

Karakterisasi Fasies Hidrokimia Airtanah untuk Identifikasi Aliran Airtanah Geosite Danau Rayo, Musi Rawas Utara Sumatera Selatan

Fadea Risa Azzahra¹⁾, Budhi Setiawan^{1)*}

¹⁾ Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Pertambangan dan Geologi, Program Studi Teknik Geologi, Universitas Sriwijaya
E-mail: budhi.setiawan@unsri.ac.id

ABSTRAK

Danau Rayo di Kabupaten Musi Rawas Utara merupakan calon geosite yang memiliki morfologi melingkar dan sistem hidrogeologi yang unik. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi zonasi fasies hidrokimia airtanah yang dapat digunakan untuk memahami pola aliran dan proses geokimia yang berlangsung. Metode yang digunakan terdiri atas pengambilan sampel airtanah dan permukaan secara purposif, analisis ion utama, konversi konsentrasi serta validasi keseimbangan dengan *Charge Balance Error* (CBE). Data tervalidasi tersebut digunakan untuk visualisasi fasies dengan Diagram Piper dan Stiff sehingga diperoleh zonasi hidrogeokimia. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh sampel memiliki CBE dalam batas toleransi yang terdiri atas tiga zona, yaitu zona stagnan (BR1-BR5), zona discharge (AS1 dan AS2) serta zona transisi (BR6). Distribusi fasies ini mencerminkan proses pelarutan karbonat dan silikat, pencampuran airtanah dan air permukaan serta pengaruh litologi dan waktu tinggal air. Hasil analisis fasies ini memberikan dasar ilmiah untuk pengelolaan geoheritage dan konservasi sumber daya air berbasis zonasi fasies.

Kata Kunci: fasies hidrokimia, Danau Rayo, Piper, Stiff, geoheritage, zonasi airtanah

ABSTRACT

Danau Rayo in North Musi Rawas Regency is a candidate geosite with a circular morphology and a unique hydrogeological system. This study aims to identify groundwater hydrochemical facies zones to understand flow patterns and ongoing geochemical processes. The methods used include purposive groundwater and surface water sampling, primary ion analysis, concentration conversion, and equilibrium validation using Charge Balance Error (CBE). The validated data are used to visualize facies using Piper and Stiff Diagrams to obtain hydrogeochemical zoning. The results show that all samples have CBE within tolerance limits, consisting of three zones: the stagnation zone (BR1-BR5), the discharge zone (AS1 and AS2), and the transition zone (BR6). This facies distribution reflects the process of carbonate and silicate dissolution, groundwater and surface water mixing, and the influence of lithology and water residence time. The results of this facies analysis provide a scientific basis for geoheritage management and water resource conservation based on facies zoning.

Keywords: hydrochemical facies, Danau Rayo, Piper, Stiff, geoheritage, groundwater zoning

1. Pendahuluan

Airtanah adalah cadangan air yang tersimpan di dalam lapisan tanah ataupun lapisan batuan yang letaknya terdapat di dalam permukaan (UU RI No. 7 Tahun 2004 mengenai Sumber Daya Air) yang menjadi salah satu hal penting dari rangkaian siklus hidrologi dan berperan penting dalam menjaga keseimbangan ketersediaan air permukaan. Airtanah adalah sumber daya alam yang penting, terbentuk melalui masuknya air hujan ke dalam lapisan tanah serta batuan, lalu tersimpan dalam akuifer dengan kualitas serta kuantitas yang dipengaruhi oleh kondisi geologi, hidrologi, dan aktivitas manusia (Todd & Mays, 2015). Dalam sistem hidrogeologi, aliran airtanah dibagi menjadi dua zona utama, yaitu zona *recharge* dan zona *discharge*. *Recharge* merupakan suatu proses pengisian kembali cadangan air tanah, sedangkan proses keluarnya airtanah hingga mencapai permukaan dan mengalir ke luar disebut *discharge* (Barkah, 2021). Wilayah dimana tempat air hujan meresap dan masuk ke zona jenuh air disebut dengan daerah imbuhan (*recharge area*), sedangkan wilayah tempat airtanah naik ke permukaan disebut daerah lepasan (*discharge area*).

Danau Rayo merupakan geosite yang terdapat di Kabupaten Musi Rawas Utara, Provinsi Sumatera Selatan. Danau ini memiliki karakteristik yang unik berupa morfologi melingkar dengan ukuran yang relatif simetris, kedalaman signifikan, serta letaknya yang terisolasi dari jaringan sungai utama. Kondisi tersebut memunculkan banyak hipotesis mengenai asal-usul keterbentukan Danau Rayo karena keberadaan danau yang berbentuk cekungan melingkar dan sering dihubungkan dengan fenomena kawah bentukan tumbukan meteorit (*impact crater*) atau aktivitas vulkanik eksplosif yang terjadi pada kala Kuartar (Sari, Setiawan, & Idarwati, 2024). Kajian morfologi dan geologi menunjukkan adanya elevasi asimetris di sisi barat laut dan tenggara, serta indikasi struktur rim dan *blanket ejecta* yang mendukung interpretasi sebagai kawah tumbukan.

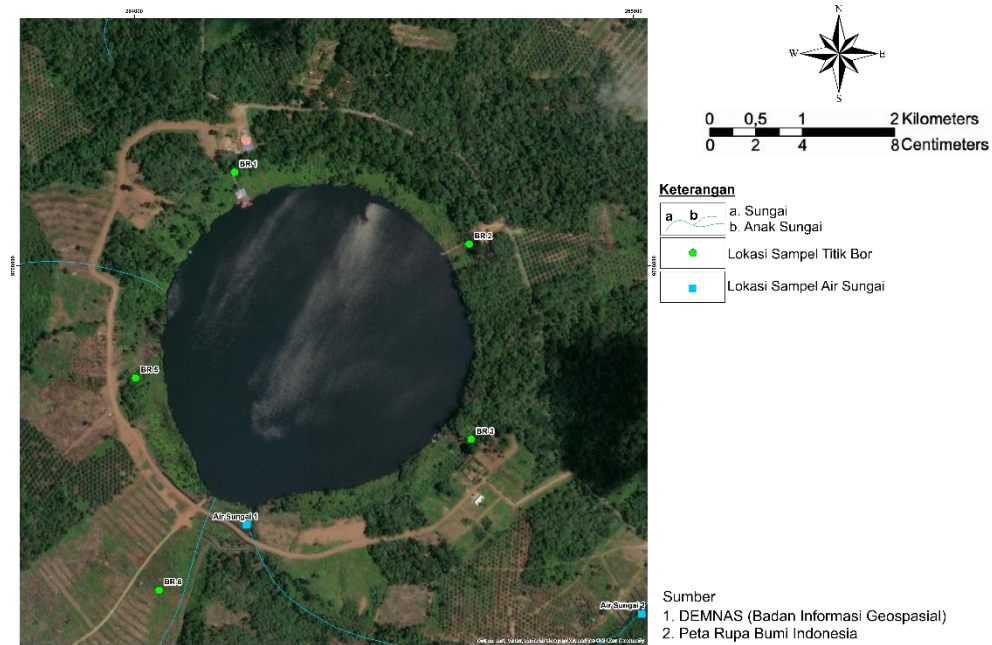
Salah satu pendekatan ilmiah yang efektif untuk memahami dinamika sistem airtanah adalah karakterisasi fasies hidrokimia. Karakterisasi fasies hidrokimia airtanah merupakan salah satu pendekatan ilmiah yang mampu menggambarkan asal-usul, proses geokimia, serta pola aliran airtanah. Analisis fasies hidrokimia tidak hanya berfungsi untuk mengidentifikasi tipe kimia airtanah, tetapi juga menjadi alat validasi terhadap data geokimia sehingga interpretasi mengenai evolusi kimia air dapat lebih akurat. Fasies hidrokimia pada dasarnya menggambarkan komposisi ion-ion utama yang terkandung dalam air tanah, seperti kation (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) dan anion (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}). Melalui klasifikasi fasies hidrokimia, dapat diketahui proses dominan yang terjadi, misalnya pelarutan mineral karbonat, pertukaran ion, hingga interaksi antara airtanah dengan batuan induk maupun airtanah dengan air permukaan (Appelo & Postma, 2005). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa pendekatan fasies hidrokimia khususnya melalui penggunaan Diagram Piper dan Diagram Stiff efektif untuk klasifikasi fasies dan interpretasi zona *recharge* dan *discharge* (Piper, 1944) (Stiff, 1951). Pendekatan fasies ini menggambarkan kondisi air, proses-proses geokimia selama pergerakan airtanah dalam akuifer seperti pelarutan kimia, pertukaran ion dan pencampuran dengan air permukaan (Mussa & Mjemah, 2023). Dalam sistem tertutup, fasies ini dapat menunjukkan evolusi kimia air dari tipe segar (Ca-HCO_3) menuju tipe termodifikasi (Na-Cl). Misalnya, penelitian yang ada di Delta Ouémé, kaitan airtanah dan air permukaan dapat ditunjukkan menggunakan pendekatan analisis kimia dengan diagram Piper dan isotop stabil (Chabi, et al., 2023). Hasil penelitian ini menunjukkan peran airtanah terhadap aliran sungai bervariasi pada setiap musimnya dan meningkat secara signifikan pada musim hujan. Penelitian ini juga membuktikan pentingnya diagram Piper dan isotop untuk memahami interaksi airtanah dengan air permukaan dalam sistem hidrogeologi.

Secara teori, fasies hidrokimia relevan dengan kondisi struktur tertutup di mana komposisi kimia airtanah menunjukkan proses geokimia selama pelarutan mineral, pencampuran, maupun pertukaran ion tanpa pengaruh lingkungan luar. Fasies hidrokimia yang diintegrasikan dengan data geospasial dan morfologi akan memberikan pendekatan holistik dalam memahami dinamika airtanah, terutama struktur tertutup seperti Danau Rayo. Penggunaan UAV multispektral dalam analisis morfologi rim serta pola *ejecta blanket*, distribusi fasies dapat dikaitkan langsung dengan litologi dan elevasi lokal untuk memperkuat interpretasi zona *recharge* dan stagnan (Sari, Setiawan, & Idarwati, 2024). Karakterisasi fasies tidak hanya penting dalam konteks hidrogeologi, tetapi juga dalam pengelolaan geoheritage. Distribusi fasies sedimen memengaruhi reaktivitas akuifer dan waktu tembus kontaminan seperti nitrat (Holdt, dkk., 2025). Dalam konteks geosite, fasies airtanah yang unik berpotensi menjadi indikator ilmiah untuk pengembangan geowisata seperti pada Lonar Crater di India (Fudali, dkk., 1980).

Oleh sebab itu, penelitian yang mengintegrasikan analisis hidrogeokimia dengan pemetaan geologi dan kondisi hidrologi menjadi kebutuhan mendesak untuk menjaga keberlanjutan fungsi Danau Rayo sebagai geosite, sumber daya air, sekaligus kawasan konservasi.

2. Metode Penelitian

Lokasi penelitian berada di Danau Rayo, Kabupaten Musi Rawas Utara, Provinsi Sumatera Selatan dengan luas area 1,5 km x 1,5 km. Pengambilan sampel air dilakukan dengan menggunakan botol HDPE steril berkapasitas 1000 mL dan disimpan dalam *cool box* untuk menjaga stabilitas kimia. Pengambilan sampel airtanah dipilih secara purposif berdasarkan elevasi, jarak dari rim dan potensi zona *recharge/discharge* seperti pada Tabel 1. Lokasi BR1 sampai dengan BR5 adalah bor dangkal yang berada di dalam danau, AS1 dan AS2 adalah aliran air sungai yang keluar dari danau, dan lokasi BR6 adalah bor dangkal antara AS1 dan AS2.



Gambar 1 Peta Lokasi Penelitian

Tabel 1 Titik Lokasi Pengamatan dan Pengambilan Sampel Air

Sampel	Koordinat	
	X	Y
BR1	264201	9708187
BR2	264671	9708043
BR3	264675	9707652
BR5	264003	9707775
AS1	264225	9707481
AS2	264998	9707295
BR6	264050	9707350

Parameter fisika dilakukan pengukuran langsung di lapangan seperti pH, suhu, dan Daya Hantar Listrik (DHL) menggunakan alat yang telah dikalibrasi. Setiap sampel yang telah diambil kemudian dikirim ke Laboratorium Hidrogeologi dan Hidrogeokimia, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung untuk dilakukan analisa ion utama: kation (Ca^{2+} , Mg^{+} , Na^{+} , K^{+}) dan anion (Cl^{-} , HCO_3^{-} , SO_4^{2-}). Nilai CaCO_3 dikonversi menjadi HCO_3^{-} menggunakan faktor konversi 1.22 sesuai dengan berat ekuivalen (Appelo & Postma, 2005). Semua dikonversi ke satuan meq/L menggunakan persamaan:

$$\text{meq/L} = \frac{\text{mg/L}}{\text{BM/Valensi}}$$

dengan BM = berat molekul, Valensi = bilangan oksidasi ion. Validasi dilakukan melalui perhitungan *Charge Balance Error* (CBE) dengan ambang batas $\pm 5\%$ untuk memastikan konsistensi data (Appelo & Postma, 2005) menggunakan persamaan

$$\text{CBE}(\%) = \frac{\sum \text{Kation} - \sum \text{Anion}}{\sum \text{Kation} + \sum \text{Anion}} \times 100$$

Data hasil analisis kimia airtanah tersebut dianalisis menggunakan Diagram Piper dan Stiff untuk mengidentifikasi tipe air dan zonasi fasies. Diagram Piper digunakan untuk klasifikasi berdasarkan dominan anion dan kation, sedangkan Diagram Stiff digunakan untuk membandingkan pola ion antarsampel secara visual. Interpretasi fasies mempertimbangkan pengaruh pelapukan akuifer dan waktu tinggal air (Setiawan, dkk., 2020; (Mussa & Mjemah, 2023) Brillyanto dkk., 2024). Data fasies tersebut dikorelasikan dengan elevasi, jarak dari rim dan citra multispektral UAV untuk mengidentifikasi zona *recharge* dan stagnan. Analisis

morfometri danau digunakan untuk memetakan struktur rim dan pola aliran airtanah. Pendekatan ini mengadaptasi yang digunakan dalam studi pelapukan akuifer (Hendrayana, dkk., 2020) dan struktur tertutup (Sari, Setiawan, & Idarwati, 2024).

3. Hasil dan Pembahasan

Danau Rayo memiliki aliran air keluar yang akan memiliki dinamika hidrogeokimia yang khas. Aliran keluar memungkinkan pelepasan ion terlarut dan mempercepat siklus air sehingga proses pelarutan mineral, pertukaran ion dan evolusi kimia airtanah berlangsung dalam rentang waktu yang lebih variatif. Perbedaan antara air sungai dan airtanah dalam sistem ini menjadi penting untuk dipahami, terutama dalam interaksi *recharge* dan *discharge*.

Parameter Fisika

Analisis parameter fisika menunjukkan seluruh sampel air, baik airtanah (BR1-BR6) maupun air sungai (AS1 dan AS2), memiliki karakteristik yang seragam: tidak berwarna, tidak berasa, tidak berbau dan tidak kenal seperti diperlihatkan pada Tabel 4.2. Airtanah dalam danau (BR1-BR5) memiliki pH relatif netral, sedangkan air sungai effluent menunjukkan pH lebih rendah yang mengindikasikan pengaruh air hujan dan pelarutan karbonat dangkal. Sedangkan BR6 yang merupakan airtanah dangkal di luar danau memiliki pH transisi yang mencerminkan karakter campuran antara airtanah dan pengaruh air permukaan.

Tabel 2 Parameter Fisika Sampel Air

Sampel	Warna	Rasa	Bau	Kekentalan	Ph
BR1	Tidak berwarna	Tidak Berasa	Tidak Berbau	Tidak Kental	6.51
BR2	Tidak berwarna	Tidak Berasa	Tidak Berbau	Tidak Kental	6.42
BR3	Tidak berwarna	Tidak Berasa	Tidak Berbau	Tidak Kental	6.03
BR5	Tidak berwarna	Tidak Berasa	Tidak Berbau	Tidak Kental	5.99
AS1	Tidak berwarna	Tidak Berasa	Tidak Berbau	Tidak Kental	6.73
AS2	Tidak berwarna	Tidak Berasa	Tidak Berbau	Tidak Kental	5.78
BR6	Tidak berwarna	Tidak Berasa	Tidak Berbau	Tidak Kental	5.49

Parameter Kimia

Airtanah dalam danau memiliki konsentrasi kation Ca^{2+} dan Mg^{2+} yang tinggi (misalnya pada BR1) serta nilai DHL dan TDS tingkat mineralisasi sedang hingga tinggi seperti diperlihatkan pada Tabel 3. Air sungai effluent memiliki konsentrasi Ca^{2+} dan Mg^{2+} yang lebih rendah dengan DHL dan TDS yang terendah, sedangkan BR6 menunjukkan nilai menengah. Komposisi kimia menunjukkan bahwa airtanah dalam danau telah mengalami pelarutan mineral karbonat dan silika secara intensif. Air sungai membawa jejak kimia danau yang telah dimodulasi oleh proses fisik dan BR6 menunjukkan peran sebagai zona transisi antara airtanah dan air permukaan.

Tabel 3 Hasil Analisa Parameter Kimia Sampel Air (Mg/L), DHL, dan TDS

Sampel	Kation				Anion			Ph	DHL ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	TDS (ppm)
	Ca^{2+}	Na^+	Mg^{2+}	K^+	Cl^-	CaCO_3	SO_4^{2-}			
BR1	19.01	5.24	10.1	1.63	1.55	76.6	1.87	6.51	124.5	63.6
BR2	7.89	3.95	4.27	1.01	0.79	30.9	1.34	6.42	51.2	27.8
BR3	13.67	4.35	9.47	1.24	1.46	49.8	0.93	6.03	87.9	42.5
BR5	14.11	5.2	8.87	0.72	2.04	48.1	1.18	5.99	83.4	39.7
AS1	6.63	1.14	2.42	6.63	0.68	23	0	6.73	26.0	13.1
AS2	3.9	0.93	1.35	0.3	0.68	31	0	5.78	14.32	5.91
BR6	7.53	0.61	1.35	7.53	0.75	19	1.63	5.49	23.1	10.9

Konversi ke satuan meq/L menunjukkan dominasi Ca^{2+} dan Mg^{2+} pada air tanah dalam danau, dengan HCO_3^- sebagai anion utama seperti diperlihatkan pada Tabel 4. Air sungai effluent memiliki nilai ion lebih rendah, namun tetap menunjukkan fasies karbonat yang dominan dan BR menunjukkan nilai transisi. Fasies

Ca-Mg-HCO₃ mendominasi seluruh sampel dengan airtanah menunjukkan evolusi kimia lanjut dan air sungai sebagai hasil akhir dari proses pelarutan yang diperkuat oleh BR6 sebagai zona pencampuran. Pola ini sejalan dengan studi regional di Watuputih (Setiawan, dkk., 2020) dan Yogyakarta (Hendrayana, dkk., 2020) yang menunjukkan pengaruh litologi terhadap komposisi kimia airtanah.

Tabel 4 Hasil Konversi Parameter Kimia Sampel Air (Meq/L)

Sampel	Kation				Anion		
	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
BR1	0.95	0.23	0.84	0.04	0.04	1.56	0.04
BR2	0.39	0.17	0.36	0.03	0.02	0.63	0.03
BR3	0.68	0.19	0.79	0.03	0.04	1.01	0.02
BR5	0.71	0.23	0.74	0.02	0.06	0.98	0.02
AS1	0.33	0.05	0.20	0.17	0.02	0.47	0.00
AS2	0.20	0.04	0.11	0.01	0.02	0.63	0.00
BR6	0.38	0.03	0.11	0.19	0.02	0.39	0.03

Selanjutnya, setelah nilai kation dan anion dikonversi ke dalam satuan mEq/L, maka dilakukan validasi untuk memastikan keakuratan data analisis dengan cara melakukan perhitungan *charge balance error* (CBE). *charge balance error* (CBE) merupakan parameter yang digunakan untuk memeriksa keseimbangan muatan kation dan anion dalam larutan air. Semua nilai berada dalam rentang $\pm 5\%$ seperti diperlihatkan pada Tabel 5 yang merupakan batas toleransi (Hem, 1985), di mana hasil CBE ini menunjukkan bahwa analisis kimia dilakukan dengan akurasi yang baik dan dapat digunakan untuk interpretasi hidrogeokimia lebih lanjut.

Tabel 5 Hasil Perhitungan Nilai CBE (%) pada Setiap Sampel Air

Sampel	BR1	BR2	BR3	BR5	AS1	AS2	BR6
CBE (%)	2.91	0.91	2.13	2.12	0.59	-0.82	0.53

Tahapan setelah verifikasi CBE adalah persentase masing-masing ion terhadap total kation dan anion seperti diperlihatkan pada Tabel 6, yang menjadi dasar kuantitatif untuk menyusun Diagram Piper dan Stiff. Dengan demikian, tabel ini merupakan hasil akhir dari proses konversi, verifikasi dan normalisasi data kimia air, sehingga akan diperoleh visualisasi fasies hidrogeokimia yang akurat dan konsisten.

Tabel 6 Hasil Perhitungan % ion pada Setiap Sampel Air

Sampel	Kation				Anion		
	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
BR1	46.10	11.05	40.82	2.03	3.21	94.96	2.87
BR2	41.62	18.12	37.54	2.73	3.94	92.61	4.94
BR3	40.36	11.17	46.60	1.88	4.62	94.36	2.18
BR5	41.76	13.38	43.76	1.09	6.50	92.26	2.78
AS1	44.04	6.58	26.79	22.58	4.76	96.07	0.00
AS2	54.83	11.37	31.63	2.16	3.57	97.05	0.00
BR6	53.13	3.74	15.88	27.25	5.68	87.52	9.13

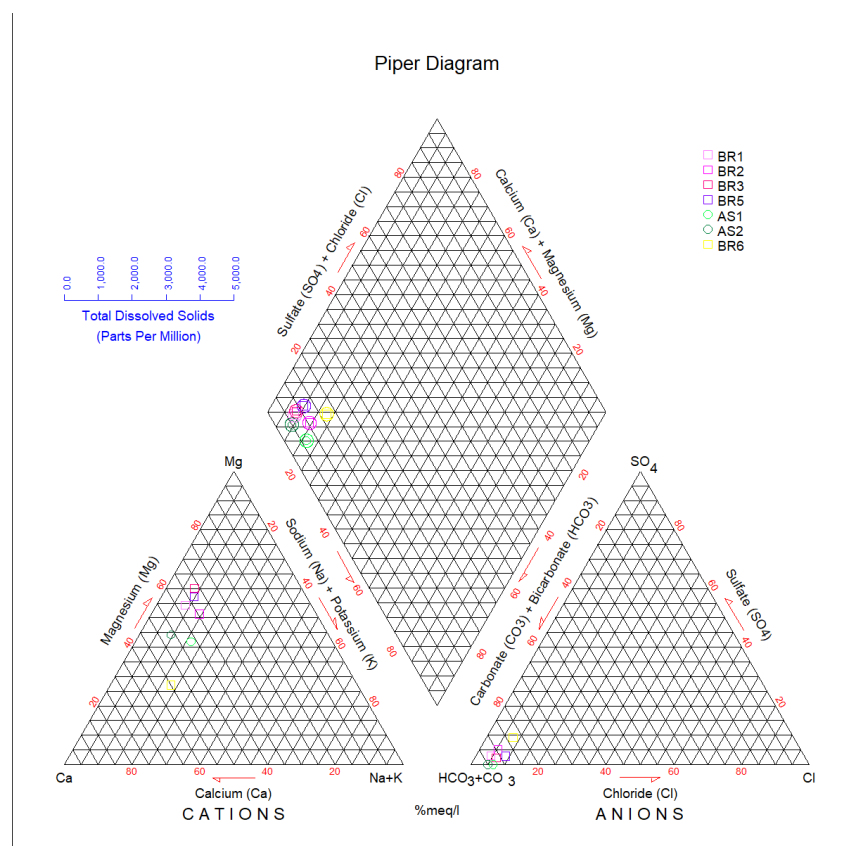
Diagram Piper

Diagram Piper merupakan diagram yang sering digunakan dalam hidrogeokimia yang berguna untuk mengklasifikasikan serta memvisualkan komposisi kimia yang terkandung dalam airtanah. Diagram Piper ini memiliki dua segitiga, di mana segitiga yang berada di sebelah kiri untuk kation utama (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺) dan segitiga di sebelah kanan untuk anion utama (HCO₃⁻, CO₃²⁻, SO₄²⁻, Cl⁻). Kemudian kedua segitiga ini diproyeksikan ke dalam bidang yang berbentuk intan pada bagian tengah yang berguna untuk menggambarkan

fasies hidrokimia. Data yang digunakan untuk diagram Piper ini merupakan % meq untuk masing-masing kation (Ca, Mg, Na+K) dan anion (HCO_3+CO_3 , SO_4 , Cl).

Hasil plotting data hidrogeokimia pada diagram Piper menunjukkan bahwa sebagian besar sampel air tanah (BR1, BR2, BR3, dan BR5) didominasi oleh kation Ca^{2+} – Mg^{2+} dan anion HCO_3^- – CO_3^{2-} . Pola ini mengindikasikan bahwa fasies hidrokimia airtanah pada Kawasan Geosite Danau Rayo termasuk ke dalam tipe Ca–Mg– HCO_3 , yang merupakan ciri airtanah dengan karakter *meteoric recharge* atau berasal dari infiltrasi air hujan yang masih muda. Tipe ini umum dijumpai pada daerah karbonatan dan batuan sedimen berpori tinggi yang aktif mengalami proses pelarutan mineral karbonat dan silikat.

Sementara itu, beberapa sampel lain seperti AS1, AS2, dan BR6 menunjukkan pergeseran arah fasies dengan peningkatan ion Na^+ , K^+ , dan Cl^- . Hal tersebut menunjukkan bahwa air mengalami proses evolusi kimia lanjutan akibat interaksi yang lebih lama dengan batuan induk serta kemungkinan adanya proses pertukaran ion. Perbedaan tersebut mengindikasikan adanya dua zona hidrogeokimia utama pada daerah penelitian, yaitu zona reaktif yang didominasi oleh air muda dan zona stagnan yang mencerminkan air yang lebih tua atau bereaksi lebih lama dengan batuan. Secara umum, distribusi fasies yang ditunjukkan pada diagram Piper menunjukkan sistem airtanah yang berkembang dari tipe Ca–Mg– HCO_3 (*freshwater*) menuju tipe Na–Cl (*slightly evolved water*). Hal tersebut juga didukung oleh kondisi hidrogeologi Danau Rayo yang berada di area depresi tektonik dan dikelilingi oleh batuan karbonat Formasi Baturaja serta sedimen halus Formasi Air Benakat yang berperan sebagai akuifer dan akuiklud lokal. Berikut merupakan diagram Piper dari sampel penelitian (Gambar 1).



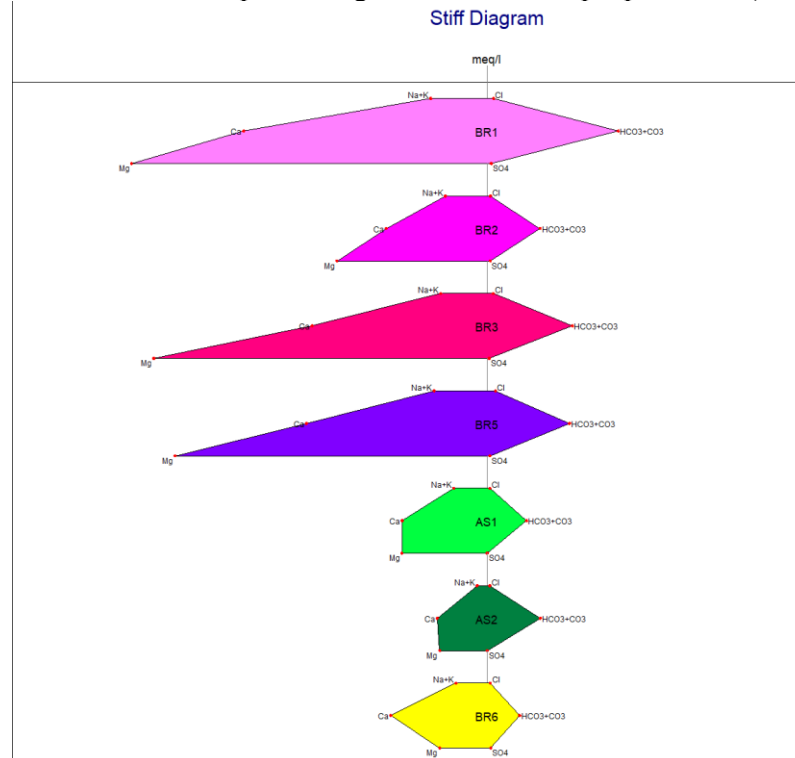
Gambar 2 Hasil Plotting Data Hidrogeokimia pada Diagram Piper

Diagram Stiff

Diagram Stiff merupakan grafis berbentuk poligon yang sering digunakan untuk menggambarkan komposisi kimia air berdasarkan konsentrasi ion utama. Diagram Stiff ini berguna untuk membandingkan antarsampel dengan cepat, mengidentifikasi kesamaan atau perbedaan sumber dan proses geokimia, serta menyajikan visualisasi spasial distribusi fasies kimia air. Data yang digunakan untuk plotting diagram stiff adalah data konsentrasi ion utama dalam meq/L. Pada sumbu horizontal diplotkan data kation (Ca^{2+} , Mg^{2+} di

kiri dan $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ di kanan) serta anion ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ di kiri dan SO_4^{2-} , Cl^- di kanan). Kemudian titik konsentrasi dihubungkan sehingga dapat membentuk suatu pola yang khas dari sampel air.

Berdasarkan hasil plot pada diagram Stiff, interpretasi diagram Piper diperkuat dengan menunjukkan variasi bentuk poligon yang merepresentasikan perbedaan komposisi ion utama antarsampel. Poligon sampel BR1, BR2, BR3, dan BR5 memiliki bentuk yang melebar ke arah Ca^{2+} dan HCO_3^- yang mendukung dominasi fasies Ca-Mg-HCO_3 sebagai tipe airtanah reaktif pada daerah *recharge* aktif di sekitar danau. Namun, sebaliknya, poligon sampel AS1, AS2, dan BR6 menunjukkan pergeseran bentuk dan peningkatan ion Na^+ , K^+ , dan Cl^- serta penyempitan pada ion Ca^{2+} dan HCO_3^- . Hal tersebut menunjukkan air yang telah mengalami proses kimia lebih lanjut, seperti pertukaran ion antara Ca^{2+} – Na^+ atau pengayaan klorida karena adanya waktu tinggal yang lebih lama dalam akuifer. Kondisi tersebut sering didapati pada zona stagnan atau pada daerah *discharge* yang cenderung terisolasi. Berikut merupakan diagram Stiff dari sampel penelitian (Gambar 2).



Gambar 3 Hasil Plotting Data Hidrogeokimia pada Diagram Stiff

Zonasi Fasies Hidrogeokimia

Berdasarkan hasil analisis geokimia dan interpretasi Diagram Piper dan Stiff, maka dapat diklasifikasikan ke dalam tiga zona fasies, yaitu: zona stagnan, zona discharge, dan zona transisi, seperti diperlihatkan dalam Tabel 7 yang menunjukkan karakteristik ionik dan spasial yang khas.

Tabel 7 Klasifikasi Zonasi Fasies Hidrogeokimia Danau Rayo

Zona Fasies	Sampel	Jenis Air	Fasies Dominan	Karakteristik Kimia
Zona stagnan	BR1, BR2, BR3, BR5	Airtanah dalam danau	Ca-Mg-HCO_3	Kation divalen dominan (Ca^{2+} , Mg^{2+}); anion bikarbonat tinggi; TDS dan DHL relatif tinggi
Zona <i>discharge</i>	AS1, AS2	Air sungai effluent danau	Bikarbonat segar	Konsentrasi ion rendah; poligon Stiff ramping; TDS dan DHL rendah
Zona transisi	BR6	Airtanah dangkal luar danau	Campuran Ca-Mg-HCO_3	Komposisi ion menengah; posisi tengah pada Piper; poligon Stiff moderat

Secara rinci penjelasan masing-masing zona adalah sebagai berikut:

- Zona Stagnan (BR1-BR5)

Zona ini menunjukkan fasies Ca-Mg-HCO₃ yang menunjukkan airtanah yang mengalami evolusi dengan dominasi kation divalen (Ca²⁺ dan Mg²⁺) serta anion bikarbonat, yang menunjukkan pelarutan karbonat dan silikat yang intensif. Hal tersebut menunjukkan mekanisme utama pembentukan komposisi kimia air, “*solution or precipitation reaction occurring below the land surface*” (Hem, 1985). Hal ini juga diperkuat oleh nilai TDS dan DHL yang tinggi, yang memperkuat interpretasi sebagai zona akumulasi dengan waktu tinggal yang lama.

Hasil ini memperkuat bahwa zona stagnan Danau Rayo memiliki karakteristik airtanah matang secara kimia dan terisolasi secara hidrolik. Hal ini sejalan dengan studi di wilayah Merapi Selatan dan Tenggara yang menunjukkan bahwa Ca-Mg-HCO₃ berkembang dalam sistem akuifer yang dipengaruhi oleh pelapukan dan batuan karbonat (Hendrayana dkk., 2023). Selain itu, studi hidrogeokimia dan isotop di kawasan karst Watuputih, Rembang telah mengidentifikasi bahwa airtanah memiliki karakter kimia dan isotop yang khas, serta menunjukkan hubungan spasial dengan zona *recharge* di elevasi tinggi. Temuan ini mendukung bahwa zona stagnan Danau Rayo merupakan bagian dari sistem tertutup dengan evolusi lanjut.

- Zona Discharge (AS1-AS2)

Zona ini menunjukkan fasies bikarbonat segar, dengan konsentrasi ion lebih rendah dan bentuk poligon Stiff yang ramping dan simetris. Air sungai ini merupakan keluaran dari danau dan membawa jejak kimia yang telah mengalami pencampuran. Studi di pesisir Kulonprogo menunjukkan bahwa air permukaan *discharge* memiliki karakter bikarbonat segar dengan waktu tinggal pendek dan pengaruh infiltrasi lokal (Thin, dkk., 2018). Hal ini mendukung bahwa AS1 dan AS2 merupakan hasil akhir dari sistem pelarutan dan pelepasan ion dari Danau Rayo.

- Zona Transisi (BR6)

Zona ini menunjukkan fasies campuran Ca-Mg-HCO₃ dengan posisi tengah pada diagram Piper dan bentuk poligon Stiff yang moderat. Zona ini merupakan penghubung antara airtanah dan air permukaan. Studi di Kabupaten Batang menunjukkan bahwa zona transisi dalam sistem airtanah dangkal ditandai dengan interaksi antara fasies karbonat, klorida dan campuran (Brillyanto, dkk., 2024). Dalam konteks Danau Rayo, BR6 sebagai airtanah dangkal di luar danau menunjukkan karakter yang serupa sehingga memperkuat bahwa zona transisi memiliki peran penting dalam *buffering* kimia dan pengaturan kualitas air.

Implikasi Geoheritage dan Kebijakan

Hasil karakterisasi fasies hidrokimia pada Geosite Danau Rayo memberikan kontribusi penting tidak hanya dalam aspek hidrogeologi, tetapi juga dalam hal geoheritage dan kebijakan pengelolaan sumber daya air. Secara hidrogeologi, daerah penelitian memperlihatkan keterkaitan antara tipe akuifer, proses geokimia dan kondisi geologi permukaan. Zona stagnan yang didominasi oleh fasies Ca-Mg-HCO₃ menunjukkan bahwa air tanah pada daerah penelitian masih dipengaruhi langsung oleh infiltrasi air meteorit atau hujan yang melarutkan mineral karbonat. Air pada zona ini bersifat segar dan bereaksi aktif, sehingga memiliki peran penting untuk zona *recharge* alami bagi sistem akuifer Danau Rayo dan indikator geoheritage hidrogeologi, seperti pada sistem karst Watuputih (Setiawan, dkk., 2020).

Sementara zona transisi dan discharge ini untuk menunjukkan dinamika pencampuran dan pelepasan air permukaan dengan implikasi langsung terhadap kebijakan tata kelola air dan mitigasi lingkungan. Pemetaan fasies dangkal dapat digunakan untuk merancang strategi *recharge* buatan, perlindungan zona resapan dan pengendalian pencemaran (Brillyanto, dkk., 2024). Hal ini penting dalam kebijakan konservasi airtanah, penyusunan rencana induk geoheritage dan integrasi aspek hidrogeokimia ke dalam perencanaan ruang dan ketahanan iklim. Pemahaman komposisi kimia air alami mineral merupakan dasar rasional untuk manajemen kualitas air (Hem, 1985), yang dapat digunakan sebagai acuan dalam penyusunan regulasi lokal, pengembangan indikator kualitas air berbasis fasies dan pelibatan masyarakat dalam pelestarian sumber daya geologi dan air.

6. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil menunjukkan pendekatan analisis kimia, validasi keseimbangan utama muatan (CBE) dan visualisasi diagram Piper serta Stiff dalam identifikasi zonasi fasies hidrokimia di kawasan geosite Danau Rayo. Hasil zonasi hidrokimia ini berada di bawah toleransi nilai CBE sehingga memperkuat validasi data untuk interpretasi geokimia. Adapun zonasi hidrokimia di Danau Rayo terdiri atas zona stagnan, zona discharge, dan zona transisi. Temuan ini memberikan kontribusi ilmiah terhadap pemahaman sistem

hidrogeologi serta mendukung pengelolaan geoheritage serta kebijakan konservasi sumber daya air berbasis zonasi fasies.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Direktorat Jenderal Riset dan Pengembangan, Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi atas dukungan pendanaan melalui Program Bantuan Operasional Perguruan Tinggi Negeri (BOPTN) skema Penelitian Riset Fundamental, sesuai dengan Kontrak Pelaksanaan Program Nomor: 109/C3/DT.05.00/PL/2025.

7. Daftar Pustaka

- Appelo, C., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution*. (2. edition, Ed.) CRC Press.
- Barkah, A. (2021). Identifikasi zona recharge dan discharge airtanah menggunakan pendekatan geokimia. *Jurnal Geosains Indonesia*, 9(2), 45-56.
- Brillyanto, A., Wibisana, M., Siregar, T., & Wilopo, W. (2024). Identification of shallow groundwater facies and flow patterns in Batang Regency, Central Java, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1378(1). doi:<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1378/1/012022>
- Chabi, B., Alassane, A., Kpegli, K., Lawson, F., Zakari, A., Koukpohounsi, B., . . . Boukari, M. (2023). Characterising groundwater and surface-water interconnections using hydrogeology, hydrochemistry and stable isotopes in the Ouémé Delta, southern Benin. *Hydrogeology Journal*, 31, 1229-1243. doi:<https://doi.org/10.1007/s10040-023-02645-2>
- Fudali, R., Milton, D., Fredriksson, K., & Dube, A. (1980). Morphology of Lonar Crater, India: Comparison and Implication. *The Moon and the Planets*, 23, 493-515.
- Hem, J. (1985). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water* (3rd edition ed.). Charlottesville, VA: U.S. Government Printing Office.
- Hendrayana, H., Thin, P., Wilopo, W., & Kawasaki, S. (2020). Control of aquifer weathering degree to the groundwater chemical composition in Wates Coastal Aquifer, Yogyakarta, Indonesia. *E3S Web of Conferences*, 200. doi:<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020002005>
- Holdt, K., Cantarella, V., Buchner, D., Leven, C., Mellage, A., Cirpka, O., & Duda, J.-P. (2025). Facies and depositional environments of a Holocene floodplain: Implications for modeling biogeochemical reactions in aquifers. *Hydrogeology Journal*. doi:<https://doi.org/10.1007/s10040-025-02928-w>
- Mussa, K., & Mjemah, I. (2023). Using hydrogeochemical facies and signatures for groundwater characterization and evolution assessment in aquifers with contrasting climate and geology in Tanzania. *Applied Water Science*, 13(201). doi:<https://doi.org/10.1007/s13201-023-01977-4>
- Piper, A. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Transactions of the American Geophysical Union*, 25, 914-928.
- Sari, M., Setiawan, B., & Idarwati. (2024). Danau Rayo from geoscience perspective: Is it a product of a meteor crater? *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 1424.
- Setiawan, T., Syah Alam, B., Haryono, E., & Hendarmawan. (2020). Hydrochemical and environmental isotopes analysis for characterizing a complex karst hydrogeological system of Watuputih area, Rembang, Central Java, Indonesia. *Hydrogeology Journal*, 28, 1635-1659. doi:<https://doi.org/10.1007/s10040-020-02128-8>
- Stiff, H. (1951). The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. *Journal of Petroleum Technology*, 3(10), 15-17.
- Todd, D., & Mays, L. (2015). *Grounwater Hydrology* (3rd edition ed.). Wiley.