termasuk sumber utama, aliran hilir, dan lokasi umum. Parameter ini memberikan gambaran tentang kualitas air panas di kedua lokasi.



Gambar 1 Alat *water quality meter* untuk mengukur parameter insitu

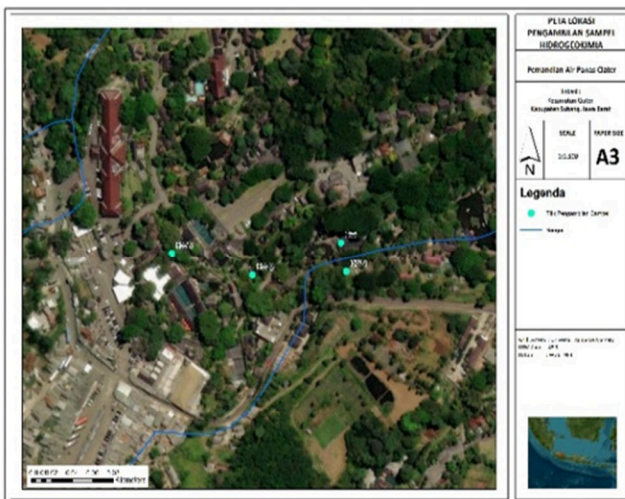
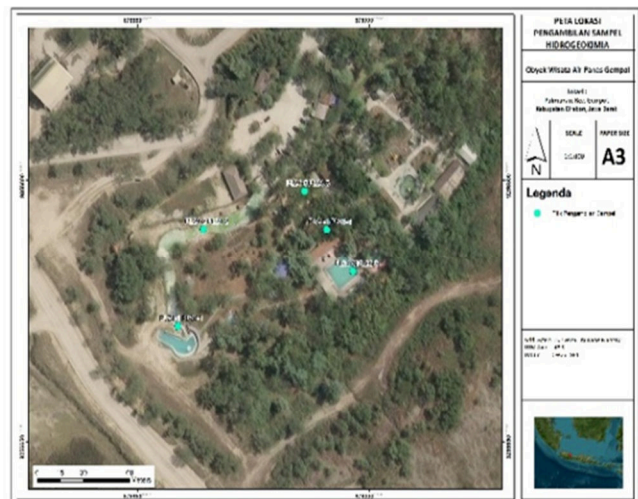
3.2 Pengambilan sampel air

Jumlah sampel air yang diambil ditentukan berdasarkan tujuan penelitian dan kondisi lingkungan yang mempengaruhi kualitas air di setiap titik *sampling*. Pengambilan sampel dilakukan di beberapa lokasi yang mewakili variasi kondisi, seperti sumber utama, aliran hilir, dan lokasi umum (Gambar 2), untuk mendapatkan gambaran yang lebih komprehensif mengenai kualitas air. Selain itu, variasi waktu pengambilan sampel juga diperhitungkan karena perubahan parameter air yang dipengaruhi oleh faktor waktu dan lingkungan, seperti suhu dan

curah hujan. Litologi atau jenis batuan yang ada di sekitar lokasi pengambilan sampel menjadi pertimbangan penting karena dapat mempengaruhi komposisi kimia air, seperti kandungan logam berat dan mineral terlarut. Pengaruh litologi ini tidak hanya relevan untuk air panas, tetapi juga untuk air di daerah lain, yang bisa terpengaruh oleh kandungan senyawa alami yang ada di dalam tanah atau batuan (Wątor & Dobrzyński, 2022).

3.3 Analisis Laboratorium

Jumlah sampel uji yang dianalisis di laboratorium disesuaikan dengan jumlah sampel air yang diambil di lapangan, namun tidak selalu dalam jumlah yang sama. Biasanya, sampel air yang diambil di lapangan akan diuji untuk berbagai parameter, dan dari jumlah sampel yang ada, sejumlah sampel akan dipilih untuk analisis lebih mendalam, seperti pengukuran logam berat dan isotop stabil. Lokasi laboratorium uji harus memenuhi standar fasilitas yang sesuai untuk pengujian kualitas air dan dilengkapi dengan peralatan yang sesuai, seperti laboratorium lingkungan atau laboratorium yang terakreditasi. Prosedur pengujian mengikuti standar nasional atau internasional, seperti Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater atau ISO 17025 untuk akreditasi laboratorium.



Gambar 2 Lokasi pengambilan sampel air

Alat Ion Chromatography (IC) digunakan untuk analisis anion dan kation utama, dengan spesifikasi alat yang mencakup pemisahan ion-ion dalam sampel melalui kolom *ion exchange* dan deteksi menggunakan konduktivitas. Setting alat IC dapat bervariasi tergantung pada jenis ion yang dianalisis, dengan parameter yang umum termasuk aliran eluen, pH, dan kecepatan aliran. Untuk analisis logam berat, *Inductively Coupled Plasma* (ICP) digunakan dengan

spesifikasi ICP-OES atau ICP-MS, tergantung pada sensitivitas dan elemen yang dianalisis (Nirianti dkk. 2017). Spesifikasi ICP yang digunakan biasanya memiliki kapasitas deteksi rendah dan dapat mengukur lebih dari 70 elemen dengan tingkat akurasi tinggi. Setting ICP untuk analisis logam berat melibatkan pengaturan suhu plasma, fluks argon, dan waktu pembacaan untuk mendapatkan hasil yang optimal sesuai dengan elemen yang diuji. Pengujian

isotop stabil dilakukan menggunakan *Mass Spectrometry* (MS), dengan tujuan untuk memahami hubungan air dengan lingkungan geologinya, memberikan wawasan lebih lanjut tentang asal-usul dan interaksi air di lokasi penelitian.

3.4 Analisis Geokimia dan Isotop

Hasil analisis laboratorium diolah menggunakan diagram Piper untuk mengelompokkan tipe air berdasarkan komposisi ionik. *Ion balance* dihitung untuk mengevaluasi akurasi hasil analisis kimia, dengan toleransi deviasi yang umumnya diterima berkisar antara 5% hingga 10%, tergantung pada metode analisis dan peralatan yang digunakan. Toleransi ini menunjukkan sejauh mana ion positif dan negatif dalam sampel air dapat seimbang, yang merupakan indikator penting untuk memastikan bahwa hasil analisis kimia valid. Perbandingan isotop stabil dengan *Local Meteoric Water Line* (LMWL) digunakan untuk memahami hubungan air panas dengan presipitasi lokal (Afriyani dkk. 2020; Putri dkk. 2023).

4 Hasil dan Pembahasan

4.1 Pengukuran Insitu

Pengukuran in-situ dilakukan untuk mengetahui kondisi alami secara langsung, sehingga dapat digunakan sebagai salah satu acuan dalam melakukan analisis. Pada penelitian ini, pengukuran in-situ yang dilakukan adalah pengukuran derajat keasaman (pH), temperatur (°C), *Total Dissolved Solid* (TDS), *Oxidation-Reduction Potential* (ORP), *Dissolved Oxygen* (DO), dan salinitas. Rangkuman hasil pengujian in-situ sampel di Ciater dapat dilihat pada Tabel 1, sedangkan sampel di Palimanan pada Tabel 2.

Tabel 1 Rangkuman hasil pengujian in-situ sampel air panas di Ciater

Sampel	HW1	HW2	HW3
Lokasi	Aliran hilir	Air terjun	Aliran hulu
pH	2.1	2.06	2.03
Suhu (°C)	35	37	39
ORP (mv)	529	516	508
TDS (ppm)	4500	2630	5270
DO (mg/L)	11.7	16.3	15.5
Salinitas (%)	0.29	0.21	0.43

Palimanan memiliki pH netral hingga basa, temperatur lebih tinggi, TDS dan salinitas lebih berfluktuasi, serta DO yang rendah, menunjukkan pengaruh batuan karbonat dan geotermal dalam (Irawan dkk. 2009). Sebaliknya, Ciater memiliki pH sangat asam, temperatur lebih stabil, TDS dan salinitas tinggi namun konsisten, serta DO yang tinggi, mencerminkan pengaruh endapan vulkanik muda

dan aktivitas Gunung Tangkuban Parahu (Nugraha dkk. 2023). Perbedaan ini menggambarkan variasi kondisi geologi dan proses hidrotermal di kedua lokasi.

Tabel 2 Rangkuman hasil pengujian in-situ sampel air panas di Palimanan

Sampel	PL24-1	PL24-2	PL24-3
Lokasi	Sumber mata air	Aliran kedua	Kolam
pH	6.81	7.45	7.48
Suhu (°C)	54.1	48.9	38.2
ORP (mv)	321	23	382
TDS (ppm)	6100	6030	6440
DO (mg/L)	1.1	4.7	1.3
Salinitas (%)	0.95	0.51	0.8

Derajat Keasamaan (pH)

Nilai pH pada sampel Palimanan dan Ciater menunjukkan perbedaan yang signifikan. Palimanan memiliki pH mendekati netral hingga basa, yang kemungkinan dipengaruhi oleh interaksi dengan batuan karbonat seperti batugamping. Sebaliknya, Ciater memiliki pH yang sangat asam akibat aktivitas vulkanik aktif Gunung Tangkuban Parahu dan dominasi endapan vulkanik muda, yang menghasilkan kondisi asam.

Temperatur

Temperatur air panas di Palimanan lebih tinggi dibandingkan dengan Ciater, menunjukkan bahwa medium panas di Palimanan memiliki energi panas yang lebih besar. Namun, penurunan temperatur di Palimanan yang lebih signifikan dari hulu ke hilir mengindikasikan kapasitas panas medium yang lebih rendah, sementara di Ciater, penurunan temperatur lebih stabil, mencerminkan kapasitas panas yang lebih tinggi.

Total Dissolved Solid (TDS)

Nilai TDS di Palimanan lebih tinggi dibandingkan dengan Ciater, mengindikasikan konsentrasi zat terlarut yang lebih besar. Sementara itu, TDS di Ciater lebih stabil namun cenderung lebih tinggi antara 2630 hingga 5270 ppm, yang menunjukkan konsistensi pada kandungan zat terlarut. Perbedaan ini dipengaruhi oleh jenis batuan yang berinteraksi dengan air panas di masing-masing Lokasi (Zukhruf dkk. 2024).

Oxidation-Reduction Potential (ORP)

Nilai ORP di Palimanan memiliki rentang yang lebih luas, menunjukkan dinamika redoks yang lebih kompleks, sementara di Ciater, nilai ORP lebih tinggi dan stabil. Perbedaan ini mungkin dipengaruhi oleh faktor lingkungan, kandungan zat terlarut, atau aktivitas biologis di kedua lokasi.

Dissolved Oxygen (DO)

Sampel Palimanan menunjukkan nilai DO yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan Ciater, mengindikasikan kondisi yang kurang oksigen. Nilai DO rendah di Palimanan antara 1,10 mg/L hingga 4,70 mg/L menunjukkan aktivitas biologis yang mengonsumsi oksigen atau sirkulasi air yang buruk. Sementara itu, Ciater memiliki nilai DO lebih tinggi, berkisar antara 11,70 mg/L hingga 16,30 mg/L, yang menunjukkan kelarutan oksigen yang lebih baik.

Salinitas

Palimanan memiliki salinitas yang lebih tinggi, berkisar antara 0,51% hingga 0,95%, dengan fluktuasi yang lebih besar dibandingkan dengan Ciater yang memiliki salinitas antara 0,21% hingga 0,43%. Perbedaan ini menunjukkan bahwa lingkungan Palimanan mungkin dipengaruhi oleh faktor-faktor yang meningkatkan kadar garam, sementara Ciater berada dalam kondisi dengan pengaruh garam yang lebih rendah dan stabil.

4.2 Analisis Ion (IC)

Prinsip keseimbangan ion diterapkan untuk memverifikasi keakuratan hasil analisis kimia. *Ion balance* dihitung berdasarkan perbandingan antara total kation (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) dan total anion (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-). Pengujian laboratorium dilakukan di Laboratorium Hidrogeokimia Institut Teknologi Bandung dengan parameter uji major ion. Metode yang digunakan dalam analisis ion adalah *ion balance* dan diagram piper. Kedua metode ini dipilih untuk menentukan karakteristik dan genesis/asal usul sampel air yang diuji (Rezaei dan Hassani, 2018).

Analisis Kesetimbangan Ion

Analisis kesetimbangan ion digunakan untuk mengevaluasi kesetimbangan hasil analisis kimia dengan membandingkan total kation dan total anion dalam sampel air. Kesalahan *ion balance* dihitung dengan persamaan berikut:

$$\text{Kesalahan Ion Balance} = \frac{\text{Total kation} - \text{Total anion}}{\text{Total kation} + \text{Total anion}} \times 100\%$$

Secara umum, hasil dianggap valid jika perbedaan konsentrasi antara kation dan anion menunjukkan persentase kurang dari 10%. Data hasil pengujian diperlihatkan pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Hasil pengujian *ion balance* menunjukkan perbedaan antara Ciater dan Palimanan. Di Ciater, kesalahan *ion balance* untuk sampel HW1 dan HW2 melebihi 10%, yang disebabkan oleh dominasi ion-ion dari sumber nonkonvensional, yakni air panas, serta pengaruh dari kedekatannya dengan aktivitas vulkanik aktif Gunung Tangkuban Perahu. Sementara itu, sampel HW3 menunjukkan nilai *ion balance* sebesar 7%, yang masih dalam batas yang dapat diterima. Di Palimanan, *ion balance* berada dalam

batas kesalahan yang dapat diterima, yakni 7-8%, yang mencerminkan keakuratan analisis kimia dan menunjukkan bahwa sumber air panas di Palimanan, yang jauh dari pengaruh vulkanik aktif, memiliki kondisi setimbang untuk nilai ion utamanya.

Tabel 3 Hasil analisis major ion pada sampel air panas Ciater

Anion/Kation	Valensi	Mr	HW1	HW2	HW3
			meq	meq	meq
Ca^{2+}	2.000	40.078	0.358	0.174	0.751
Mg^{2+}	2.000	24.305	0.129	0.088	0.354
Na^+	1.000	22.990	0.108	0.087	0.269
K^+	1.000	39.098	0.042	0.034	0.101
NH_4^+	1.000	18.039	0.005	0.003	-
Sum			0.641	0.386	1.475
HCO_3^-	1.000	61.016	0.000	0.000	0.000
Cl^-	1.000	35.453	1.021	0.988	0.191
SO_4^{2-}	2.000	96.062	1.078	2.199	1.481
F^-	1.000	18.998	0.088	0.044	0.024
NO_3^-	1.000	62.000	0.007	0.008	0.090
Br^-	1.000	79.900	0.005	0.005	-
Sum			2.200	3.244	1.785
Ion balance			55%	79%	10%

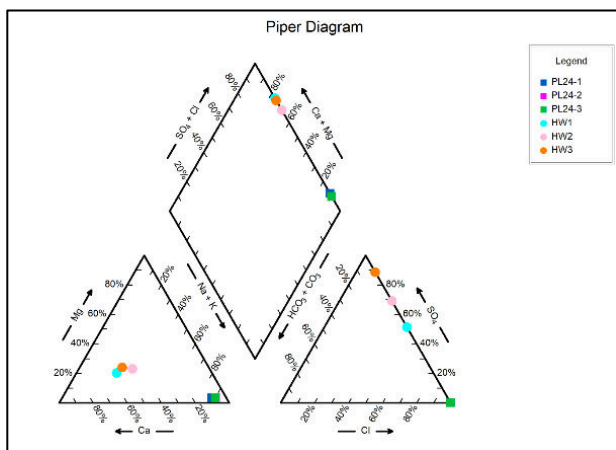
Tabel 4 Hasil analisis major ion pada sampel air panas Palimanan

Anion/Kation	Valensi	Mr	PL24-1	PL24-2	PL24-3
			meq	meq	meq
Ca^{2+}	2.000	40.078	0.767	0.556	0.580
Mg^{2+}	2.000	24.305	0.297	0.298	0.303
Li^+	1.000	6.941	0.022	0.022	0.022
Na^+	1.000	22.990	7.568	7.513	7.619
K^+	1.000	39.098	0.275	0.272	0.275
NH_4^+	1.000	18.039	-	-	-
Sum			8.929	8.661	8.799
HCO_3^-	1.000	61.016	0.000	0.000	0.000
Cl^-	1.000	35.453	7.610	7.555	7.664
SO_4^{2-}	2.000	96.062	0.024	0.030	0.015
F^-	1.000	18.998	0.027	0.027	0.028
NO_3^-	1.000	62.000	-	-	-
NO_2^-	1.000	46.000	-	-	-
Br^-	1.000	79.900	0.013	0.013	0.013
Sum			7.675	7.625	7.719
Ion balance			8%	6%	7%

Diagram Piper

Analisis diagram piper dapat menunjukkan hubungan antara tipe batuan dan komposisi air daerah kajian. Hasil plotting pada diagram piper untuk sampel air diperlihatkan pada Gambar 3. Berdasarkan *plotting* diagram Piper, air panas di Palimanan mencerminkan fasies air Sodium-Klorida ($\text{Na}^+\text{-Cl}^-$), yang menunjukkan bahwa sistem hidrotermal di Palimanan berasal dari cekungan sedimen yang dipengaruhi oleh air formasi (*connate water*) kaya klorida atau pelarutan mineral evaporit. Pelarutan batuan karbonat juga berperan dalam proses ini, karena batuan karbonat yang kaya kalsium dapat melarutkan ion-ion klorida ke dalam air, yang

selanjutnya memperkuat karakteristik $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ dalam air panas tersebut. Sebaliknya, air panas di Ciater mencerminkan fasies air Kalsium-Sulfat ($\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}$), yang dipengaruhi oleh aktivitas vulkanik, dengan gas belerang dan air meteorit yang mengarah pada oksidasi gas sulfur menjadi sulfat serta interaksi dengan batuan vulkanik, disertai dengan potensi pertukaran ion di zona akuifer. Diagram ini mengonfirmasi perbedaan utama antara kedua lokasi, dengan Palimanan lebih dipengaruhi oleh proses sedimentasi dan pelarutan karbonat, sementara Ciater dipengaruhi oleh aktivitas vulkanik aktif.



Gambar 3 Diagram piper sampel air panas

4.3 Analisis Logam Berat (ICP/ICP-MS)

Pengujian menggunakan *Inductively Coupled Plasma* (ICP) dan ICP-MS memberikan informasi rinci tentang konsentrasi logam berat dalam sampel air panas dari Palimanan dan Ciater. Hasil uji logam berat di Palimanan dan Ciater menunjukkan perbedaan yang signifikan terkait kandungan logam berat yang ada pada air panas di kedua Lokasi (Tabel 5).

Di Palimanan, konsentrasi logam berat seperti besi (Fe), mangan (Mn), seng (Zn), dan arsenik (As) terdeteksi dalam jumlah rendah, mencerminkan stabilitas kimia dan minimnya interaksi dengan batuan kaya logam, serta kurangnya pengaruh proses vulkanik (Chakraborty dkk. 2022). Sebaliknya, di Ciater, konsentrasi logam berat seperti besi (Fe), aluminium (Al), tembaga (Cu), dan arsenik (As) lebih tinggi, menunjukkan pelarutan batuan vulkanik kaya besi dan mineral sulfida, serta interaksi yang lebih intens dengan batuan vulkanik. Palimanan, dengan kandungan logam berat yang rendah, lebih aman untuk pemanfaatan langsung, seperti dalam industri air minum, sementara Ciater, dengan kandungan logam berat yang lebih tinggi, menunjukkan potensi risiko kesehatan dan lingkungan, meskipun juga membuka peluang untuk eksplorasi mineral. Perbedaan ini penting untuk pengelolaan dan pemanfaatan sumber daya air panas di kedua kawasan tersebut (Hasanuddin dan Leonard, 2023).

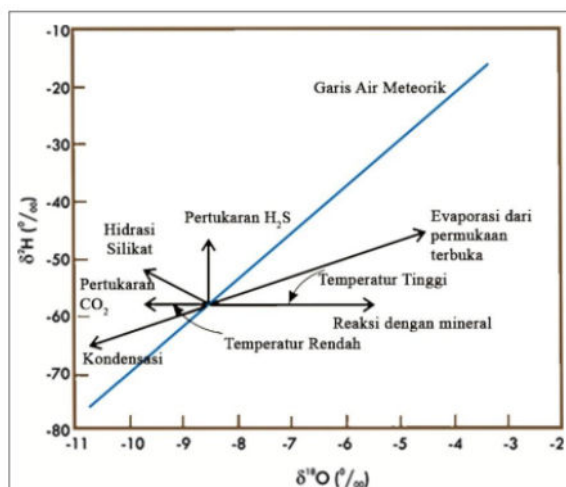
Tabel 5 Hasil Analisis ICP/ICP-MS pada Sampel Air Panas Ciater dan Palimanan

No.	Dissolved Metals	Ciater				Palimanan	
		HW1 (mg/L)	PL24-1 (mg/L)	PL24-2 (mg/L)	PL24-3 (mg/L)	HW2 (mg/L)	HW3 (mg/L)
1	Li	0.00011	0.45551	0.455	0.51347	0.0002	0.00049
2	Be	0.00011	<0.001	<0.001	<0.001	0.00016	0.00018
3	B	0.01747	2.97828	2.95859	3.24845	0.01663	0.01589
4	Na	2.15676	186.21772	185.36564	208.50922	1.86604	2.13355
5	Mg	0.93181	3.40333	3.36446	3.69067	0.7995	0.94352
6	Al	3.16506	0.00562	0.00324	0.01054	2.74413	3.20053
7	K	2.2793	10.77622	10.51553	11.6892	2.96656	1.52175
8	Ca	2.99723	26.05364	18.18041	20.00056	2.74778	3.13927
9	V	0.00977	<0.001	<0.001	<0.001	0.00809	0.01005
10	Cr	0.00015	<0.001	<0.001	<0.001	0.00012	0.00016
11	Mn	0.12285	0.00067	0.00179	0.00006	0.10536	0.12685
12	Fe	2.51842	<0.001	<0.001	<0.001	2.14847	2.60401
13	Co	0.00011	<0.001	<0.001	<0.001	0.00008	0.00011
14	Ni	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
15	Cu	0.0014	<0.001	<0.001	<0.001	0.00335	0.00244
16	Zn	0.01094	<0.001	<0.001	<0.001	0.01028	0.01156
17	Ga	0.00232	<0.001	<0.001	<0.001	0.00185	0.00229
18	As	0.00578	0.0031	0.01712	0.01678	0.00463	0.00553
20	Se	0.0003	0.05345	0.0509	0.05738	0.00022	0.0002
21	Rb	0.00881	1.12554	1.00262	1.13398	0.00778	0.00903
22	Sr	0.01638	0.00006	0.00004	0.00006	0.01457	0.01685
23	Y	0.00163	<0.001	<0.001	<0.001	0.00142	0.00169
24	Mo	0.00006	<0.001	<0.001	<0.001	0.00002	0.00004
26	Ag	0.00061	<0.001	<0.001	<0.001	0.00105	0.0002
27	Cd	0.00056	<0.001	<0.001	<0.001	0.00046	0.00054

No.	Dissolved Metals	Ciater				Palimanan	
		HW1	PL24-1	PL24-2	PL24-3	HW2	HW3
		(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
29	Te	0.0002	0.01871	0.0168	0.01882	0.00004	0.00001
30	Ba	0.00413	<0.001	<0.001	<0.001	0.00274	0.00244
31	La	0.0011	<0.001	<0.001	<0.001	0.00093	0.00113
32	Ce	0.0023	<0.001	<0.001	<0.001	0.00199	0.00234
33	Pr	0.00032	0	<0.001	<0.001	0.00029	0.00036
34	Nd	0.00149	<0.001	<0.001	<0.001	0.00136	0.00155
35	Sm	0.00031	0.00001	0.00001	0.00001	0.00026	0.00031
36	Eu	0.00009	<0.001	<0.001	<0.001	0.00007	0.00009
37	Gd	0.00034	<0.001	<0.001	<0.001	0.00029	0.00033
38	Dy	0.00032	<0.001	<0.001	<0.001	0.00029	0.00034
39	Ho	0.00007	<0.001	<0.001	<0.001	0.00006	0.00006
40	Er	0.00021	<0.001	<0.001	<0.001	0.00018	0.00021
41	Tm	0.00003	<0.001	<0.001	<0.001	0.00002	0.00002
42	Yb	0.00018	<0.001	<0.001	<0.001	0.00015	0.00019
43	Tl	0.00049	<0.001	<0.001	<0.001	0.00035	0.00042
44	[Pb]	0.0158	<0.001	<0.001	<0.001	0.01224	0.01382
45	Pb	0.01331	<0.001	<0.001	<0.001	0.01037	0.01143
46	U	0.00004	<0.001	<0.001	<0.001	0.00003	0.00004

4.4 Komposisi Isotop Stabil

Isotop stabil, seperti ^{18}O (oksigen-18) dan ^2H (deuterium), merupakan komponen intrinsik dari molekul air yang digunakan sebagai pelacak untuk menentukan asal-usul air dan mempelajari proses hidrologi yang mempengaruhi distribusinya. Isotop ini terdistribusi secara selektif dalam siklus hidrologi, mulai dari evaporasi di lautan, kondensasi, dan presipitasi, hingga pengisian ulang air tanah dan aliran kembali ke laut. Proses hidrologi utama yang mempengaruhi distribusi isotop mencakup evaporasi, kondensasi, re-evaporasi dari tanah dan perairan permukaan, serta pencampuran selama pengisian ulang air tanah (Gambar 4). Proses-proses ini memberikan wawasan tentang interaksi air dengan mineral dan gas dalam sistem geokimia bawah permukaan (Rahayuningtyas dkk. 2024).



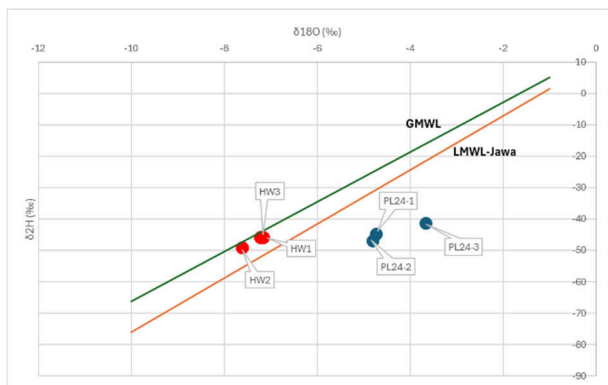
Gambar 4 Deviasi komposisi isotop ^{18}O dan ^2H dari MWL akibat berbagai proses (IAEA Report, 1998 dalam Arifin, 2016)

Hasil pengukuran isotop stabil pada tiga titik air panas di Ciater dan Palimanan menunjukkan perbedaan signifikan dalam distribusi isotop (Tabel 6). Nilai $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ di lokasi Ciater cenderung lebih dekat dengan garis *Meteoric Water Line* (MWL) baik *Global Meteoric Water Line* (GMWL) maupun *Local Meteoric Water Line* (LMWL), yang mengindikasikan kemungkinan pencampuran antara sumber air panas dengan air hujan. Sementara itu, nilai isotop di Palimanan menunjukkan deviasi yang cukup signifikan dari garis MWL (Gambar 5), yang mengindikasikan pengaruh kuat dari interaksi mineral, terutama dengan batuan karbonat yang ada di daerah tersebut, yang mempengaruhi komposisi isotop air panas (Sidauruk dkk. 2024).

Tabel 6 Hasil Pengukuran Isotop ^{18}O dan ^2H

No	Kode	Lokasi	Keterangan	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
1	HW1	Ciater	Hilir	-7.159	-45.979
2	HW2	Ciater	Tengah	-7.614	-49.146
3	HW3	Ciater	Hulu	-7.218	-45.892
4	PL24-1	Palimanan	Hulu	-4.732	-44.772
5	PL24-2	Palimanan	Tengah	-4.811	-46.882
6	PL24-3	Palimanan	Hilir	-3.662	-41.323

Perbedaan dalam hasil pengukuran isotop ini menunjukkan bahwa Ciater lebih dipengaruhi oleh pencampuran dengan air hujan, sementara Palimanan dipengaruhi secara signifikan oleh interaksi dengan batuan karbonat. Hal ini memberikan wawasan penting tentang proses geokimia yang mempengaruhi sistem hidrotermal di kedua lokasi, yang dapat digunakan untuk lebih memahami asal-usul dan karakteristik air panas di masing-masing daerah, serta implikasinya terhadap pemanfaatan sumber daya geotermal.



Gambar 5 Plot hasil pengujian isotop ^{18}O dan ^2H dengan GMWL dan LMWL (Pulau Jawa)

Penelitian ini memberikan wawasan yang mendalam mengenai perbedaan sistem hidrotermal di Ciater dan Palimanan, serta mekanisme geokimia yang memengaruhi komposisi kimia air panas di kedua kawasan tersebut. Hasil analisis ini dapat digunakan untuk mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya geotermal, baik untuk energi terbarukan maupun sektor pariwisata. Pemahaman yang lebih baik tentang interaksi air dengan batuan dan proses geokimia dapat membantu dalam perencanaan dan pengelolaan sumber daya geotermal yang lebih efisien, serta memberikan informasi yang berguna bagi pengembangan teknologi ekstraksi mineral dan pengolahan air panas. Selain itu, penelitian ini juga dapat menjadi dasar bagi studi geokimia lanjutan yang lebih mendalam tentang sistem hidrotermal di Indonesia, yang kaya akan potensi geotermal.

Meskipun penelitian ini telah memberikan pemahaman yang signifikan mengenai perbedaan sistem hidrotermal antara Ciater dan Palimanan, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Pertama, jumlah sampel yang diambil terbatas pada tiga titik di masing-masing lokasi, yang mungkin tidak mewakili variasi kondisi geokimia di seluruh area. Kedua, penelitian ini belum mengintegrasikan analisis spasial yang lebih mendalam yang dapat memberikan gambaran yang

lebih luas mengenai distribusi komposisi kimia di masing-masing kawasan. Terakhir, meskipun isotop stabil memberikan wawasan mengenai asal-usul air, pemahaman mengenai interaksi jangka panjang antara fluida hidrotermal dengan batuan serta dampaknya terhadap kualitas air dan ekosistem lokal masih perlu penelitian lebih lanjut.

5 Kesimpulan

Palimanan dan Ciater, keduanya berada di Jawa Barat dan memiliki mata air panas. Pengukuran in-situ menunjukkan variasi kondisi geologi dan proses hidrotermal yang signifikan di masing-masing kawasan. Di Palimanan, air panas memiliki pH netral hingga basa, temperatur yang lebih tinggi, serta fluktuasi TDS dan salinitas yang lebih besar, dengan DO yang rendah, mencerminkan pengaruh batuan karbonat. Sebaliknya, air panas di Ciater memiliki pH sangat asam, temperatur lebih stabil, TDS dan salinitas tinggi namun konsisten, serta DO yang tinggi, mencerminkan pengaruh endapan vulkanik muda dan aktivitas Gunung Tangkuban Parahu.

Analisis ion menunjukkan bahwa air panas Palimanan mencerminkan fasies air Sodium-Chloride, yang berasal dari cekungan sedimen yang dipengaruhi oleh air formasi atau pelarutan mineral evaporit, sementara air panas Ciater mencerminkan fasies air Calcium-Sulfate, yang dipengaruhi oleh aktivitas vulkanik dan oksidasi gas sulfur menjadi sulfat. Berdasarkan analisis logam berat, Palimanan memiliki kandungan logam berat yang rendah, sesuai dengan karakteristik geologi sedimen, sedangkan Ciater memiliki kandungan logam berat yang lebih tinggi akibat interaksi dengan batuan vulkanik. Hasil analisis isotop juga menunjukkan bahwa Palimanan dipengaruhi secara signifikan oleh interaksi mineral, terutama dengan batuan karbonat, sedangkan Ciater menunjukkan deviasi dekat dengan garis LMWL, kemungkinan karena pencampuran air panas dengan air permukaan di daerah wisata Sariater.

Referensi

- Abdullah, S., Idrus, A., Nurkhamim, N., & Ardaraja, R. B. 2023. Hubungan Tekstur Urat Kuarsa dan Kimia Bijih Endapan Emas Epitermal di Daerah Mekarbakti, Kecamatan Bungbulang, Kabupaten Garut, Provinsi Jawa Barat. *Jurnal Ilmiah Geologi PANGAEA*, 10(1), pp. 1–7. <https://doi.org/10.31315/jigp.v10i1.9620>
- Afriyani, M. P., Sentosa, L. W., & Nugroho, A. C. 2020. Analisis Genesa Hidrogeokimia Airtanah Menggunakan Diagram Piper Segiempat di Wilayah Pesisir. *Media Komunikasi Geografi*, 21(1), pp. 1–11. <https://doi.org/10.23887/mkg.v20i2.21331>
- Alfianita, L. 2024. Karakterisasi Manifestasi Permukaan Panasbumi di Wayang Windu Characterization of Surface Geothermal Manifestation at Wayang Windu. *Jurnal Teknologi Pertambangan dan Geosains*, 2(1), pp. 14–25.

- Ardelia, A., Pujiastuti, D., & Pohan, A. F. 2023. Identifikasi Karakteristik Fluida dan Estimasi Temperatur Reservoir Panas Bumi di Tanjung Raya dan Palupuh, Kabupaten Agam. *Jurnal Fisika Unand*, 12(3), pp. 395–401. <https://doi.org/10.25077/jfu.12.3.394-400.2023>
- Bintang, A. A., Sasmito, B., & Firdaus, H. S. 2019. Analisis Potensi Panas Bumi Menggunakan Citra Aster Level 1 T Tahun 2015 (Studi Kasus Kabupaten Kebumen, Jawa Tengah). *Jurnal Geodesi Undip*, 8(2), pp. 1–7. <https://doi.org/10.14710/jgundip.2019.23728>
- Chakraborty, T. K., Ghosh, G. C., Ghosh, P., Jahan, I., Zaman, S., Islam, M. S., Hossain, M. R., Habib, A., Biswas, B., Sultana, N., & Khan, A. S. 2022. Arsenic, Iron, and Manganese in Groundwater and its Associated Human Health Risk Assessment in The Rural Area of Jashore, Bangladesh. *Journal of Water and Health*, 20(6), pp. 888–902. <https://doi.org/10.2166/wh.2022.284>
- Hanawindy, A. S., & Mawardi, M. 2023. Ekstraksi Silika (SiO₂) dari Mineral Tanah Napa Pesisir Selatan. *Jurnal Periodic Jurusan Kimia UNP*, 12(1), pp. 31–34. <https://doi.org/10.24036/p.v12i1.116507>
- Hasanuddin & Leonard, F. (2023). Konsentrasi Logam Berat Besi (Fe), Mangan (Mn), Tembaga (Cu) pada Perairan Sungai Radda. *Jurnal Penelitian Multidisiplin Ilmu*, 2(4), pp. 2167–2172. <https://melatijournal.com/index.php/Metta/article/view/501/439>
- Hochstein, M. P., & Sudarman, S. (2008). History of Geothermal Exploration in Indonesia from 1970 to 2000. *Geothermics*, 37(3), pp. 220–266. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2008.01.001>
- Hochstein, M. P., & Sudarman, S. (2015). Indonesian Volcanic Geothermal Systems. *World Geothermal Congress 2015*, April, 11.
- Indarto, M. B & Azis, M. R. 2022. Eksplorasi Panas Bumi Dengan Metode Geolistrik. *PETRO : Jurnal Ilmiah Teknik Perminyakan*, 11(1), pp. 23–26. <https://doi.org/10.25105/petro.v11i1.12810>
- Irawan, D. E., Puradimaja, D. J., Notosiswoyo, S., & Soemintadiredja, P. 2009. Hydrogeochemistry of Volcanic Hydrogeology Based on Cluster Analysis of Mount Ciremai, West Java, Indonesia. *Journal of Hydrology*, 376(1–2), pp. 221–234. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.033>
- Jamaluddin, J., Maria, M., Nainggolan, J., Syamsuddin, S., & Suprpto, B. H. 2024. Karakteristik Geokimia Air Panas dan Perkiraan Temperatur Bawah Permukaan Panas Bumi Daerah Reatoa Kabupaten Maros. *Jurnal Geosaintek*, 10(2), pp. 123–131. <https://doi.org/10.12962/j25023659.v10i2.1834>
- Munandar, A., Risdianto, D., Hermawan, D., Widodo, S., & Wahyuningsih, R. 2022. Prosiding Hasil Kegiatan Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi Tahun Anggaran 2022. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Nirianti, T. T., Kuswandi, Nuranto, S., & Budiyatni, A. 2017. *Logam Berat dan Kesehatan*. Yogyakarta, UGM Press.
- Nugraha, G. U., Nur, A. A., Sudrajat, Y., Arifin, J., Bakti, H., Lubis, R. F., & Rulyadi, A. D. 2023. Sub-surface Configuration in the Northern Part of Lembang Groundwater basin Recharge Area. *Applied Water Science*, 13(10), pp. 204. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-02004-2>
- Putri, M. A. S., Putranto, T. T., & Santi, N. 2023. Hydrogeochemical Analysis and Heavy Metals in Groundwater Using the WQI and HPI Methods for Sanitation Hygiene Needs in East Belitung Regency. *Teknik*, 44(3), pp. 211–221. <https://doi.org/10.14710/teknik.v44i3.56996>
- Rahayuningtyas, U. C., Putranto, T. T., & Santi, N. 2024. Analisis Karakteristik Air Tanah Berdasarkan Data Isotop Stabil ¹⁸O dan ²H serta Kimia Air di Dataran Aluvial Kota Semarang. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(2), pp. 334–346. <https://doi.org/10.14710/jil.22.2.334-346>
- Rezaei, A., & Hassani, H. 2018. Hydrogeochemistry Study and Groundwater Quality Assessment in The North of Isfahan, Iran. *Environmental Geochemistry and Health*, 40(2), pp. 583–608. <https://doi.org/10.1007/s10653-017-0003-x>
- Rohim, M. 2023. *Panduan Survey Lans Kualitas Air*. Michosan Center Indonesia.
- Sidauruk, P., Prasetyo, R., Pratikno, B., Satrio, S., Pujiindiyati, E. R., Laksminingpuri, N., Aliyanta, B., & Lubis, A. A. 2024. Local Meteoric Water Line as A Reference Line For Water Study in Java Island, Indonesia. *AIP Conference Proceedings*, 2967(1), pp. 070004. <https://doi.org/10.1063/5.0192927>



- Waruwu, P. 2022. Pemodelan Distribusi Air Panas Menggunakan Program Inversi Damped Least Square Pada Data Vertical Electrical Sounding di Desa Way Muli dan Kunjir. *Jurnal Geosaintek*, 8(3), pp. 222–231. <https://doi.org/10.12962/j25023659.v8i3.13987>
- Wątor, K., & Dobrzyński, D. 2022. Towards a Better Practice in Water Sampling: Case Studies on Used in Practice Geothermal Waters. *Chemosphere*, 303, pp. 134913. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134913>
- Yuan, R., Wang, G., Xu, B., Zhao, S., Zhu, X., Zhang, W., Lin, W., & Shi, H. 2025. Using System Dynamics to Analyze Influencing Factors and Emission Reduction Potential of Geothermal Resources Development and Utilization in Tianjin. *Sustainability*, 17(9), pp. 4005. <https://doi.org/10.3390/su17094005>
- Zukhruf Z, H., Elmi, H., Edy, S., Juniani, A. I., Anggara T, N., & Amelia, P. 2024. Utilizing Total Dissolved Solids (TDS) Sensor for Dissolved Solids Measurement in The Water. *JISO: Journal of Industrial and Systems Optimization*, 7(1), pp. 22–30. <https://doi.org/10.51804/jiso.v7i1.22-30>