

Karakteristik Hidrogeokimia dan Genesa Air Tanah di Kabupaten Nganjuk dan Sekitarnya, Provinsi Jawa Timur, Indonesia

Arief Rachmansyah^{1*}, Faridha Aprilia², Lili Retno Kusnaeni²

¹ Departemen Teknik Sipil, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia

² Departemen Fisika, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia

* Email: arieftub@ub.ac.id

Submitted: 2025-08-14 Revisions: 2025-10-24 Accepted: 2026-02-01 Published: 2026-02-05

©2026 Fakultas Geografi UGM dan Ikatan Geograf Indonesia (IGI)

©2026 by the authors. Majalah Geografi Indonesia.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons

Attribution (CC BY SA) <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Abstrak. Salah satu dampak penting dari perubahan iklim adalah pengelolaan air permukaan menjadi semakin sulit akibat pola hujan yang berubah, sehingga banyak pihak memanfaatkan air tanah sebagai sumber air baku. Selain kuantitas, pemanfaatan air tanah juga tergantung pada kualitasnya yang ditentukan oleh sejarah pembentukannya, jenis batuan yang dilewati, serta pencemaran. Di Kabupaten Nganjuk Provinsi Jawa Timur yang menjadi salah satu lumbung padi nasional banyak petani memanfaatkan air tanah untuk menutupi kekurangan air irigasi, namun di beberapa tempat mengalami penggaraman. Penyelidikan dilakukan pada 61 air sumur dan mata air untuk mengetahui sifat fisik dan kimia, selanjutnya dianalisis sebaran dan karakteristiknya, serta membuat model konseptualnya. Makalah ini menyajikan hasil studi karakterisasi geokimia, dan asal usul proses penggaraman air tanah. Berdasarkan karakteristik geokimianya air tanah di daerah penelitian dapat diklasifikasikan menjadi 5 fasies, yaitu fasies kalsium-magnesium-klorida ($\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^{2-}$), percampuran kalsium-natrium bikarbonat ($\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^+\text{-HCO}_3^{2-}$), percampuran kalsium-magnesium-klorida ($\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-Cl}^-$), kalsium-magnesium-klorida-sulfat ($\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-Cl}^-\text{-SO}_4^{2-}$), dan alkali-klorida sulfat ($\text{Na}^+\text{-K}^+\text{-Cl}^-\text{-SO}_4^{2-}$). Hasil kajian menunjukkan, bahwa air tanah payau hanya dijumpai di bagian utara daerah penelitian yang masuk dalam Zona Perbukitan Kendeng, khususnya di Formasi Kalibeng yang merupakan sedimen asal laut. Dengan demikian penggaraman air tanah di utara daerah penelitian bukan karena intrusi air laut.

Kata kunci: Air tanah; genesa; geokimia; air formasi; fasies air tanah

Abstract. One of the significant impacts of climate change is the surface water management is becoming increasingly difficult due to changing rainfall patterns, making groundwater the primary choice for raw water. In addition to quantity, groundwater utilization also depends on its quality, which is determined by its genesis, the type of rocks it passes through, and pollution. In Nganjuk Regency, East Java Province, which is one of the nation's rice granaries, many farmers use groundwater for irrigation to cover raw water shortages. In this regency and its surrounding areas, several water sources have been salinized. An investigation was conducted by taking 61 well and spring water samples to determine their cation and anion content, then analyzing their distribution and characteristics. This paper presents the results of a groundwater characterization study and the origins of the groundwater salinization process. Based on groundwater geochemical characteristics, five groundwater facies have been identified within the study area: calcium-magnesium-bicarbonate ($\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^{2-}$), Mixed calcium-sodium-bicarbonate ($\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^+\text{-HCO}_3^{2-}$), Mixed calcium-magnesium-chloride ($\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-Cl}^-$), Calcium-magnesium-chloride-sulfate ($\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-Cl}^-\text{-SO}_4^{2-}$), and Alkali-chloride-sulfate ($\text{Na}^+\text{-K}^+\text{-Cl}^-\text{-SO}_4^{2-}$). These facies reflect the diversity of hydrogeochemical processes and lithological influences present across the study area. The results of the study also indicate that brackish groundwater is found exclusively in the northern part of the study area, specifically within the Kendeng Hills Zone, and is primarily associated with the Kalibeng Formation which consists of marine-origin sedimentary rocks.

Keywords: Groundwater; genesis; geochemical; connate water; groundwater facies.

PENDAHULUAN

Air tanah merupakan salah satu sumber air baku yang penting bagi penyediaan air bersih untuk keperluan domestik, irigasi, dan industri (Fitts, 2002; Taylor et al, 2013; Ajami, 2021). Selama 20 tahun terakhir air tanah menjadi pilihan utama untuk memenuhi kebutuhan air bersih di Jawa Timur, karena keunggulannya dibandingkan dengan air permukaan, seperti kualitasnya yang lebih baik dan kemudahan untuk mendapatkannya (Hendrayana et al., 2023). Namun, tidak semua air tanah dapat dimanfaatkan untuk menunjang penyediaan air bersih, karena kualitasnya tidak memenuhi baku mutu, seperti salinitas tinggi akibat proses penggaraman

(Naslilmuna et al., 2018). Proses penggaraman air tanah dapat terjadi akibat intrusi air laut yang umum terjadi di kawasan pesisir (Rachmansyah et al., 2023; Vann et al., 2020), interaksi antara air tanah dengan batuan atau tanah yang dilewati (Hasan et al., 2018; Zghibi et al., 2019), atau akibat pencemaran lingkungan (Smith et al., 2020; Rachmansyah et al., 2021).

Kabupaten Nganjuk dan sekitarnya berada di bagian tengah pulau Jawa bagian timur. Secara fisiografi berada di antara Gunung Wilis di sebelah selatan yang termasuk dalam jalur gunungapi kuarter dan Perbukitan Kendeng di bagian utara (Bemmelen, 1949). Studi asal air tanah dengan metode isotop oleh Satrio et al. (2016) menunjukkan, bahwa zona isian

air tanah di Nganjuk berasal dari selatan yakni Gunung Wilis dan dari utara yang berasal dari Gunung Pandan. Potensi air tanah di wilayah Nganjuk tidak merata, ada wilayah dengan akuifer produktif seperti di wilayah selatan dan bagian tengah, daerah dengan potensi air tanah terbatas hingga sulit tersebar di bagian utara yang termasuk dalam Zona Perbukitan Kendeng. Di beberapa tempat dijumpai air tanah yang mengalami penggaraman di daratan (Poespowardoyo, 1984). Naslilmuna et al. (2018) menyebutkan, bahwa air tanah dengan salinitas tinggi di Desa Klintar diperkirakan akibat pencemaran oleh limbah pabrik kertas yang berada di sekitarnya. Berdasarkan kondisi tersebut, air tanah dengan salinitas tinggi di Kabupaten Nganjuk bukan diakibatkan oleh intrusi air laut.

Dalam peta geologi regional wilayah perbukitan Kendeng tersusun oleh batuan yang diendapkan di lingkungan laut (Pringgiprawiro & Sukardi, 2011), sehingga batuanannya berpotensi mengandung garam maupun air formasi. Oleh karena itu, penting dilakukan karakterisasi hidro-geokimia dan analisis proses penggaraman air tanah. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui persebaran air tanah yang mengalami proses penggaraman, serta menganalisis beberapa faktor penyebabnya. Hasil analisis akan ditampilkan dalam bentuk model konseptual sistem akuifer di daerah penelitian yang dapat digunakan sebagai dasar pengelolaan sumber daya air tanah yang berkelanjutan.

Penelitian ini dilakukan pada area seluas 1.976 km² yang secara administrasi masuk wilayah Kabupaten Nganjuk dan sekitarnya (Gambar 1). Sebagian besar area penelitian merupakan bagian Cekungan Air Tanah Brantas, sedangkan bagian utara termasuk non CAT. Topografi area penelitian bervariasi mulai dari dataran hingga perbukitan dengan ketinggian mulai 17 m hingga 2500 m. Tutupan lahan didominasi oleh sawah, diikuti oleh hutan, kebun dan permukiman.

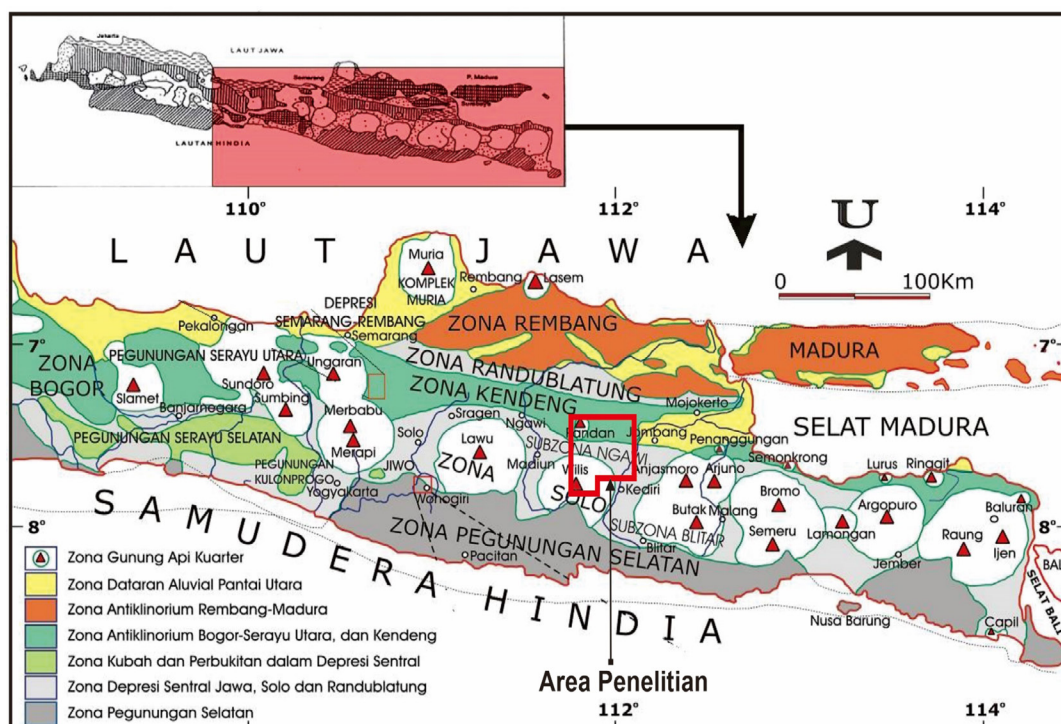
Secara fisiografis area penelitian terletak di 3 zona yaitu; Perbukitan Kendeng di bagian utara, Zona Gunungapi Kuartier

di bagian barat daya, dan Zona Solo, spesifiknya yaitu subzona Ngawi (Bemmelen, 1949) di bagian Barat (Gambar 1).

Zona Kendeng merupakan antiklinorium dengan sumbu lipatan berarah timur-barat yang berbentuk asimetris dan semakin ke timur berkurang intensitasnya. Zona ini terbentuk pada Miosen Atas sampai Pleistocene Atas. Satuan batuan di zona ini dari tua ke muda terdiri atas Formasi Kalibeng (TmPk), Sonde (TpsO), Pucangan (Qtp), dan Kabuh (Qpk) (Pringgiprawiro, & Sukido, 2011; Noya et al., 1992; Hartono et al., 1992; Santosa & Atmawinata, 1992). Formasi Kalibeng berumur Miosen Atas - Pliosen Bawah terdiri atas batu napal, setempat sisipan tuf, batupasir tufan dan kalkarenit. Di atas Formasi Kalibeng terendapkan Formasi Sonde pada Pliosen Tengah yang tersusun atas perselingan batulempung dan batupasir tufan, bersisipan batugamping. Selanjutnya terendapkan Formasi Pucangan pada Pliosen Atas yang terdiri atas breksi dan batupasir tufan. Di atas Formasi Pucangan terdapat Formasi Kabuh yang terdiri atas batuan konglomerat, batupasir, setempat bersisipan lempung dan napal yang terendapkan pada Plistosen.

Lipatan utama pada zona Kendeng terbentuk pada kala Plistosen Tengah ketika Formasi Kabuh terbentuk. Lipatan yang terbentuk kemudian tererosi pada bagian kubah atau puncak antiklin, sehingga Formasi Kalibeng terekspos di permukaan. Di atas formasi-formasi tersebut terdapat breksi vulkanik produk dari Gunung Api Pandan yang terbentuk pada Pleistosen Atas dan disebut Breksi Pandan (Qpv). Formasi paling muda di utara yang terbentuk pada Plistosen Atas yaitu Formasi Notopuro (Qpvn) yang tersusun atas tuf, batupasir tufan dan konglomerat.

Zona Gunung Api Kuartier G. Wilis yang terletak di area barat daya area penelitian tersusun oleh batuan vulkanik hasil dari aktivitas gunung-gunung yang disebut sebagai Pegunungan Wilis (Hartono & Baharuddin, 1986). Batuan vulkanik di area selatan ini terdiri atas lava andesit, breksi, dan aglomerat dari Morfonit Gajah Mungkur, Morfoset

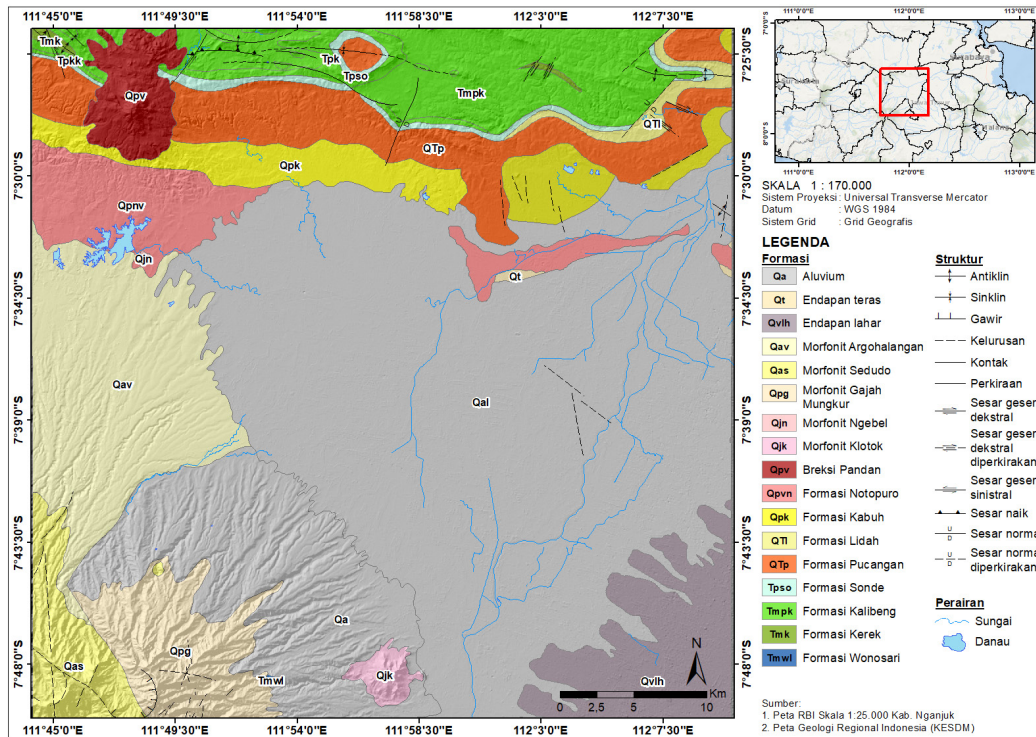


Gambar 1. Fisiografi Jawa Bagian Tengah dan Timur (modifikasi dari Bemmelen, 1949, dalam Hartono, 2010)

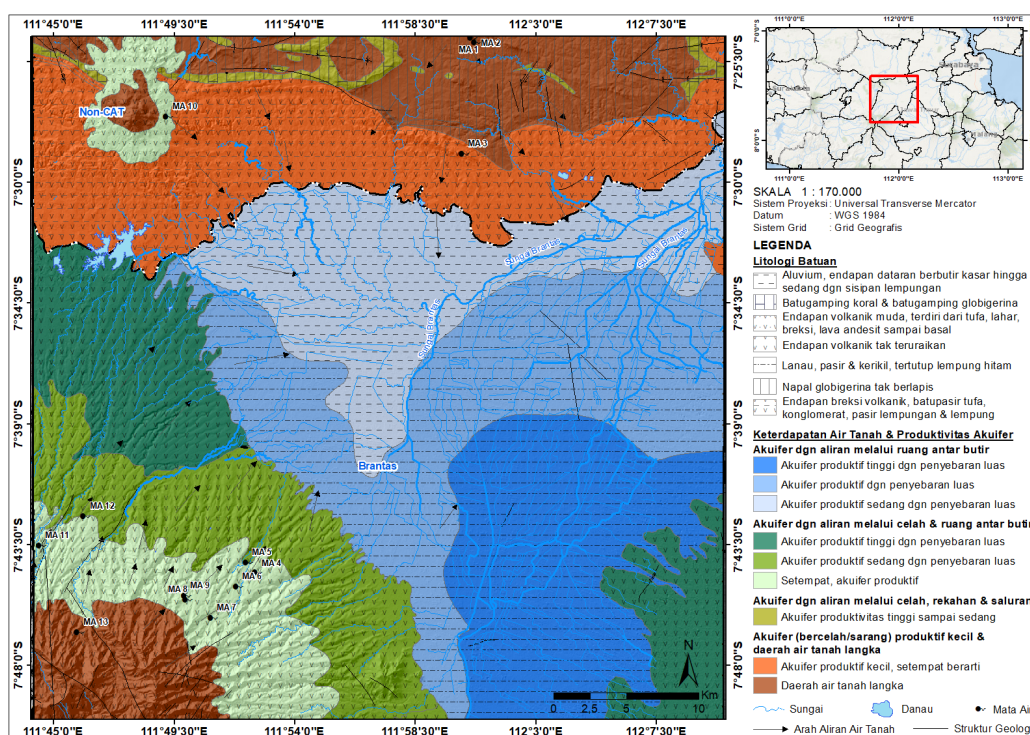
Pawonsewu, Morfonit Sedudo, dan Morfoset Argokalangan. Sisanya meliputi area tengah hingga batas timur dan selatan dari Zona Solo yang tersusun oleh endapan teras berupa konglomerat, pasir gunungapi, lempung, dan tuf serta endapan aluvium dengan ukuran butir lempung, pasir, kerikil, dan kerakal. Kondisi geologi area penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.

Formasi batuan yang berpotensi sebagai aquifer adalah endapan alluvium dan batuan gunungapi. Berdasarkan kondisi kemiringan topografi aliran air tanah di daerah penelitian

menuju bagian tengah - timur, dimana bagian utara mengarah ke selatan, dari barat daya (G Wilis) mengarah ke timur laut (Poespowardoyo, 1984). Meskipun demikian di lembah antar gunung ini tidak dijumpai akuifer tertekan, karena formasi batuan yang berfungsi sebagai akuifer terletak di lapisan paling atas. Selain itu, daerah imbuan di bagian barat daya terletak di kompleks G Wilis tidak cukup memberikan tekanan sehingga tidak bersifat terkekang. Luah mata air di lereng gunung Wilis juga tergolong kecil. Di bagian utara terdapat sejumlah mata air yang berhubungan dengan struktur patahan (Gambar 3).



Gambar 2. Peta Geologi Area Penelitian



Gambar 3. Hidrogeologi Area Penelitian (Poespowardoyo, 1984 dengan penyesuaian)

METODE PENELITIAN

Pengukuran dilakukan pada 61 titik meliputi 48 titik sumur gali dan 13 titik mata air. Pengukuran sifat fisik meliputi pH, TDS, DHL dan suhu dilakukan menggunakan *Water Test Kit* HI1285-5, dilakukan bersamaan dengan pengukuran muka air tanah. Hasil pengukuran sifat fisik dan muka air tanah digambar pada peta topografi digital yang diperoleh dari DEMNAS menggunakan perangkat lunak sistem informasi geografis. Pola aliran air tanah dibuat berdasarkan pengukuran muka air tanah pada sumur gali dan mata air yang kemudian diinterpolasi dengan metode Kriging. Metode ini dipilih karena memiliki akurasi yang lebih besar dalam menginterpolasikan kedalaman muka air tanah dibanding metode lain (Tayyab et al., 2023; Zowam et al., 2024).

Sejumlah sampel air tanah dari sumur gali (10 sampel) dan 5 sampel mata air dilakukan analisis laboratorium untuk mengetahui kandungan ion mayor Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , dan HCO_3^- . Selanjutnya kandungan ion mayor dianalisis dengan diagram *piper* dan *fingerprint* untuk mengetahui fasies air tanah dengan menggunakan perangkat lunak Easyquim. Mekanisme yang memengaruhi kimia air tanah diketahui melalui plot pada diagram Gibbs.

Data litologi diperoleh dari Peta Geologi Regional skala 1:100.000 Lembar Bojonegoro, Kediri, Madiun, dan Mojokerto, sedangkan data hidrogeologi berasal dari Peta Hidrogeologi Regional skala 1:250.000 Lembar Kediri. Kombinasi data litologi, hidrogeologi, pengukuran sifat fisik-kimia, analisis geokimia, serta interpretasi data geofisika digunakan untuk menyusun model konseptual area penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sifat fisik-kimia

Hasil pengujian sifat fisika-kimia air tanah meliputi Total Padatan Terlarut (TDS), Daya Hantar Listrik (DHL), pH, dan suhu serta hasil analisis ion mayor disajikan secara komprehensif dalam Tabel 1. Perhitungan *Charge Balance Error* (CBE) dilakukan untuk memastikan reabilitas dan

akurasi dari parameter kimia yang terukur (Hiscock & Bense, 2014). Distribusi spasial dari parameter fisika-kimia tersebut pada lokasi penelitian divisualisasikan pada Gambar 4. Interpolasi data suhu dan pH dilakukan menggunakan metode kriging karena setelah diuji coba dengan metode interpolasi lain, metode ini menghasilkan nilai eror yang lebih kecil (Tayyab et al., 2023). Interpolasi parameter TDS dan DHL diimplementasikan menggunakan *co-kriging* karena adanya korelasi yang sangat kuat antara kedua parameter tersebut. Penerapan *co-kriging* pada kedua parameter ini dapat meningkatkan akurasi hasil interpolasi secara signifikan dan menghasilkan nilai eror yang jauh lebih kecil (Alshahrani et al., 2025)

Persebaran TDS dan DHL dengan nilai tinggi mempunyai sebaran sama, yakni di bagian timur laut dengan nilai TDS 601-1.100 mg/L dan nilai DHL sebesar 1.201-2.005 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Nilai TDS dan DHL rendah berada di bagian barat daya dan sebagian kecil barat laut (titik MA 10) dengan nilai TDS sebesar 20-300 mg/L dan nilai DHL sebesar 85 – 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Nilai menengah relatif berada di bagian tengah dan timur laut dengan kisaran nilai TDS = 301-600 mg/L dan nilai DHL 601-1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Nilai TDS tinggi berada di daerah yang tersusun oleh batuan sedimen laut, yakni Formasi Kalibeng, Formasi Sonde, dan Formasi Pucangan. Kandungan garam pada formasi batuan tersebut diperkirakan sebagai penyebab tingginya nilai TDS. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Osenbruck et al. (2025) dan Bolaji et al. (2021), di mana air tanah pada batuan yang terbentuk di lingkungan laut mempunyai nilai TDS yang tinggi. Batuan yang terbentuk di lingkungan laut dalam berpotensi mengandung air formasi dengan kandungan garam tinggi, sehingga nilai TDS dan DHL juga tinggi. Hal ini juga sejalan dengan Hendrayana, et al. (2023), dimana air formasi dapat meningkatkan TDS dan DHL air tanah. Lebih lanjut, nilai TDS dan DHL yang tinggi berdekatan dengan area dengan struktur geologi berupa sesar, yakni di titik SG 22, SG 13, SG 15, dan SG 7. Keberadaan sesar dapat berperan sebagai

Tabel 1. Hasil Pengukuran Sifat Fisika-Kimia dan Analisis Ion Mayor Air Tanah

| Kode Sampel | Suhu °C | pH | TDS mg/L | DHL $\mu\text{S}/\text{cm}$ | Kation (meq/L) | | | | Anion (meq/L) | | | | CBE (%) |
|-------------|---------|-----|----------|-----------------------------|----------------|--------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|---------------|-----------------|---------|
| | | | | | Na^+ | K^+ | Ca^{2+} | Mg^{2+} | HCO_3^- | SO_4^{2-} | Cl^- | NO_3^- | |
| MA 1 | 27,8 | 6,6 | 330 | 670 | 0,24 | 0,04 | 0,07 | 0,39 | 0,47 | 0,03 | 0,17 | 0,25 | -11,10 |
| MA 7 | 25,5 | 6,9 | 60 | 150 | 0,29 | 0,05 | 0,10 | 0,46 | 0,80 | 0,00 | 0,21 | 0,03 | -7,33 |
| MA 9 | 25,7 | 6,6 | 60 | 170 | 0,27 | 0,07 | 0,11 | 0,51 | 0,86 | 0,00 | 0,51 | 0,03 | -19,13 |
| MA 10 | 27,3 | 6,8 | 140 | 340 | 0,06 | 0,09 | 0,19 | 0,10 | 1,57 | 0,08 | 0,34 | 0,13 | -65,64 |
| MA 11 | 26,6 | 5,8 | 30 | 110 | 0,17 | 0,04 | 0,05 | 0,23 | 0,47 | 0,00 | 0,08 | 0,00 | -7,16 |
| SG 5 | 29,8 | 6,4 | 460 | 940 | 0,28 | 0,22 | 0,74 | 0,13 | 4,62 | 0,90 | 1,07 | 0,08 | -65,75 |
| SG 7 | 27,9 | 7,2 | 670 | 1360 | 1,22 | 0,11 | 0,36 | 0,10 | 4,83 | 2,75 | 1,18 | 0,14 | -66,69 |
| SG 13 | 28,5 | 7,5 | 750 | 1530 | 0,97 | 0,11 | 0,38 | 0,34 | 4,23 | 8,80 | 3,31 | 0,01 | -80,17 |
| SG 14 | 28,7 | 6,5 | 570 | 1160 | 0,21 | 0,11 | 0,88 | 0,17 | 4,34 | 1,79 | 2,20 | 0,41 | -72,83 |
| SG 15 | 28,6 | 6,7 | 820 | 1650 | 0,90 | 0,09 | 0,82 | 0,15 | 5,24 | 2,70 | 5,36 | 0,06 | -74,47 |
| SG 22 | 29,2 | 7,1 | 670 | 1370 | 0,29 | 0,19 | 0,94 | 0,20 | 3,45 | 9,30 | 1,33 | 0,03 | -79,49 |
| SG 29 | 28,1 | 6,6 | 300 | 630 | 0,14 | 0,04 | 0,31 | 0,14 | 2,34 | 0,75 | 0,93 | 0,10 | -73,45 |
| SG 34 | 27,3 | 6,7 | 170 | 360 | 0,07 | 0,05 | 0,19 | 0,69 | 1,57 | 0,26 | 0,73 | 0,00 | -44,07 |
| SG 45 | 31,4 | 6,6 | 360 | 790 | 0,33 | 0,09 | 0,43 | 0,75 | 2,62 | 0,51 | 0,75 | 0,54 | -46,75 |
| SG 47 | 27,5 | 6,7 | 190 | 430 | 0,13 | 0,05 | 0,18 | 0,73 | 1,58 | 0,63 | 0,71 | 0,01 | -45,73 |

jalur pergerakan air tanah dalam ke bagian yang lebih dangkal, sehingga memicu terjadinya pencampuran air tanah dalam dengan nilai TDS dan DHL yang tinggi dan air tanah dangkal (Jiménez-Espinosa et al., 2024). Hal itu diinterpretasikan juga sebagai salah satu faktor penyebab tingginya nilai TDS dan DHL di wilayah tersebut.

Berdasarkan peta distribusi nilai pH di daerah penelitian (Gambar 4), menunjukkan kisaran nilai pH antara 6,6 sampai 7,5. Nilai pH tinggi (7,1 – 7,5) yang ditemukan pada titik SG 7, SG 13, dan SG 22 berkorelasi dengan nilai TDS dan DHL yang tinggi di bagian timur laut daerah penelitian. Nilai pH tinggi juga dipengaruhi oleh litologi batuan yang mengandung mineral karbonat seperti pada Formasi Notopuro (Qpvn), Formasi Kalibeng (TmPk), Formasi Kalibeng (TmPk), Formasi Lidah (QTI), Formasi Kabuh (QPk), dan Formasi Sonde (TpsO). Pelarutan mineral karbonat seperti kalsit (CaCO_3) dan dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) oleh air tanah akan meningkatkan konsentrasi ion bikarbonat (HCO_3^-) yang akan meningkatkan nilai pH (Burgess et al., 2023). Adanya litologi dominan batuan sedimen laut pada lokasi penelitian memfasilitasi keberadaan *connate water* yang memiliki kadar ion terlarut tinggi, termasuk HCO_3^- dan CO_3^{2-} (Hendrayana et al., 2023).

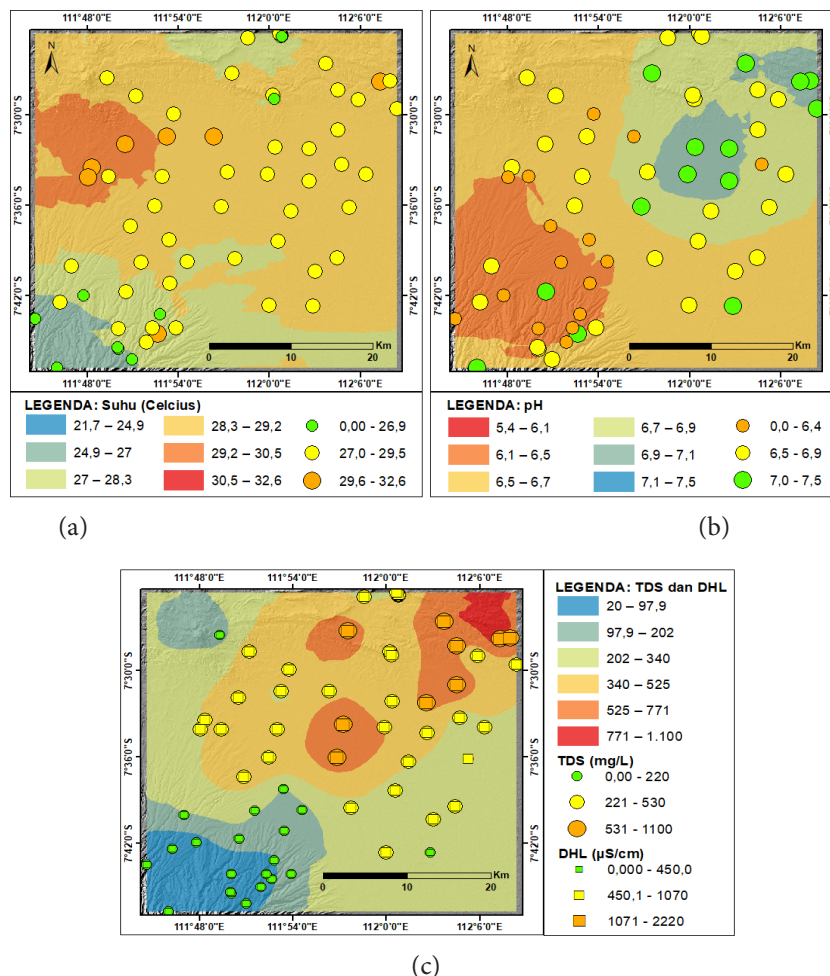
Nilai pH cenderung lebih rendah di bagian barat daya daerah penelitian yang secara litologi terdiri dari batuan vulkanik. Interaksi antara air-batuan vulkanik melalui proses pelapukan silikat, dissolusi mineral, dan pertukaran ion dapat menghasilkan air tanah yang sedikit asam (Razi et al., 2024; Poznanović Spahić et al., 2023). Selain itu, penggunaan pupuk yang berlebihan dapat meningkatkan kadar nitrat dalam air tanah melalui proses nitrifikasi yang merupakan reaksi

penghasil ion hidrogen (H^+). Peningkatan konsentrasi ion (H^+) ini menurunkan nilai pH air tanah dan menjadikannya lebih asam (Covaciu (Neamțu) et al., 2023).

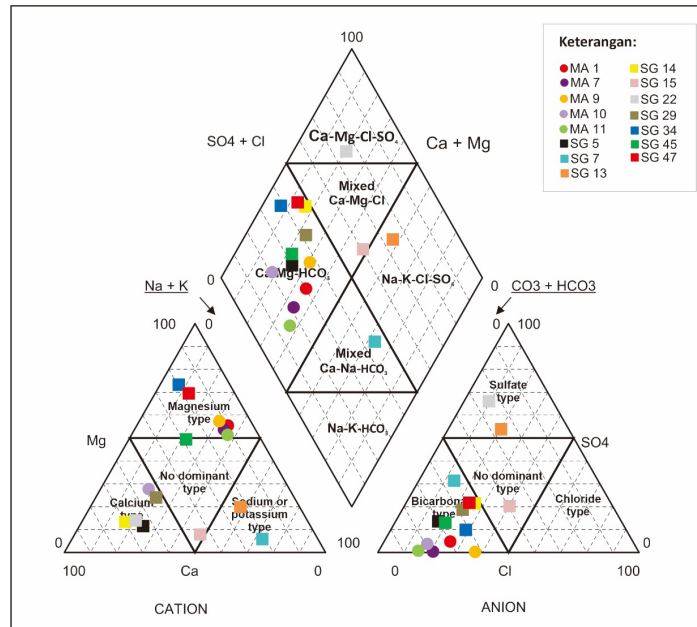
Hasil pemetaan menunjukkan suhu air tanah di daerah penelitian berkisar antara $27,1^\circ\text{C} - 32,6^\circ\text{C}$, dengan didominasi area dengan suhu air tanah $26,1^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}$. Air tanah dengan suhu rendah berada di wilayah barat daya area penelitian, yang merupakan kawasan gunung api dengan elevasi lebih tinggi. Sementara air tanah dengan suhu relatif tinggi dengan kisaran $30,1^\circ\text{C} - 32,6^\circ\text{C}$ berada di bagian tengah area penelitian dengan topografi daerah rendah pada area permukiman. Temperatur air tanah yang tidak berbeda signifikan menandakan bahwa aliran air tanah berada dalam sistem hidrogeologi yang sama dan mengalami pengaruh suhu lingkungan yang serupa.

Hidrokimia Air Tanah
Diagram Piper

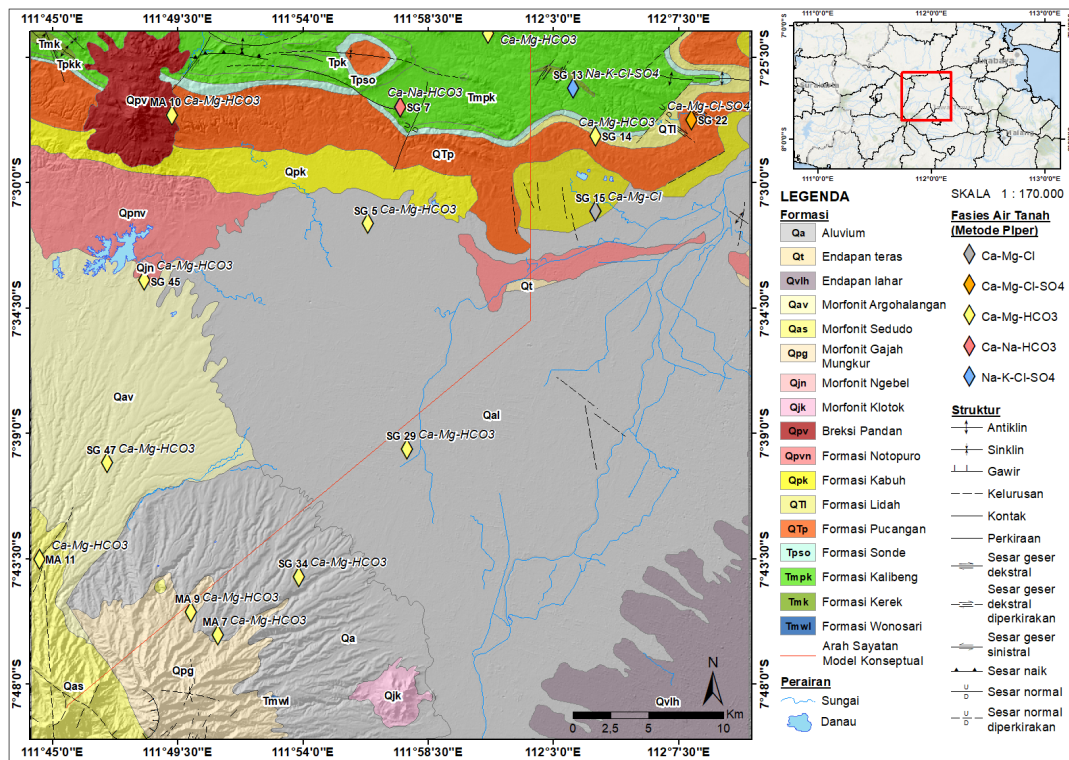
Penelitian hidrogeokimia terkait fasies air tanah dilakukan melalui analisis plot trilinear dari anion dan kation utama (Razi et al, 2024). Hasil analisis fasies air tanah menggunakan diagram *trilinear piper* dapat dilihat pada Gambar 5. Hasil analisis menunjukkan, bahwa di area penelitian dijumpai 5 fasies air tanah yaitu; fasies kalsium-magnesium-klorida ($\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^{2-}$) sejumlah 11 sampel, pencampuran kalsium-natrium bikarbonat ($\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^+\text{-HCO}_3^{2-}$) sejumlah 1 sampel, pencampuran kalsium-magnesium-klorida ($\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-Cl}^-$) sejumlah 1 sampel, kalsium-magnesium-klorida-sulfat ($\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-Cl}^-\text{-SO}_4^{2-}$) sejumlah 1 sampel, dan alkali-klorida sulfat ($\text{Na}^+\text{-K}^+\text{-Cl}^-\text{-SO}_4^{2-}$) sejumlah 1 sampel.



Gambar 4. Peta Sebaran Nilai (a) Suhu, (b) pH, (c) TDS dan DHL



Gambar 5. Plotting hasil analisis hidrokimia sampel air tanah pada diagram trilinear piper



Gambar 6. Peta Sebaran Fasies Air Tanah berdasarkan Metode Piper yang digambar di atas peta geologi

Fasies air tanah $\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^{2-}$ mendominasi area penelitian dengan persentase 77,33 %. Persebaran fasies air tanah $\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^{2-}$ terdapat pada batuan vulkanik dan endapan aluvium. Persebaran tersebut dapat dilihat pada Gambar 6. Batuan vulkanik atau lingkungan vulkanik menjadi faktor utama yang berpengaruh terhadap kandungan Ca^{2+} dan Mg^{2+} (Hendrayana et al., (2023); Toulrier et al., (2019); Irawan et al., (2009) dalam Hendrayana et al. (2024)). Ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} umumnya berasal dari mineral amfibol dan piroksen (Todd & Mays, 2005). Hal tersebut terjadi karena air tanah di area ini berasal dari batuan vulkanik sehingga kandungan ionnya serupa. Fasies dengan kandungan ion $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^{2-}$ terletak pada Zona Kendeng. Kandungan ion klorida

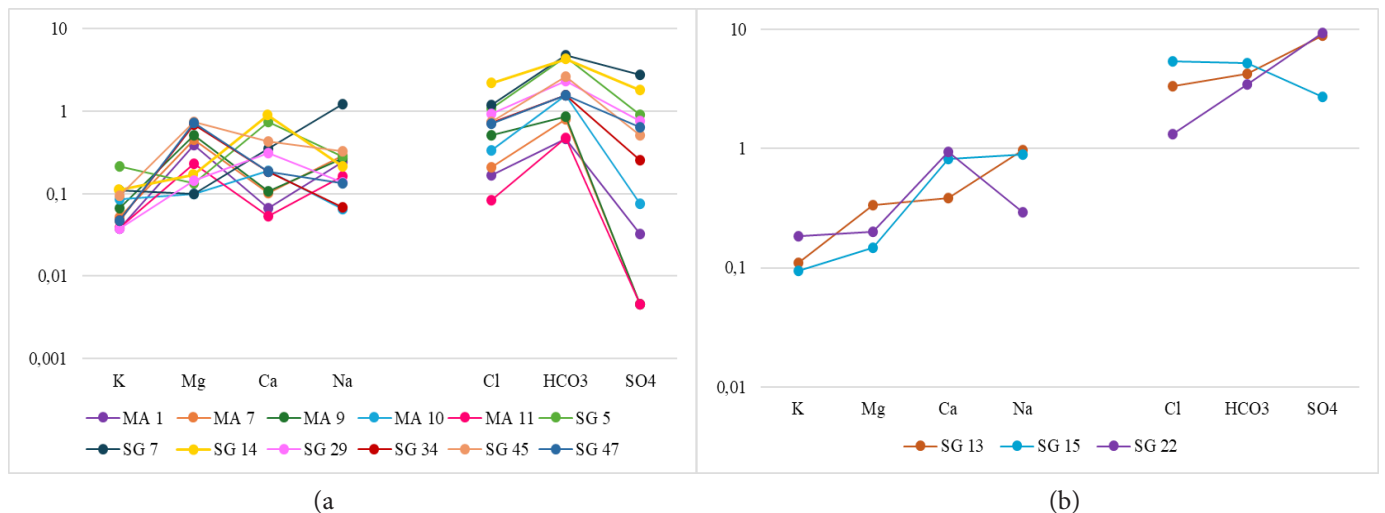
yang lebih tinggi dari bikarbonat menunjukkan bahwa air tanah berasal dari lokasi yang lebih dalam. Dilihat dari litologi penyusun di Zona Kendeng dan stratigrafinya, kandungan klorida merupakan berasal dari *connate water* atau air laut yang terperangkap dalam batuan (Bolaji et al. 2021).

Diagram Fingerprint

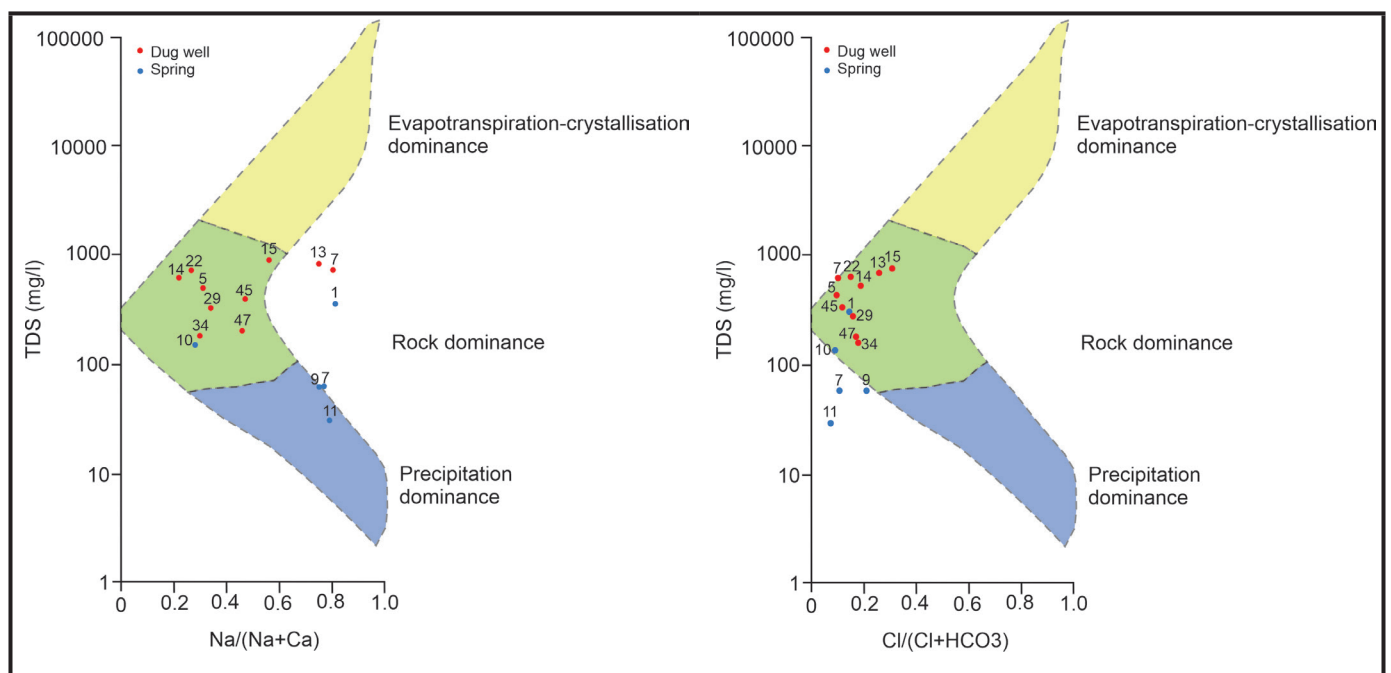
Analisis ion mayor dilakukan menggunakan diagram *fingerprint* untuk mengkarakterisasi sistem akuifer berdasarkan kemiripan pola ion kation dan anion, Pola yang serupa mengindikasikan konektivitas dan asal akuifer yang sama, sementara perbedaan pola menunjukkan air tanah berasal dari akuifer yang berbeda (Maheswari et al., 2023).

Dari analisis menggunakan *fingerprint diagram* didapatkan 7 pola air tanah pada area penelitian yang menunjukkan kesamaan sumber air tanah. Pola 1 yaitu tipe air tanah dengan kandungan ion $K^+ < Mg^{2+} > Ca^{2+} < Na^+$ dan kandungan anion HCO_3^- lebih tinggi daripada Cl^- dan SO_4^{2-} sebanyak 4 sampel. Pola kedua memiliki $K^+ < Mg^{2+} < Ca^{2+} > Na^+$ dan kandungan anion HCO_3^- lebih tinggi daripada Cl^- dan SO_4^{2-} sebanyak 4 sampel. Pola 3 memiliki $K^+ < Mg^{2+} > Ca^{2+} > Na^+$ dan kandungan anion HCO_3^- lebih tinggi daripada Cl^- dan SO_4^{2-} sebanyak 3 sampel. Pola 4 memiliki ciri utama pada komposisi $K^+ < Mg^{2+} < Ca^{2+} < Na^+$ dimana SO_4^{2-} lebih tinggi daripada Cl^- dan HCO_3^- dengan jumlah sebanyak 1 sampel. Pola 5 dicirikan dengan kandungan ion $K^+ < Mg^{2+} < Ca^{2+} > Na^+$ dengan kandungan SO_4^{2-} lebih tinggi dari anion lainnya sebanyak 1 sampel. Pola 6 memiliki ciri $K^+ > Mg^{2+} < Ca^{2+} < Na^+$ dengan kandungan ion HCO_3^- lebih tinggi dari anion lainnya sebanyak 1 sampel. Terakhir, terdapat Pola 7 dengan kandungan kation $K^+ < Mg^{2+} < Ca^{2+} < Na^+$ dengan anion Cl^- mendominasi sebanyak 1 sampel.

Pola-pola tersebut dapat disederhanakan menjadi dua sistem utama yang mencerminkan air tanah regional yaitu tipe Ca-Mg- HCO_3 dan tipe Na-Cl atau Na- SO_4 (lihat Gambar 7). Pembagian ini dikaitkan dengan hasil analisis air tanah menggunakan diagram Piper dimana fasies Ca^{2+} - Mg^{2+} - HCO_3^- dan Ca^{2+} - Na^+ - HCO_3^- termasuk dalam sistem 1 yang dicirikan oleh kandungan anion HCO_3^- lebih tinggi daripada Cl^- dan SO_4^{2-} dan kation didominasi oleh $K^+ < Mg^{2+} < Ca^{2+}$. Pola ini terdapat pada daerah penelitian yang litologinya tersusun oleh batuan vulkanik dan endapan aluvial (Hendrayana *et al.*, 2023; Hendrayana *et al.*, 2024). Sistem 2 merupakan fasies Ca^{2+} - Mg^{2+} - Cl^- , Ca^{2+} - Mg^{2+} - Cl^- - SO_4^{2-} , dan Na^+ - K^+ - Cl^- - SO_4^{2-} dalam analisis Piper. Dicirikan oleh dominasi anion Cl^- dan SO_4^{2-} dan kandungan kation $K^+ < Mg^{2+} < Ca^{2+} < Na^+$. Sistem yang beragam di area utara daerah penelitian disebabkan oleh kompleksitas litologi dan juga dipengaruhi oleh struktur geologi di area tersebut.



Gambar 7. (a) Diagram *fingerprint* sistem 1 (tipe Ca-Mg- HCO_3) dan (b) Diagram *fingerprint* sistem 2 (tipe Na-Cl atau Na- SO_4)



Gambar 8. Plot Diagram Gibbs untuk a) ion $Na/(Na+Ca)$ dan b) $Cl/(Cl+HCO_3)$ dengan nilai TDS

Tabel 2. Hubungan pH, TDS, DHL, Litologi, Fasies Piper, dan Posisi Sampel pada Diagram Gibbs

| Sampel | pH | TDS (mg/L) | DHL ($\mu\text{S/cm}$) | Litologi Dominan | Fasies pada Diagram Piper | Posisi pada Diagram Gibbs |
|--------|----|---------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|--|
| MA 1* | 7 | 330 | 670 | Napal (TmPk) | Ca-Mg-HCO ₃ | Rock dominance |
| MA 7 | 7 | 60 | 150 | Endapan aluvium (Qal) | Ca-Mg-HCO ₃ | Precipitation dominance |
| MA 9 | 7 | 60 | 170 | Lava andesit (Qpg) | Ca-Mg-HCO ₃ | Precipitation dominance |
| MA 10 | 7 | 140 | 340 | Breksi gunung api (Qpv) | Ca-Mg-HCO ₃ | Rock dominance |
| MA 11 | 6 | 30 | 110 | Lava andesit (Qas) | Ca-Mg-HCO ₃ | Precipitation dominance |
| SG 5 | 6 | 460 | 940 | Endapan aluvium (Qal) | Ca-Mg-HCO ₃ | Rock dominance |
| SG 7* | 7 | 670 | 1360 | Napal (TmPk) | Ca-Na-HCO ₃ | Rock dominance (mendekati evapotranspiration dominance) |
| SG 13* | 8 | 750 | 1530 | Napal (TmPk) | Na-K-Cl-SO ₄ | Rock dominance (mendekati evapotranspiration dominance) |
| SG 14* | 7 | 570 | 1160 | Batu lempung (QTI) | Ca-Mg-HCO ₃ | Rock dominance |
| SG 15* | 7 | 820 | 1650 | Konglomerat, batupasir (Qpk) | Ca-Mg-Cl | Rock dominance (mendekati evapotranspiration dominance) |
| SG 22* | 7 | 670 | 1370 | Breksi, batupasir tufan (QTp) | Ca-Mg-Cl-SO ₄ | Rock dominance |
| SG 29 | 7 | 300 | 630 | Endapan aluvium (Qal) | Ca-Mg-HCO ₃ | Precipitation dominance |
| SG 34 | 7 | 170 | 360 | Endapan aluvium (Qal) | Ca-Mg-HCO ₃ | Precipitation dominance |
| SG 45 | 7 | 360 | 790 | Breksi gunung api (Qav) | Ca-Mg-HCO ₃ | Rock dominance |
| SG 47 | 7 | 190 | 430 | Breksi gunung api (Qav) | Ca-Mg-HCO ₃ | Rock dominance |

Catatan: *) sampel pada bagian timur laut daerah penelitian dengan litologi batuan sedimen laut.

Analisis Genesa Air Tanah

Kandungan ion dalam air tanah dapat diketahui sumbernya dengan diagram Gibbs. Diagram ini menggunakan perbandingan ion $\text{Na}/(\text{Na} + \text{Ca})$ atau ion $\text{Cl}/(\text{Cl} + \text{HCO}_3)$ yang dihitung dalam satuan meq/L sebagai sumbu absis dan TDS (mg/l) sebagai ordinat untuk mengetahui sumber ion pada air tanah seperti mekanisme evapotranspirasi, pelapukan (*rock dominance*), atau presipitasi (Gibbs, 1970). Pada diagram Gibbs, apabila suatu sampel air tanah berada pada posisi bagian kanan bawah yang ditandai dengan nilai TDS rendah tetapi rasio $\text{Na}/(\text{Na} + \text{Ca})$ serta $\text{Cl}/(\text{Cl} + \text{HCO}_3)$ relatif lebih tinggi, maka komposisi kimia air tanah dipengaruhi oleh presipitasi dan masih mengalami proses pelapukan yang dominan. Sebaliknya, nilai TDS yang tinggi disertai rasio $\text{Na}/(\text{Na} + \text{Ca})$ dan $\text{Cl}/(\text{Cl} + \text{HCO}_3)$ yang tinggi pula mengindikasikan bahwa proses evaporasi memiliki pengaruh dominan terhadap kondisi kimia air tanah (Razi et al., 2024).

Nilai perbandingan ion dengan TDS pada 15 sampel air tanah di area penelitian dapat dilihat pada Gambar 8 dimana sampel air tanah dari mata air (MA) ditandai oleh titik biru dan sampel dari sumur gali (SG) ditandai oleh titik merah. Dalam penelitian ini sebagian besar sampel berada pada zona *rock dominance*. Proses yang memengaruhi kimia air tanah di area penelitian didominasi oleh mekanisme interaksi batuan dengan air tanah (Razi et al., 2024). Kandungan ion pada mata air 7, 9, dan 11 menunjukkan bahwa air tanah di lokasi tersebut dipengaruhi oleh proses presipitasi. Pada beberapa sampel (sumur gali 7, 13, dan 15), mekanisme yang dominan masih berupa interaksi batuan-air tanah, namun kecenderungannya mulai mengarah pada proses evapotranspirasi (Shuaibu et al., 2025). Hubungan antara parameter fisika-kimia seperti pH, TDS, DHL, dan kondisi litologi dengan fasies Piper serta posisi sampel pada diagram Gibbs dapat dilihat pada Tabel 2.

Model Konseptual dan Hubungan Batuan dengan Air Tanah Model Konseptual

Model konseptual hidrogeologi pada Gambar 9 menampilkan penampang dua dimensi sistem air tanah di area penelitian. Model ini berfokus pada akuifer bebas (*unconfined aquifer*) karena data primer berasal dari observasi dan pengukuran pada sumur gali serta mata air dangkal. Penyusunan model didasarkan pada analisis geokimia air tanah, penampang 2D penyebaran litologi, serta model 3D akuifer Kabupaten Nganjuk hasil interpretasi resistivitas metode VES (DLH Kabupaten Nganjuk, 2024). Zonasi vertikal dan horizontal dalam model juga mengacu pada interpretasi geologi permukaan dari peta geologi regional skala 1:100.000 (Lembar Bojonegoro, Kediri, Madiun, dan Mojokerto) serta peta hidrogeologi skala 1:250.000 (Lembar Kediri).

Pada Gambar 9 dapat dilihat model sistem akuifer di lokasi penelitian yang terbagi menjadi 4 satuan hidrostratigafi. Satuan pertama merupakan akuifer/akuifer rekahan yang berada di sisi selatan daerah penelitian. Satuan ini memiliki litologi lava andesit dan breksi vulkanik. Area ini merupakan akuifer rekahan (Poespowardoyo, 1984) di mana air tanah dapat tersimpan pada celah batuan yang terbentuk akibat struktur. Satuan hidrostratigrafi kedua adalah akuifer yang berada pada bagian tengah daerah penelitian yang dapat menyimpan dan mengalirkan air dalam jumlah besar (Poespowardoyo, 1984). Area ini memiliki penyebaran yang luas dari area Gunung Wilis ke arah utara hingga area Kota Nganjuk dengan material penyusun lempung, pasir, kerikil, dan kerakal serta breksi gunungapi.

Satuan hidrostratigrafi ketiga adalah akuitard I yang termasuk dalam Zona Kendeng bagian selatan dengan batuan penyusun berupa konglomerat, batupasir tufan, breksi, batugamping, kalkarenit, dengan sisipan lempung, napal,

dan tuf. Satuan hidrostratigrafi keempat adalah akuitard II yang terletak pada zona fisiografi Perbukitan Kendeng. Area ini secara hidrostratigrafi merupakan akuitard yang dapat menyimpan air namun hanya dapat mengalirkannya dalam jumlah yang terbatas, areanya dapat dikatakan sebagai daerah air tanah langka (Poespowardoyo, 1984). Sistem ini tersusun oleh batuan napal, setempat sisipan tuf, batupasir tufan, kalkarenit, perselingan batulempung dan batupasir tufan bersisipan batugamping. Area imbuhan air tanah terletak di sisi selatan area penelitian yakni di area Gunung Wilis ke arah utara. Arah aliran air tanah secara umum mengalir menuju area tengah area penelitian, ke arah Kota Nganjuk.

Hubungan Kimia Air Tanah dengan Batuan

Berdasarkan model konseptual, beberapa sifat parameter fisik-kimia dan geokimia air tanah pada area penelitian dapat diidentifikasi. Model konseptual dan analisis genesa air tanah menggunakan diagram Gibbs menunjukkan bahwa, secara umum, air tanah di area penelitian terbagi menjadi dua bagian mengikuti fisiografi regionalnya, yaitu Zona Gunung Api Kuartar-Solo pada bagian selatan dan Zona Kendeng di bagian utara daerah penelitian.

Pada fisiografi Zona Gunung Api Kuartar G. Wilis dan Zona Solo, batuanya merupakan produk vulkanik Gunung Wilis dan endapan aluvium. Analisis diagram Piper menunjukkan daerah ini memiliki geokimia air tanah yang seragam yakni $Ca^{2+}-Mg^{2+}-HCO_3^-$ dengan arah aliran air tanah dari selatan ke utara. Fasies ini mencerminkan pengaruh batuan vulkanik terhadap kimia air tanah, di mana Ca^{2+} dan Mg^{2+} terutama berasal dari pelapukan mineral amfibol dan piroksen (Todd & Mays, 2005; Hendrayana et al., 2024). Dari segi sifat fisika-kimia, nilai pH rendah (5,8–6,5) yang terletak di bagian selatan dan barat daya yang berkaitan dengan interaksi air tanah dengan batuan vulkanik serta proses nitrifikasi akibat penggunaan pupuk pertanian dapat menghasilkan air tanah yang lebih asam (Razi et al., 2024; Poznanović Spahić et al., 2023; Covaciu (Neamțu) et al., 2023).

Pada fisiografi regional Zona Kendeng, batuanya terdiri atas campuran produk vulkanik dan sedimen yang terendapkan pada lingkungan laut. Batuan yang beragam ditambah kompleksitas struktur di area tersebut menyebabkan air tanah memiliki fasies yang bervariasi yaitu $Ca^{2+} - Mg^{2+} - Cl^-$, $Ca^{2+}-Mg^{2+}-Cl^- - SO_4^{2-}$, dan $Na^+ - K^+ - Cl^- - SO_4^{2-}$. Dominasi anion Cl^- dan SO_4^{2-} menunjukkan pengaruh litologi sedimen laut serta indikasi keberadaan air tanah dari kedalaman lebih besar

(Bolaji et al. 2021). Nilai TDS, DHL, dan pH relatif tinggi (7,1–7,5) pada bagian timur dipengaruhi oleh litologi kaya mineral karbonat yang berasosiasi dengan lingkungan pengendapan laut (Formasi Notopuro, Kalibeng, Lidah, Kabuh, Sonde) sebab pelarutan kalsit dan dolomit meningkatkan konsentrasi HCO_3^- yang berperan dalam menaikkan nilai pH (Burgess et al., 2023). Formasi-formasi ini juga berpotensi mengandung connate water dengan kadar ion terlarut tinggi karena proses pengendapannya yang berasosiasi dengan lingkungan laut (Osenbruck et al., 2025; Bolaji et al., 2021; Hendrayana et al., 2023). Keberadaan sesar di titik SG 7, SG 13, SG 15, dan SG 22 turut meningkatkan nilai TDS dan DHL karena struktur geologi dapat berperan sebagai jalur naiknya air tanah dalam menuju zona air tanah dangkal (Jiménez-Espinosa et al., 2024).

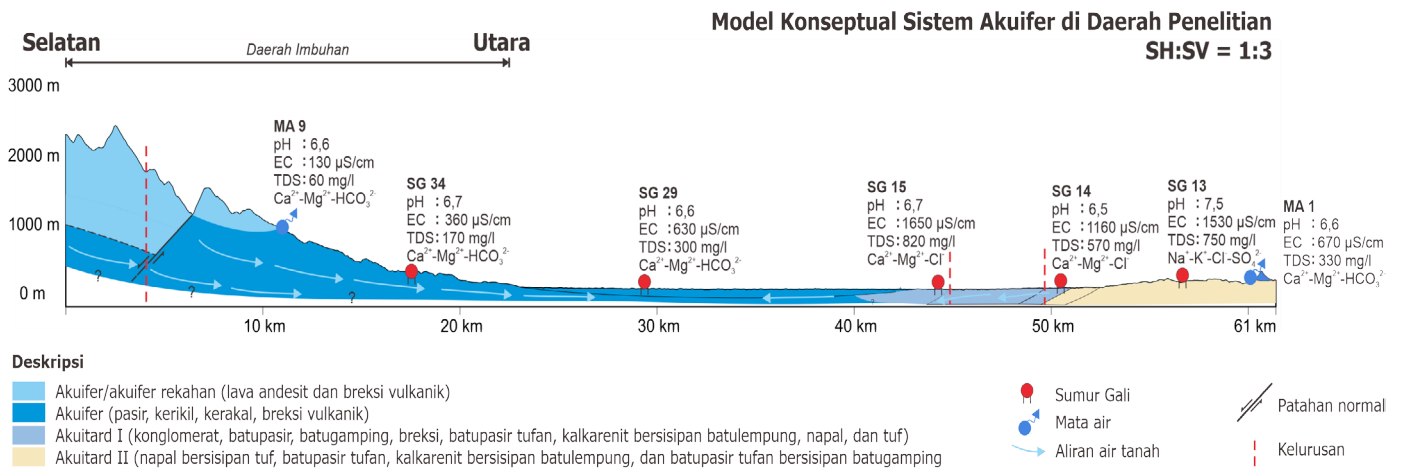
Hasil analisis posisi sampel pada diagram Gibbs menunjukkan bahwa interaksi air tanah dengan batuan adalah mekanisme utama yang mengontrol kondisi kimia air tanah. Pada fisiografi Zona Gunung Api Kuartar G. Wilis dan Zona Solo, sampel mata air (MA 7, 9, dan 11) menunjukkan kecenderungan pengaruh presipitasi, sementara beberapa sampel sumur gali (SG 7, SG 13, SG 15) mulai menunjukkan adanya pengaruh evapotranspirasi pada fisiografi regional Zona Kendeng, meskipun interaksi batuan tetap dominan.

KESIMPULAN

Area penelitian terbagi menjadi dua zona hidrogeologi utama, yaitu Zona Gunung Api Kuartar G. Wilis dan Zona Solo di bagian selatan dan Zona Kendeng di bagian utara. Zona selatan tersusun atas batuan vulkanik dan endapan aluvium, sedangkan zona utara didominasi campuran batuan vulkanik–sedimen laut dengan struktur geologi kompleks berupa sesar dan lipatan. Perbedaan fisiografi dan litologi inilah yang mengontrol evolusi kimia air tanah.

Nilai TDS (20–1100 mg/L), DHL (86–2005,2 $\mu S/cm$) serta pH (5,4–7,5) menunjukkan pola spasial yang konsisten dengan kondisi litologi, yaitu meningkat ke arah timur laut yang dipengaruhi oleh satuan sedimen laut serta struktur geologi yang memungkinkan naiknya air tanah dalam. Nilai pH yang relatif rendah juga ditemukan pada area pemukiman dan pertanian sehingga kondisi ini diperkirakan berkaitan dengan aktivitas antropogenik.

Analisis fasies geokimia menunjukkan lima kelompok utama, mulai dari $Ca-Mg-HCO_3$ yang mendominasi zona vulkanik hingga $Na-Cl-SO_4$ yang muncul pada zona sedimen



Gambar 9. Model Konseptual Hidrogeologi

laut. Transisi fasies dari selatan ke utara ini mencerminkan evolusi kimia air tanah yang dipengaruhi oleh interaksi air tanah dengan batuan serta pengaruh struktur geologi. Di bagian selatan, pelapukan mineral vulkanik menghasilkan fasies bikarbonat yang relatif seragam. Sedangkan di bagian utara, kombinasi litologi sedimen laut, mulai adanya pengaruh proses evapotranspirasi–kristalisasi, serta adanya potensi *connate water* menghasilkan fasies yang lebih beragam. Indikasi awal keberadaan *connate water* muncul terutama pada satuan sedimen laut di bagian timur laut, namun kesimpulan ini masih membutuhkan pengujian lanjutan.

Analisis diagram Gibbs memperlihatkan bahwa interaksi air tanah dengan batuan merupakan proses utama yang mengontrol kimia air tanah pada daerah penelitian, dengan adanya pengaruh air meteorik di barat daya daerah penelitian (Zona Gunung Api Kuarter G. Wilis dan Zona Solo) dan mulai adanya pengaruh evapotranspirasi–kristalisasi pada bagian barat laut (Zona Kendeng). Pembahasan mengenai evolusi kimia air tanah pada sistem transisi vulkanik–sedimen ini belum banyak dikaji di Jawa Timur, khususnya dengan mengintegrasikan fasies hidrogeokimia, struktur geologi, dan persebaran parameter fisik–kimia.

Penelitian ini memiliki keterbatasan dalam analisisnya, terutama dalam hasil perhitungan CBE pada sebagian besar sampel sumur gali (SG) di daerah penelitian yang menunjukkan nilai sangat besar dan negatif, berkisar antara –41,5% hingga –80,16%. Nilai negatif yang signifikan ini mengindikasikan adanya defisit kation atau kelebihan anion yang tidak seimbang dalam perhitungan muatan ion. Tingginya konsentrasi anion HCO_3^- , SO_4^{2-} , dan Cl^- terutama pada sampel sumur gali dapat disebabkan oleh kontaminasi dari irigasi, pupuk sintetis dan kompos, limbah domestik dan industri, rembesan, serta proses nitrifikasi dari lubang jamban (Goni et al., 2023; Shuaibu et al., 2025).

SARAN

Tingginya nilai CBE menunjukkan adanya keterbatasan pada data kimia yang dianalisis, sehingga pada penelitian selanjutnya diperlukan upaya untuk memperoleh sampel air tanah yang paling mendekati kondisi alami, khususnya dengan meminimalkan pengaruh aktivitas antropogenik pada titik pengambilan sampel.

Selain itu, karena transisi hidrogeokimia antara lingkungan vulkanik–sedimen merupakan fenomena yang jarang dikaji di Jawa Timur, studi lanjutan perlu diarahkan untuk memperdalam pemahaman mengenai evolusi kimia air tanah pada zona peralihan tersebut. Untuk mengonfirmasi lebih kuat keberadaan *connate water* serta proses-proses geokimia yang terjadi, disarankan melakukan analisis isotop atau metode pendukung lainnya yang dapat memberikan bukti terhadap interpretasi hidrogeokimia yang telah diperoleh.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi yang tulus kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penelitian ini. Terima kasih khusus ditujukan kepada Departemen Teknik Sipil, Universitas Brawijaya, dan Departemen Fisika, Universitas Brawijaya, atas dukungan administratif dan fasilitas yang diberikan. Kami juga mengucapkan terima kasih kepada individu dan institusi yang telah membantu dalam perizinan, akses data, penyediaan peralatan, asistensi penelitian, dan diskusi pakar.

KONTRIBUSI PENULIS

Penulis pertama berkontribusi dalam merencanakan penelitian, menyusun kerangka dan memperbaiki naskah publikasi. **Penulis kedua** berkontribusi dalam membuat menganalisis data, dan menyusun draf naskah publikasi. **Penulis ketiga** berkontribusi dalam pengambilan data, analisis data, dan menyusun draf naskah publikasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ajami, H. (2021). *Geohydrology: Groundwater*. Dalam *Encyclopedia of Geology* (2nd ed., pp. 408–415).
- Alshahrani, A., Ahmad, M., Laiq, M., & Nabi, M. (2025). Geostatistical analysis and multivariate assessment of groundwater quality. *Scientific Reports*, 15(1), 7435. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91055-3>
- Bemmelen, R. W. van. (1949). *The geology of Indonesia* (Vol. IA). The Hague, Netherlands: The Hague.
- Bolaji, T. A., Oti, M. N., Onyekonwu, M. O., Bamidele, T., Osuagwu, M., Chiejina, L., & Elendu, P. (2021). Preliminary geochemical characterization of saline formation water from Miocene reservoirs, offshore Niger Delta. *Heliyon*, 7, e06281. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06281>
- Burgess, S. A., Branam, T. D., & Florea, L. J. (2023). Divergent geochemical pathways of carbonate aquifer evolution in a classic karst terrain: (2) Groundwater source delineation using regional water chemistry data. *Water*, 15(19), 3436. <https://doi.org/10.3390/w15193436>
- Covaciu (Neamtu), D. C., Balint, A. C., Neamtu, C. V., Moşneag, S. C., Bordea, D., Dirjan, S., & Odagiu, A. C. M. (2023). Assessment of groundwater quality in relation to organic versus mineral fertilization. *Water*, 15(16), 2895. <https://doi.org/10.3390/w15162895>
- Fitts, C. R. (2002). *Groundwater science*. London, UK: Academic Press.
- Gibbs, R. J. (1970). Mechanism controlling world's water chemistry. *Science*, 170, 1088–1090.
- Goni, I., Vassolo, S., Sheriff, M., Aji, M., Bura, B., & Ibrahim, Y. (2023). Geochemical and isotopic studies in parts of the Hadejia–Jamaare–Komadugu–Yobe Basin, NE Nigeria. *Hydrogeology Journal*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s10040-023-02637-2>
- Hartono, U., & Baharuddin. (1986). Morfostratigrafi batuan Gunungapi Wilis, Jawa Timur. *PIT IAGI*, 2, 738–746.
- Hartono, U., Baharuddin, & Brata, K. (1992). *Geologic map of the Madiun Quadrangle, East Java* [Peta geologi]. Center for Geological Survey.
- Hasan, M., Shang, Y., Akhter, G., & Jin, W. (2018). Delineation of saline-water intrusion using surface geoelectrical method in Jahanian area, Pakistan. *Water*, 10(1548). <https://doi.org/10.3390/w10111548>
- Hendrayana, H., Harijoko, A., Riyanto, I. A., Nuha, A., & Ruslisan. (2023). Groundwater chemistry characterization in the south and southeast Merapi Volcano, Indonesia. *Indonesian Journal of Geography*, 55(1), 10–29. <https://doi.org/10.22146/ijg.76433>
- Hendrayana, H., Riyanto, I. A., & Nuha, A. (2023). River water quality variability in the young volcanic areas in Java, Indonesia. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 10(3), 4467–4478. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2023.103.4467>
- Hendrayana, H., Riyanto, I. A., Ismayuni, N., Nuha, A., Muhammad, A. S., & Fadillah, A. (2024). Groundwater quality assessment in different volcanic rocks using water quality index in the tropical area, Indonesia. *Journal of Degraded & Mining Lands Management*, 11(4), 6225–6235. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2024.114.6225>
- Hendrayana, H., Riyanto, I. A., & Nuha, A. (2024). Karakteristik hidrogeologi dan hidrogeokimia DAS Tempuran lereng barat

- kompleks Gunungapi Bromo–Tengger. *Majalah Geografi Indonesia*, 38(1), 35–49. <https://doi.org/10.22146/mgi.89369>
- Hendrayana, H., Riyanto, I. A., & Nuha, A. (2025). In-depth assessment of groundwater quality in East Java industrial areas to maintain the sustainability of groundwater utilization. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 12(3), 7649–7657. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2025.123.7649>
- Hiscock, K. M., & Bense, V. F. (2014). *Hydrogeology: Principles and practices* (2nd ed.). Wiley Blackwell.
- 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), 221–234. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.033>
- Jiménez-Espinosa, R., Hernández-Puentes, P., & Jiménez-Millán, J. (2024). Water–rock interaction processes in Tiscar and Larva active faults (Betic Cordillera, SE Spain). *Water*, 16(6), 897. <https://doi.org/10.3390/w16060897>
- Maheswari, A. S., Putra, D. P. E., Handini, E., Wilopo, W., & Susatio, R. (2023). Karakteristik hidrokimia dan model konseptual sistem akuifer di Sumberarum, Tempuran, Magelang, Jawa Tengah. *Majalah Geografi Indonesia*, 37(2), 138–146. <https://doi.org/10.22146/mgi.70636>
- Naslilmuna, M., Muryani, C., & Sigit, S. (2018). Analisis kualitas air tanah dan pola konsumsi air masyarakat sekitar industri kertas PT. Jaya Kertas Kertosono Kabupaten Nganjuk. *Jurnal GeoEco*, 4(1), 51–58. <https://jurnal.uns.ac.id/GeoEco/article/view/19176/15200>
- Noya, Y., et al. (1992). *Geologic map of the Mojokerto Quadrangle, East Java* [Peta geologi]. Center for Geological Survey.
- Osenbrück, K., Steinel, A., Montcoudiol, N., Le Van Manh, & Bäuml, R. (2025). Geochemical evolution and flow of groundwater impacted by long-term abstraction in the Mekong Delta, Vietnam. *Journal of Hydrology*, 655, 132881. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132881>
- Pemerintah Kabupaten Nganjuk, Dinas Lingkungan Hidup. (2024). *Laporan akhir: Kajian daya dukung dan daya tampung lingkungan hidup*. Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.
- Poespowardoyo, R. S. (1984). *Peta hidrogeologi lembar Kediri, skala 1:250.000*. Bandung: Direktorat Geologi Tata Lingkungan.
- Poznanović Spahić, M., Marinković, G., Spahić, D., Sakan, S., Jovanić, I., Magazinović, M., & Obradović, N. (2023). Water–rock interactions across volcanic aquifers of the Lece andesite complex (Southern Serbia): Geochemistry and environmental impact. *Water*, 15, 3653. <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/20/3653>
- Pringgoprawiro, H., & Sukido. (2011). *Geologic map of the Bojonegoro Quadrangle, East Java* [Peta geologi]. Center for Geological Survey.
- Rachmansyah, A., Rakhmanto, F., Listyawan, G., Susilo, A., & Dermawan, A. (2023). Modeling of seawater intrusion in karst area of Tuban Region, East Java Province, Indonesia. Dalam H. Chenchouni et al. (Eds.), *Recent Research on Hydrogeology, Geoecology and Atmospheric Sciences. MedGU 2021. Advances in Science, Technology & Innovation*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43169-2_31
- Rachmansyah, A., Sulianto, A. A., Lusiana, N., & Devoanto, L. A. (2021). Assessment of water quality index and pollution load capacity in the Sukowidi River and Bendo River, Banyuwangi Region. *Indonesian Journal of Environment and Sustainable Development*, 12(1). <https://doi.org/10.21776/ub.jp.al.2021.012.01.01>
- Razi, M. H., Wilopo, W., & Putra, D. P. E. (2024). Hydrogeochemical evolution and water–rock interaction processes in the multilayer volcanic aquifer of Yogyakarta–Sleman Groundwater Basin, Indonesia. *Environmental Earth Sciences*, 83, 164. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11477-6>
- Santosa, S., & Atmawinata, S. (1992). *Geologic map of the Kediri Quadrangle, East Java* [Peta geologi]. Center for Geological Survey.
- Satrio, Pratikno, B., & Sidauruk, P. (2016). Studi karakteristik air tanah daerah Nganjuk Jawa Timur dengan isotop alam. *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi*, 12(2). <https://doi.org/10.17146/jair.2016.12.2.3545>
- Shuaibu, A., Kalin, R. M., Phoenix, V., & Lawal, I. M. (2025). Geochemical evolution and mechanisms controlling groundwater chemistry in the transboundary Komadugu–Yobe Basin, Lake Chad region. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 57, 102098. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102098>
- Smith, M. E., Wynn, J. G., Scharping, R. J., Moore, E. W., Garey, J. R., & Onac, B. P. (2020). Source of saline groundwater on tidally influenced blue holes on San Salvador Island, Bahamas. *Hydrogeology Journal*, 29(2). <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02266-z>
- Taylor, R. G., Todd, M. C., Kongola, L., Maurice, L., Nahozya, E., Sanga, H., & MacDonald, A. M. (2013). Evidence of the dependence of groundwater resources on extreme rainfall in East Africa. *Nature Climate Change*, 3, 374–378. <https://doi.org/10.1038/nclimate1731>
- Tayyab, M., Aslam, R. A., Farooq, U., Ali, S., Khan, S. N., Iqbal, M., Khan, M. I., & Saddique, N. (2024). Comparative study of geospatial techniques for interpolating groundwater quality data in agricultural areas of Punjab, Pakistan. *Water*, 16(1), 139. <https://doi.org/10.3390/w16010139>
- Todd, D. K., & Mays, L. W. (2005). *Groundwater hydrology* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Toulier, A., Baud, B., de Montety, V., Lachassagne, P., Leonard, V., Pistre, S., ... Jourde, H. (2019). Multidisciplinary study with isotopic analysis for assessing recharge and functioning of volcanic aquifers, Bromo–Tengger, Indonesia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 26, 100634. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100634>
- Vann, S., Puttiwongrak, A., Suteerasak, T. T., & Koedsin, W. (2020). Delineation of seawater intrusion using geo-electrical survey in a coastal aquifer of Kamala Beach, Phuket, Thailand. *Water*, 12(506). <https://doi.org/10.3390/w12020506>
- Zghibi, A., Mirchi, A., Zouhri, L., Taupin, J., Chekirbane, A., & Tarhouni, J. (2019). Implication of groundwater development and seawater intrusion for sustainability of Mediterranean coastal aquifer in Tunisia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(696). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7866-5>
- Zowam, F. J., & Milewski, A. M. (2024). Groundwater level prediction using machine learning and geostatistical interpolation models. *Water*, 16(19), 2771. <https://doi.org/10.3390/w16192771>