

# Karakteristik Hidrogeologi dan Hidrogeokimia DAS Tempuran Lereng Barat Kompleks Gunungapi Bromo-Tengger

Heru Hendrayana<sup>1\*</sup>, Indra Agus Riyanto<sup>2</sup>, Azmin Nuha<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta 55281, Indonesia

<sup>2</sup>Departement Sains Informasi Geografi, Fakultas Sains, Teknologi, Teknik, dan Matematika, Universitas Maha Karya Asia, Yogyakarta, Indonesia.

<sup>3</sup>Groundwater Working Group (GWWG), Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta 55281, Indonesia

Email koresponden : [heruhendrayana20@gmail.com](mailto:heruhendrayana20@gmail.com)

Submit : 2023-09-27 Direvisi: 2023-12-13 Accepted: 2023-12-29

©2024 Fakultas Geografi UGM dan Ikatan Geograf Indonesia (IGI)

©2024 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** Lereng bagian barat Gunungapi Bromo memiliki peranan penting dalam penyediaan air untuk masyarakat disekitarnya. Penggunaan air tanah cukup intensif baik domestik, pertanian, dan industri pada lereng bagian barat Gunungapi Bromo. Lereng bagian barat bagian barat Gunungapi Bromo belum pernah dilakukan kajian detail baik potensi, kualitas, dan imbuhan air tanah. Kajian tersebut di tujuan untuk mengetahui kondisi air tanah di lereng bagian barat Gunungapi Bromo supaya dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas pengamatan batuan, pengukuran muka air tanah, pengukuran kimia air tanah TDS, pH, EC, dan suhu, analisis geokimia berdasarkan diagram piper, diagram fingerprint, dan diagram kurlov, analisis isotop asal usul air tanah dan imbuhan air tanah. Litologi di area kajian terdiri atas endapan pasir kerikilan, endapan pasir, batupasir, konglomerat, breksi laharik, lapilli tuff, tuff, breksi, dan lava andesit. Nilai TDS, pH, Suhu, dan EC di DAS Tempuran semakin meningkat dari hulu ke hilir. Pola aliran air tanah pada DAS Tempuran secara umum mengalir dari arah selatan menuju utara. Satuan lava dan breksi andesit merupakan akuifer, lava andesit dan breksi andesit merupakan akuiklud, jatuhnya piroklastik merupakan akuifer, dan tuf dan lapilli tuff merupakan akuitard. Tipe air tanah pada DAS Tempuran didominasi oleh tipe kalsium bikarbonat (diagram piper) dan kalsium magnesium bikarbonat (diagram kurlov), dan diagram fingerprint terdapat 3 sistem air tanah. Sampel air tanah di DAS Tempuran keseluruhan berasal dari air meteorik. Imbuhan air tanah di DAS tempuran berasal dari elevasi 430-805 mdpl. Daerah imbuhan air tanah terdapat di Kecamatan Pasepran, Puspo, dan Tukur. Air tanah di area kajian secara kualitas dan kuantitas tergolong sangat baik.

**Kata kunci:** hidrogeokimia, isotop, imbuhan air tanah, model konseptual

**Abstract** The western slopes of Mount Bromo have an important role in providing water for the surrounding community. Groundwater use is quite intensive, both domestically, agriculturally, and industrially, on the western slopes of Mount Bromo. The western slope of Mount Bromo has never had a detailed study of its potential, quality, and groundwater recharge. The study was aimed at determining the condition of groundwater on the western slopes of Mount Bromo so that it can be used sustainably. The methods used in this research consist of rock observations, measurements of groundwater levels, measurements of groundwater chemistry (TDS, pH, EC, and temperature), geochemical analysis based on Piper diagrams, fingerprint diagrams, and Kurlov diagrams, isotope analysis of the origin of groundwater, and recharge. groundwater. The geology in the study area consists of gravelly sand deposits, sandstone, conglomerate, laharic breccia, lapilli tuff, andesite breccia, and andesitic lava. The TDS, pH, temperature, and EC values in the Tempuran watershed increase from upstream to downstream. The groundwater flow pattern in the Tempuran watershed generally flows from south to north. Units of lava and andesite breccia are aquifers; andesite lava and andesite breccia are aquicludes; pyroclastic falls are aquifers; and tuff and lapilli are aquitards. The groundwater types in the Tempuran watershed are dominated by calcium bicarbonate (Piper diagram) and calcium magnesium bicarbonate (Kurlov diagram), and in the fingerprint diagram, there are 3 groundwater systems. The entire groundwater sample in the Tempuran watershed comes from meteoric water. Groundwater recharge in the purest watershed comes from an elevation of 430–805 meters above sea level. Groundwater recharge areas are in the Pasepran, Puspo, and Tukur Districts. The study area's groundwater quality and quantity are rated as very good.

**Keywords:** hydrogeochemistry, isotope, groundwater recharge area, conceptual model

## PENDAHULUAN

Air tanah merupakan sumber air utama yang paling banyak dimanfaatkan manusia di dunia (Giordano, 2009). Air tanah telah digunakan sebagai sumber air utama sejak

Prehistori Times (Angelakis et al., 2016). Air tanah banyak digunakan karena kualitasnya yang baik dibandingkan sumber air lainnya dan air tanah mudah diperoleh dibandingkan sumber air lainnya. Penggunaan air tanah meningkat setiap tahun di

dunia (Jakeman *et al.*, 2016). Air tanah sebelum dimanfaatkan perlu dilakukan kajian awal baik berupa kondisi hidrogeologi untuk mengetahui potensinya (Houben & Batelaan, 2022), karakteristik kimia air tanah untuk mengetahui tipe air tanah dan sistemnya (Glynn & Plummer, 2005), dan kajian isotop untuk mengetahui lokasi imbuhan dan asal usul air tanah (Cholo & Tolossa, 2023). Ketiga komponen tersebut menjadi penting dalam pengelolaan air tanah yang berkelanjutan.

Di Indonesia air tanah menjadi sumber air utama yang dimanfaatkan (Selles *et al.*, 2015; Hendrayana *et al.*, 2020; Hendrayana *et al.*, 2021a; Baud *et al.*, 2021). Salah satunya terdapat pada Kompleks Gunungapi Bromo-Tengger (Hendrayana *et al.*, 2021a). Pemanfaatan air cukup tinggi pada Kompleks Gunungapi Bromo-Tengger baik pada bagian hulu, tengah, dan hilir. Penelitian yang telah dilakukan sebelumnya meliputi kimia air tanah, potensi air tanah, dan imbuhan air tanah berada pada bagian lereng bagian utara (Toulier *et al.*, 2019). Pada bagian lereng lainnya belum pernah dilakukan kajian kimia air tanah, potensi air tanah, dan imbuhan air tanah. Terdapat perbedaan karakteristik air tanah pada lereng yang berbeda (Hendrayana *et al.*, 2023). Lereng bagian barat Kompleks Gunungapi Bromo-Tengger terdapat wilayah industri di Kecamatan Kejayan dengan penggunaan air tanah sebesar 194 liter/detik. Penggunaan air tanah oleh masyarakat untuk pertanian cukup besar pada bagian tengah lereng barat Kompleks Gunungapi Bromo-Tengger (Khasanah *et al.*, 2021). Lereng bagian barat Kompleks Gunungapi Bromo-Tengger belum banyak dilakukan penelitian terkait air tanah sehingga sangat minim literatur atau gambaran mengenai potensi air tanah yang ada. Selain itu Lereng bagian barat Kompleks Gunungapi Bromo-Tengger juga sebagai penyangga wisata Kawasan Bromo (Rosyidi, 2018) sehingga perlu dilakukan manajemen sumberdaya air tanah yang berkelanjutan. Oleh karena itu perlu dilakukan kajian kimia air tanah, potensi air tanah, dan imbuhan air tanah pada bagian lereng barat Kompleks Gunungapi Bromo-Tengger untuk memenuhi kebutuhan air tanah masyarakat, wisata, dan industri baik secara kualitas dan kuantitas.

Metode yang digunakan dalam mengkaji kimia air tanah terdiri atas Kurlov, Trilinier Piper, dan Diagram Fingerprint yang masing masing sangat baik memberikan perbedaan tipe air tanah dan pengelompokannya (Maheswari *et al.*, 2023). Metode Hidroisotop merupakan metode yang sangat akurat untuk menentukan asal usul air tanah sehingga bisa detail dalam melakukan konservasi (Wijatna *et al.*, 2013). Metode model konseptual sangat penting dalam menggambarkan kondisi geologi dan hidrogeologi secara sederhana (Selles *et al.*, 2015). Lokasi penelitian berada di daerah DAS Tempuran, Pasuruan, Jawa Timur (**Gambar 1**). Daerah penelitian berada pada koordinat UTM (WGS 1984) Zona 49S garis 699589 - 714524 meter dan 9123956 - 9157523 meter. Geologi daerah penelitian memiliki litologi berupa batuan vulkanik-vulkaniklastik kuartar (Santosa & Suwanti, 1992; Suharsono & Suwanti, 1992). Lokasi kajian termasuk dalam sistem hidrogeologi CAT Pasuruan (Poespwardoyo, 1984). Lokasi kajian memiliki curah hujan sebesar 2.494 mm/tahun dan suhu berkisar 20-22 °C (Sunarmi *et al.*, 2022). Penggunaan lahan di lokasi kajian dominan berupa tegalan dan sawah.

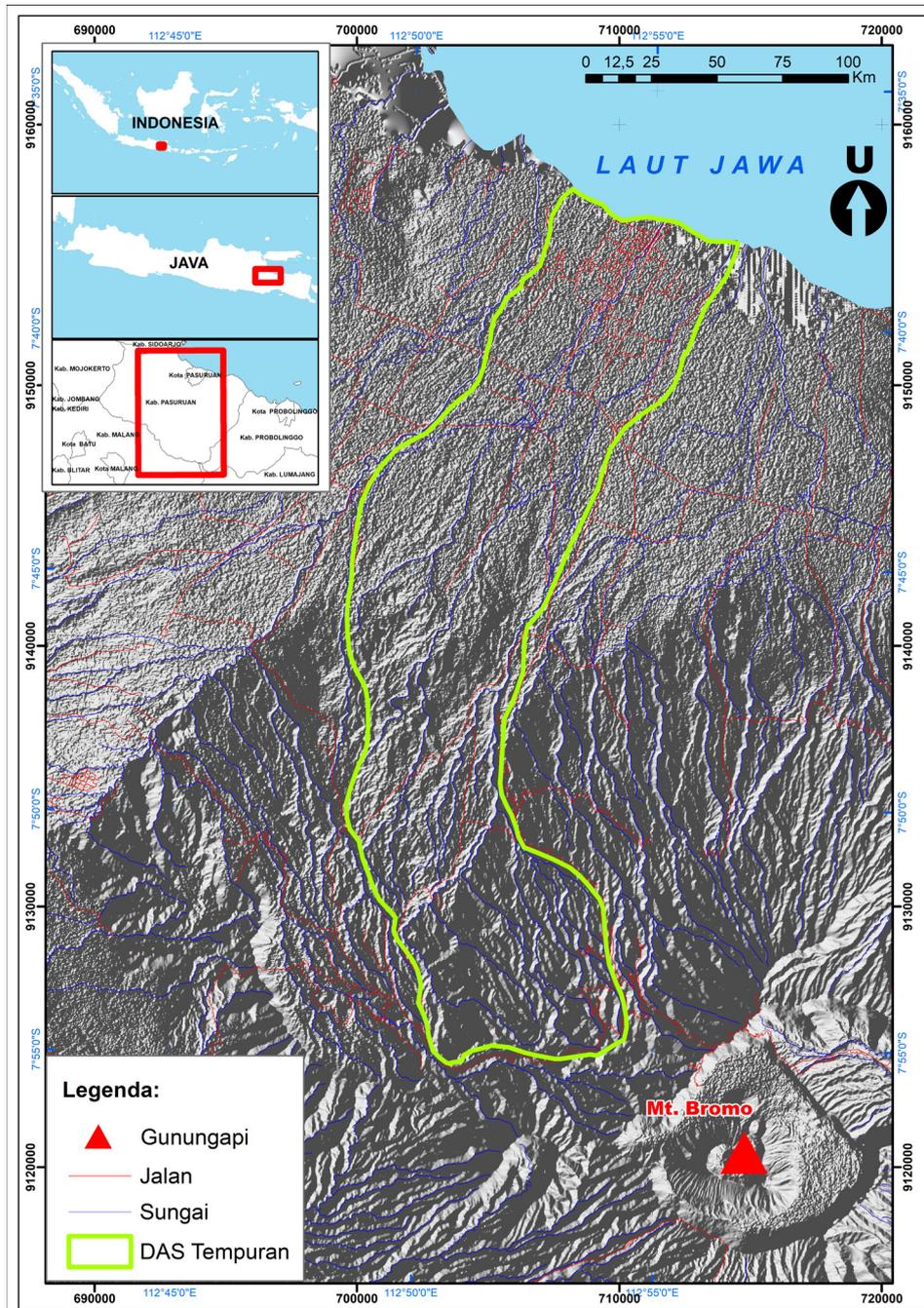
## METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahapan yaitu survei geologi, survei hidrogeologi, dan survei isotop. Survei geologi dilakukan pengamatan singkapan batuan sejumlah

84 titik pengamatan mulai hulu hingga hilir. Peralatan yang digunakan untuk survei geologi adalah palu batuan beku, kompas, dan peta geologi regional. Survei hidrogeologi dilakukan dengan mengukur tinggi muka air (TMA) sumur menggunakan pita ukur. Survei hidrogeologi lainnya dilakukan dengan memploting sebaran dan elevasi mataair dan sumur bor dengan menggunakan *Global Positioning System* (GPS) Garmin Oregon 750. Jumlah titik survey hidrogeologi yang dilakukan sejumlah 50 sumur gali, 10 sumur bor, 6 sumur bor artesis, dan 44 mataair yang tersebar dari hulu ke hilir. Keseluruhan titik tersebut diuji pH, Suhu, *Total Dissolved Solids* (TDS), dan Daya Hantar Listrik (DHL) dengan menggunakan *water checker* Hanna H19812-51. Sampel kimia air tanah yang diambil untuk uji laboratorium sejumlah 21 sampel. Uji laboratorium yang dilakukan berupa analisis ion kation yaitu *Calcium* ( $\text{Ca}^{2+}$ ), *Sodium* ( $\text{Na}^+$ ), *Magnesium* ( $\text{Mg}^{2+}$ ), dan *Potassium* ( $\text{K}^+$ ). Sedangkan Ion anion yang diujikan berupa *Sulfate* ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), *Chloride* ( $\text{Cl}^-$ ), *Bicarbonate* ( $\text{HCO}_3^-$ ), and *Nitrate* ( $\text{NO}_3^-$ ). Alat yang digunakan untuk uji kation dan anion adalah 850 Professional Ion Chromatography (Metrohm). Survei Isotop dilakukan saat musim kemarau Bulan Juli untuk pengambilan sampel air baik mataair, sumur gali, sumur bor, dan sumur bor artesis sejumlah 18 sampel. Sampel isotop diuji laboratorium dengan konsentrasi isotop stabil  $\delta^{18}\text{O}$  dan  $\delta^2\text{H}$ . Alat yang digunakan untuk uji isotop adalah Isotope Ratio Mass Spectrometer (IRMS) Thermo. Sedangkan untuk *local meteoric water line* (LMWL) diperoleh dari penelitian sebelumnya pada garis Pasuruan Bromo (Batan, 2006; Toulier, 2019).

Analisis geologi yang dilakukan berupa pembuatan peta geologi yang lebih detail dari geologi regional berdasarkan survei lapangan. Hasi survei geologi kemudian dioleh menggunakan ArcGIS untuk didelineasi persebarannya menjadi satuan geologi. Pengolahan TMA dilakukan dengan interpolasi menggunakan ArcGIS 10.4 untuk mendapatkan pola aliran air tanah dilokasi kajian. Sebaran kualitas air tanah parameter pH, Suhu, DHL, TDS diolah menggunakan ArcGIS dengan fitur inverse distance weighted (IDW) untuk memperoleh sebaran di lokasi kajian. Untuk analisis kimia tipe air tanah dilakukan dengan 3 metode yaitu Kurlov, *Trilinier Piper*, dan Diagram *Fingerprint*. Sampel air tanah dilakukan uji *Charge Balance Error* (CBE) dahulu sebelum dianalisis kimia dengan *error* < 5%. Ketiga uji tersebut diolah dengan menggunakan Rockworks 14. Metode analisis *kurlov diagram* diperoleh dari presentase konsentrasi ion dominan baik kation dan anion. Hasil metode kurlov kemudian di klasifikasikan sesuai dengan tipe air tanahnya berdasarkan persentase ionnya. Metode Piper Trilinear diperoleh dari jumlah persentase ion-ion utama yang di-plot pada diagram jajar genjang. Analisis diagram piper didasarkan pada pengelompokan sebaran sampel sesuai klasifikasi Piper Trilinear. Analisis Diagram *Fingerprint* diperoleh dari pola bentuk garis grafik yang menunjukkan komposisi ion mayor.

Isotop diolah dengan mengplotkan nilai sampel isotop air tanah  $\delta^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  pada LMWL. Nilai LMWL Pasuruan menggunakan data penelitian sebelumnya dari Batan (2006) dan Toulier *et al.*, (2019). Jika sampel air tanah berada atau dekat dengan garis LMWL maka air tanah berasal dari air hujan, sedangkan apabila terdapat sampel yang menjauhi garis LMWL mengindikasikan terjadinya evaporasi dan *oxygen shifting*. Analisis elevasi imbuhan air tanah berdasarkan uji isotop dilakukan dengan menggunakan pengeplotan pada grafik konsentrasi isotop stabil air hujan terhadap ketinggian



Gambar 1. Lokasi Kajian (Sumber Peta Dasar : BIG 2004)

stasiun curah hujan. Hasil tersebut diperoleh dua persamaan untuk menghitung lokasi elevasi imbuhan air tanah sesuai dengan rumus persamaan 1 dan Persamaan 2 dan **Gambar 9**. Tahapan terakhir dari penelitian ini adalah membuat konseptual model berdasarkan hasil analisis dan pengolahan geologi, hidrogeologi, dan isotop. Konseptual model yang dibuat berupa profil sayatan yang berisi satuan geologi, aliran air tanah, daeah imbuhan air tanah, karakteristik kimia air tanah, tipe akuifer, dan sebaran sumber air.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Karakteristik Geologi

Hasil survei geologi menunjukkan daerah penelitian tersusun atas produk hasil aktivitas gunungapi primer seperti lava dan batuan piroklastik, dan hasil aktivitas sekunder seperti lahar dan endapan aluvial (**Gambar 2**). Secara umum satuan batuan pada daerah penelitian dapat dibagi menjadi 4 satuan

yaitu Satuan Lava dan Breksi Andesit, Satuan Endapan Jatuhan Piroklastik, Satuan Endapan Lahar, dan Satuan Endapan Aluvial (**Gambar 3a**). Hasil tersebut sesuai dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan Santosa dan Suwarti (1992) dan (Zaennudin et al., 1994). Lebih detail hasil lapangan diperoleh beberapa batuan yaitu endapan pasir kerikilan, endapan pasir, batupasir, konglomerat, breksi laharik, lapilli tuff, tuf, breksi andesit, dan lava andesit (**Gambar 3b**). Hasil detail pengamatan lapangan memiliki karakteristik yang serupa dengan penelitian Toulter et al., (2019) pada lereng utara Gunungapi Bromo.

Satuan lava andesit terusun oleh litologi andesit, yang secara setempat dijumpai struktur berupa pelapukan membola (spheroidal weathering) dan kekar lembar (sheeting joint). Pada satuan lava andesit tidak ditemukan sumur gali, namun banyak ditemukan mata air yang muncul di dinding-dinding sungai melalui rekahan yang berkembang pada litologi andesit.



181

**Gambar 2.** (A) litologi tuf (B) litologi lapili tuf dengan struktur perlapisan (C) litologi breksi laharik (D) endapan pasir (E) lava andesit dengan struktur pelapukan membola (F) lava andesit dengan struktur kekar lembar  
(Sumber : Dokumentasi Lapangan, 2022)

Satuan jatuhnya piroklastik tersusun oleh litologi tuf dan lapilli tuf. Litologi lapilli tuf dijumpai dalam keadaan singkapan yang cukup segar dengan struktur perlapisan pada beberapa tempat. Banyak dijumpai mata air yang keluar melalui celahan dan ruang antar butir batuan pada satuan jatuhnya piroklastik. Satuan endapan lahar memiliki litologi penyusun berupa breksi laharik, konglomerat, dan batupasir. Singkapan breksi laharik dijumpai dalam kondisi lapuk dengan ukuran fragmen yang cukup bervariasi, mulai dari bongkah hingga kerikil. Satuan endapan aluvial tersusun atas material sedimen lepas berupa lempung, lanau, pasir, kerikil, dan kerakal yang merupakan endapan sungai. Pada satuan endapan lahar dan satuan endapan aluvial banyak dijumpai sumber-sumber air

tanah berupa sumur gali. Kedua satuan tersebut juga terdapat beberapa mata air yang keluar melalui ruang antar butir batuan di dinding sungai.

## 2. Karakteristik Hidrogeologi dan Hidrogeokimia

Pada daerah penelitian terdapat 109 titik lokasi pengamatan sumber air tanah yang tersebar dari selatan hingga utara (**Gambar 4a**). Titik pengamatan sumber air terdiri atas 50 sumur gali, 5 sumur bor artesis, 10 sumur bor dalam, dan 44 mata air. Titik lokasi sumur gali secara umum tersebar di bagian utara daerah penelitian, sumur bor tersebar di bagian tengah daerah penelitian, dan mata air tersebar pada bagian selatan daerah penelitian. Terdapat 3 pola aliran air tanah di

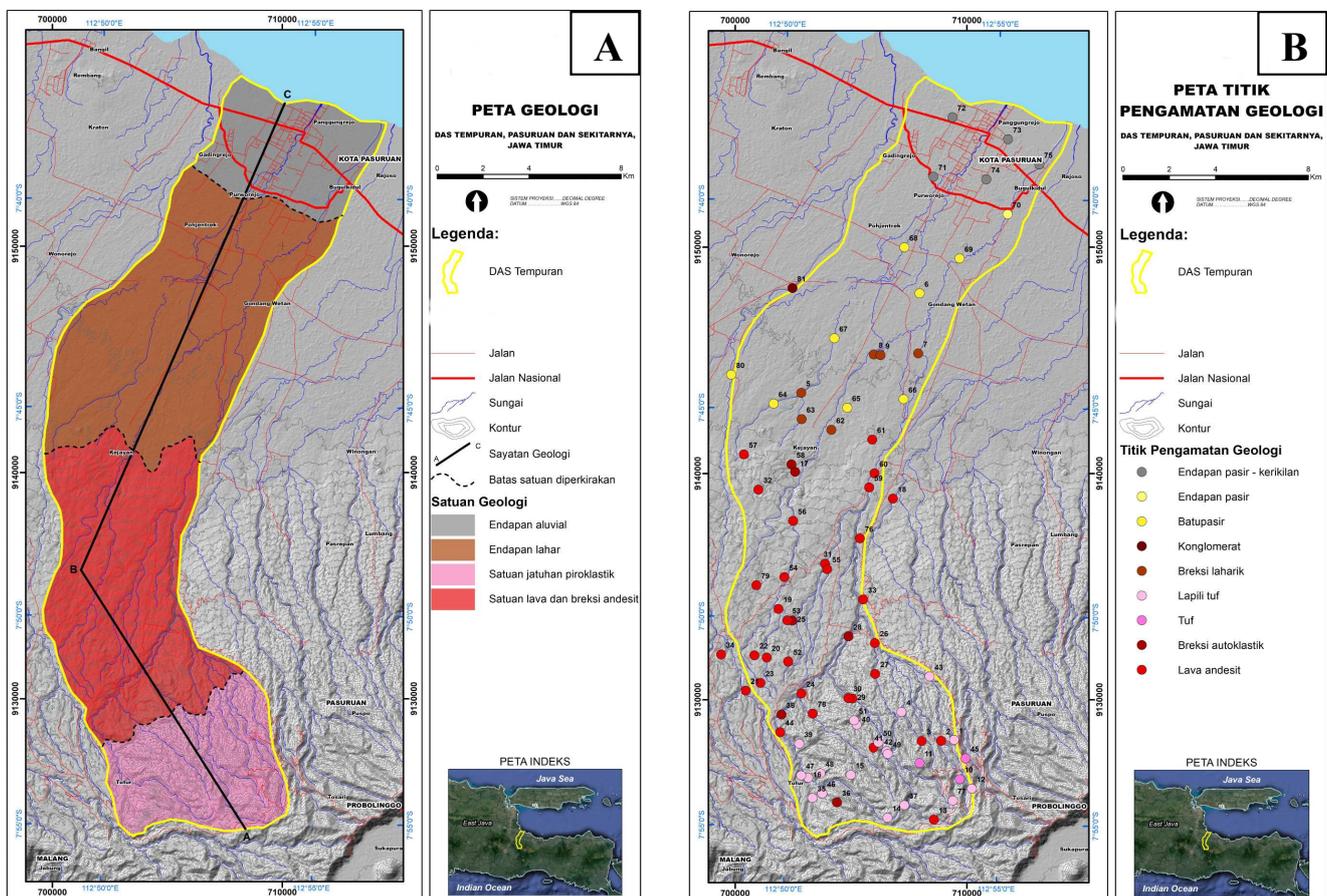
daerah penelitian yaitu pola tenggara-barat laut, pola selatan-utara, dan pola barat daya-timur laut (**Gambar 4b**). Aliran air tanah mengalir dengan pola aliran tenggara-barat laut pada morfologi lereng gunungapi. Pola aliran tersebut kemudian membelok menjadi selatan-utara pada morfologi kaki gunungapi hingga morfologi dataran gunungapi. Aliran air tanah kemudian membelok kembali dengan arah barat daya-timur laut menuju laut. Pola aliran air tanah dilokasi kajian serupa dengan dengan penelitian Toulrier, (2019). Namun pada lokasi kajian sangat jarang ditemukan sumur atau mataair artesis, berbeda pada lereng bagian utara Gunungapi Bromo yang banyak memiliki mataair artesis dan sumur artesis (Hendrayana et al., 2021a).

Sebaran nilai DHL rendah pada bagian hulu dan semakin meningkat pada bagian tengah ke hilir (**Gambar 5a**). Nilai DHL mata air di daerah penelitian secara umum berada pada rentang 38-572  $\mu\text{S/cm}$ . Nilai DHL sumur gali pada daerah penelitian berkisar antara 182-3.428  $\mu\text{S/cm}$ . Perbedaan nilai DHL ini diperkirakan terjadi karena air tanah dangkal pada sumur gali berada pada elevasi yang lebih rendah daripada mata air sehingga akan lebih banyak terjadi kontak dengan batuan yang dilewatinya. Nilai DHL air tanah dangkal yang lebih tinggi menunjukkan bahwa air tanah dangkal di daerah ini memiliki garam terlarut terionisasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan air tanah dalam, hasil tersebut diperkuat dengan hasil analisis geokimia pada **Tabel 1**. Nilai TDS mata air di daerah penelitian secara umum berada pada rentang 19-286 ppm. Nilai TDS sumur gali pada daerah penelitian berkisar antara 91-1.714 ppm (**Gambar 5b**). Pola sebaran TDS rendah pada bagian hulu dan semakin meningkat dari tengah hingga ke hilir. Nilai pH mata air di daerah penelitian

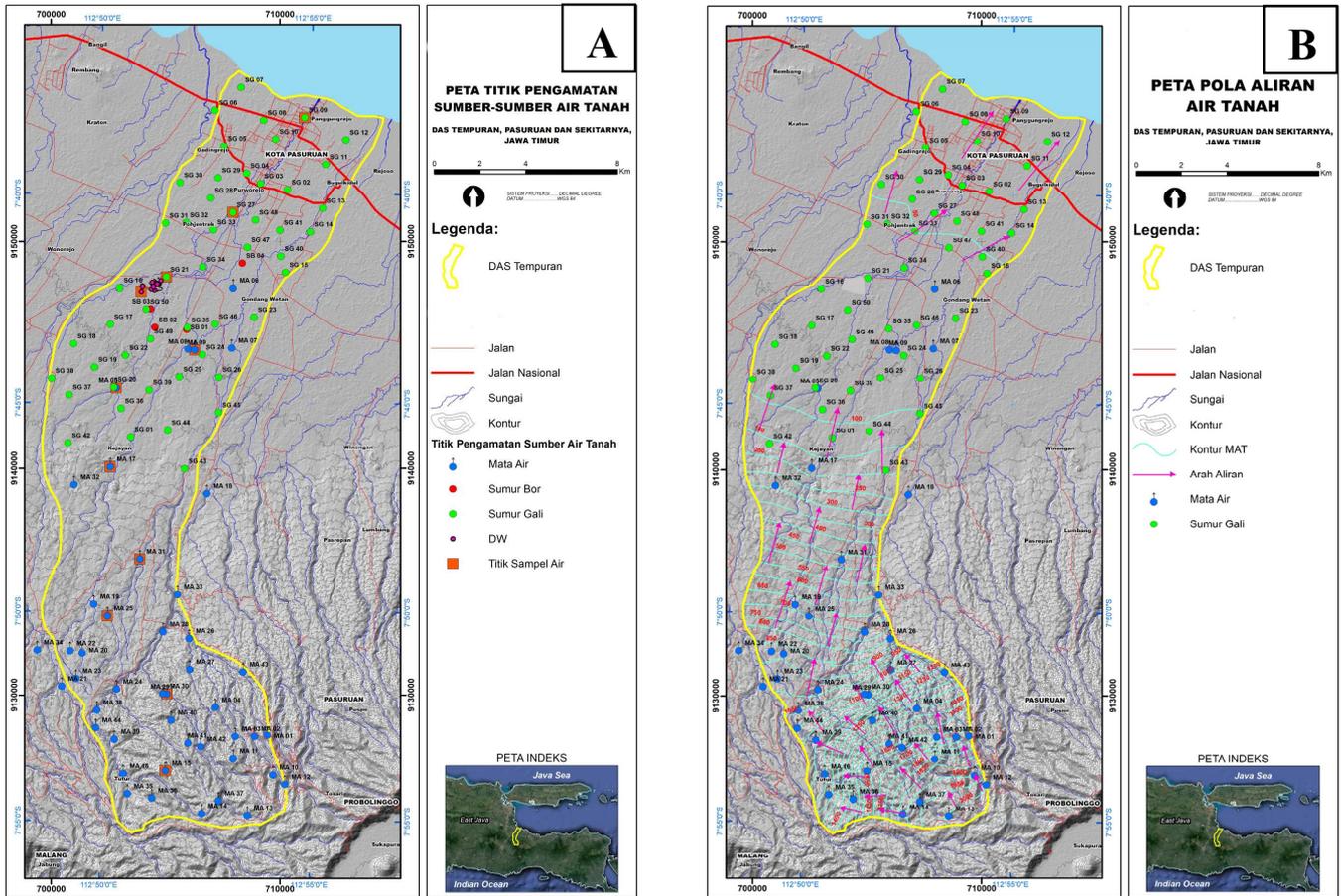
secara umum berada pada rentang 6,35 hingga 9,85. Nilai pH sumur gali pada daerah penelitian berkisar antara 6,99 hingga 9,16. Pola sebaran pH rendah pada bagian hulu dan semakin meningkat dari tengah hingga ke hilir (**Gambar 6a**). Suhu mata air di daerah penelitian secara umum berada pada rentang 16,5-28,5 . Suhu sumur gali pada daerah penelitian berkisar antara 26-31 . Pola sebaran suhu rendah pada bagian hulu dan semakin meningkat dari tengah hingga ke hilir (**Gambar 6b**). Pola nilai DHL, pH, TDS, dan suhu semakin naik dari hulu ke hilir Gunungapi sesuai dengan penelitian Hendrayana et al., (2023).

Hasil klasifikasi Kurlov diperoleh 21 sampel air tanah memiliki tipe air tanah yang beragam. Sampel tersebut memiliki dominasi kation utama berupa kalsium dan alkali dengan konsentrasi yang cukup melimpah yaitu melebihi 25% dari total ion terlarut (**Tabel 1**). Sementara kandungan anion yang paling mendominasi adalah bikarbonat. Pola sebaran kalsium nitrat bikarbonat berada pada bagian hulu kemudian berubah komposisi menjadi kalsium bikarbonat pada bagian tengah (**Gambar 7a**). Hasil tersebut sesuai dengan penelitian Hendrayana et al., (2023) dan Maheswari et al., (2023) bahwa pola dominasi hasil diagram kurlov pada hulu dan Tengah gunungapi dominan berupa kalsium bikarbonat dan alkali bikarbonat. Pola komposisi air tanah dari bagian Tengah berubah menjadi kalsium alkali bikarbonat dan alkali kalsium klorida pada bagian hilir. Penambahan klorida pada bagian hilir dikarenakan dekat dengan Pantai sehingga terpengaruh air laut.

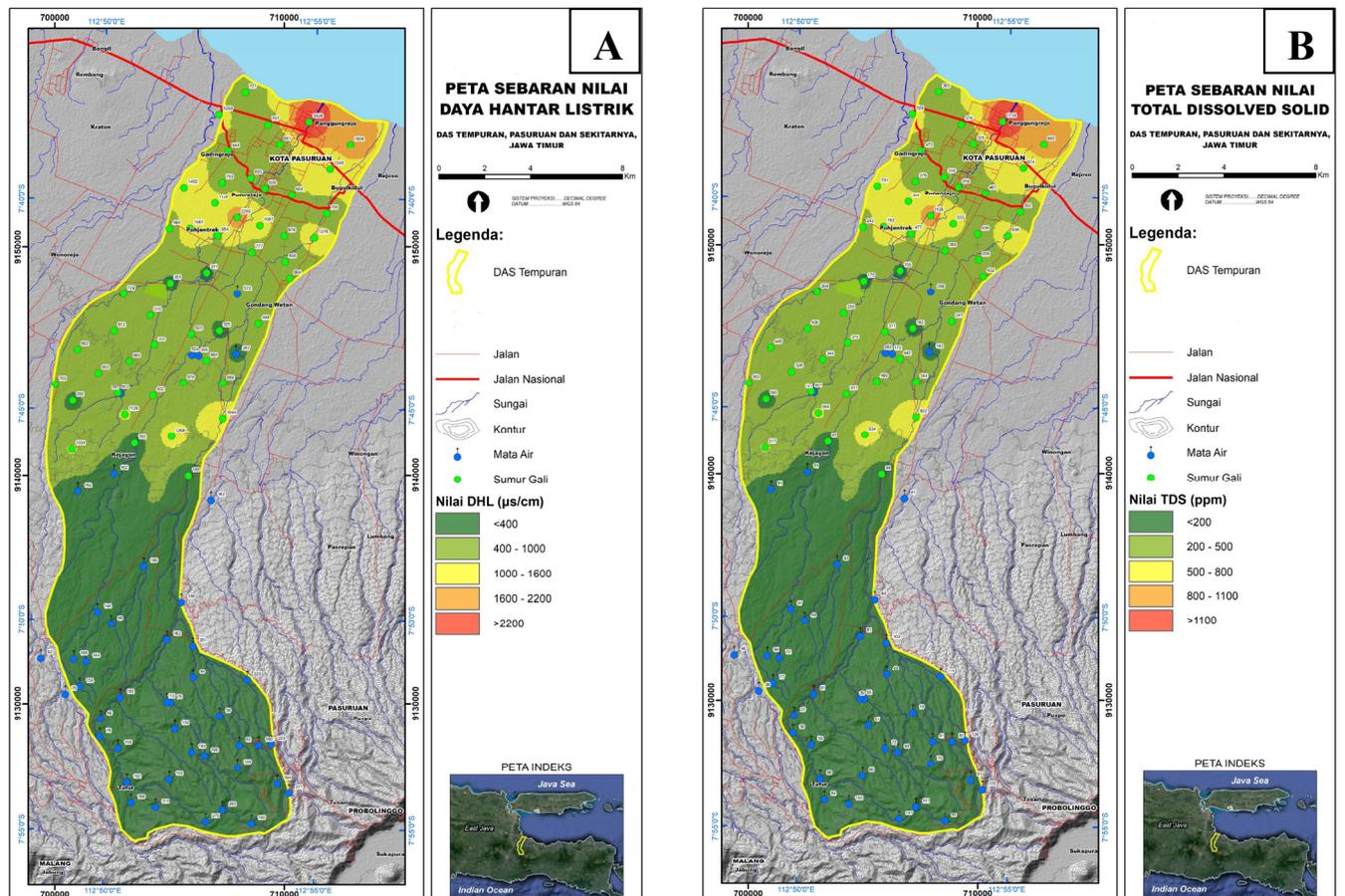
Hasil pengeplotan sampel air tanah daerah penelitian pada diagram Trilinier Piper menunjukkan tipe air tanah dan sifat kimianya secara umum terdiri dari tipe Kalsium-



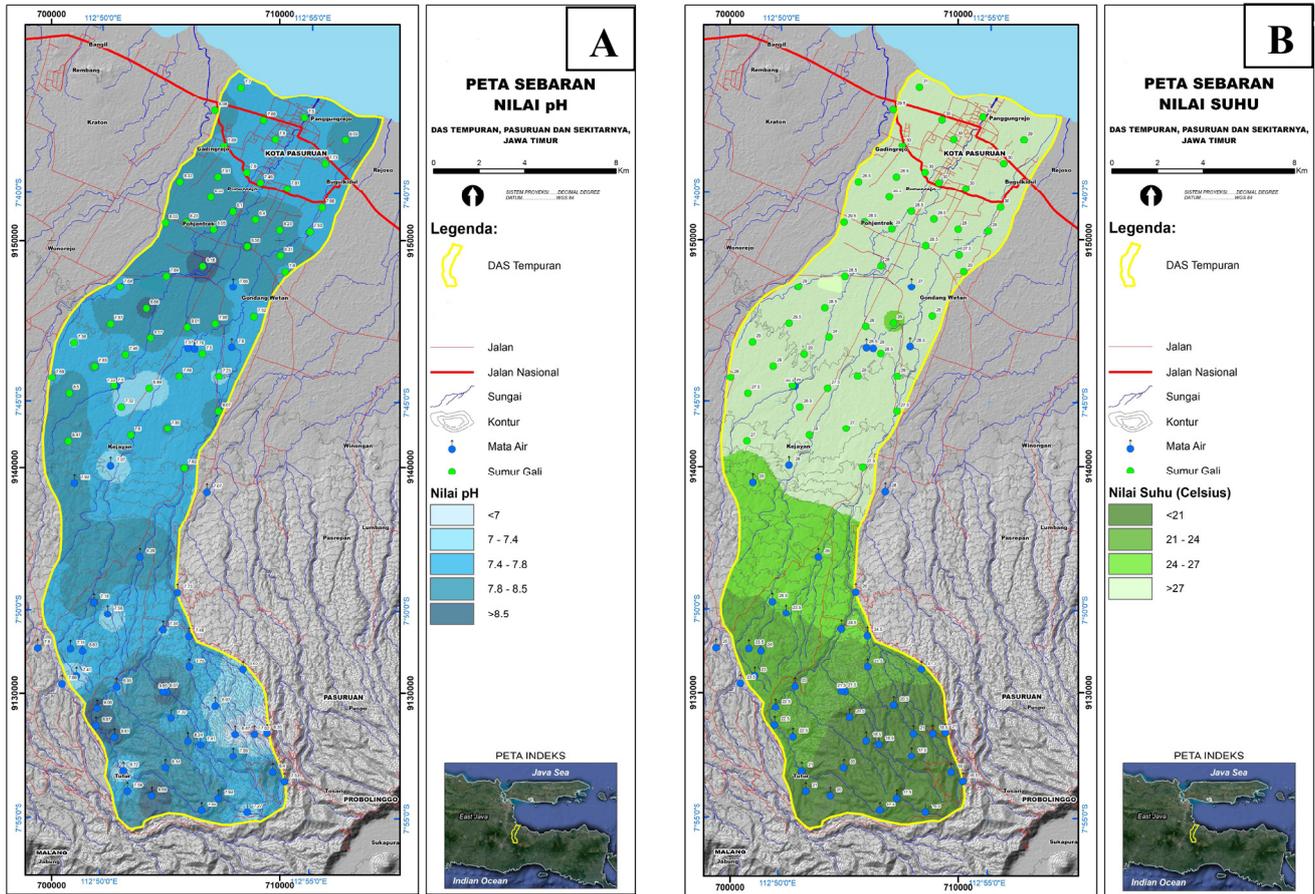
Gambar 3.a Peta Geologi dan Gambar 3b. Peta Sebaran Detail Pengamatan Geologi (Sumber Peta Dasar : BIG 2004)



Gambar 4.a Peta Sebaran Sumber Air dan Gambar 4.b Peta Pola Aliran Air tanah (Sumber Peta Dasar : BIG 2004)



Gambar 5.a Peta Sebaran DHL dan Gambar 5.b Peta Sebaran TDS (Sumber Peta Dasar : BIG 2004)



Gambar 6.a Peta Sebaran pH dan Gambar 6.b Peta Sebaran Suhu (Sumber Peta Dasar : BIG 2004)

Tabel 1. Hasil Analisis Klasifikasi Diagram Kurlov

Kode Sampel	Kation (%)				Anion (%)				Tipe Air Tanah
	Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CBE%	
MA_P- 5	19,29	0,10	80,61	5,83	6,98	82,51	4,68	4,2	Kalsium-Bikarbonat
MA_P- 9	17,67	0,08	82,25	4,24	3,17	86,61	5,98	2,9	Kalsium-Bikarbonat
MA_P- 15	21,38	0,12	78,50	12,81	38,25	36,97	11,97	2,2	Kalsium-Nitrat-Bikarbonat
MA_P- 17	23,14	0,18	76,68	1,51	3,49	90,95	4,06	1,3	Kalsium-Bikarbonat
MA_P- 25	24,85	0,15	74,99	8,28	11,79	76,79	3,14	0,1	Kalsium-Bikarbonat
MA_P- 29	19,57	0,00	80,43	2,61	1,18	90,61	5,60	-3,1	Kalsium-Bikarbonat
MA_P- 31	26,87	0,19	72,94	11,19	10,31	73,70	4,81	2,7	Kalsium-Alkali-Bikarbonat
SG_P- 9	68,17	0,06	31,77	72,46	1,92	20,08	5,54	-4,6	Alkali-Kalsium-Klorida
SG_P- 21	18,27	0,10	81,63	5,42	0,13	91,69	2,76	1	Kalsium-Bikarbonat
SG_P- 27	32,27	0,15	67,58	25,22	0,17	58,90	15,71	-4,1	Kalsium-Alkali-Bikarbonat-Klorida
DW_P- 1	19,44	0,08	80,48	4,29	1,11	91,51	3,10	3	Kalsium-Bikarbonat
DW_P- 2	21,84	0,08	78,08	4,57	0,94	91,57	2,92	3,7	Kalsium-Bikarbonat
DW_P- 3	18,17	0,10	81,74	7,31	1,20	87,99	3,50	4,1	Kalsium-Bikarbonat
DW_P- 4	17,70	0,10	82,20	4,39	0,95	91,68	2,99	0,3	Kalsium-Bikarbonat
DW_P- 5	19,25	0,08	80,66	6,10	0,19	88,82	4,90	4	Kalsium-Bikarbonat
DW_P- 6	19,75	0,09	80,16	4,12	1,59	90,50	3,78	3,4	Kalsium-Bikarbonat
DW_P- 7	20,95	0,07	78,98	4,64	1,52	90,30	3,54	2,1	Kalsium-Bikarbonat
DW_P- 8	19,78	0,09	80,12	4,10	0,39	91,78	3,73	-3,8	Kalsium-Bikarbonat
DW_P- 9	18,46	0,10	81,44	5,52	1,72	89,46	3,29	3,2	Kalsium-Bikarbonat
DW_P- 10	18,12	0,09	81,80	4,33	1,42	90,95	3,30	3,7	Kalsium-Bikarbonat
ARTESIS	22,36	0,08	77,56	6,94	1,57	88,52	2,97	3,2	Kalsium-Bikarbonat

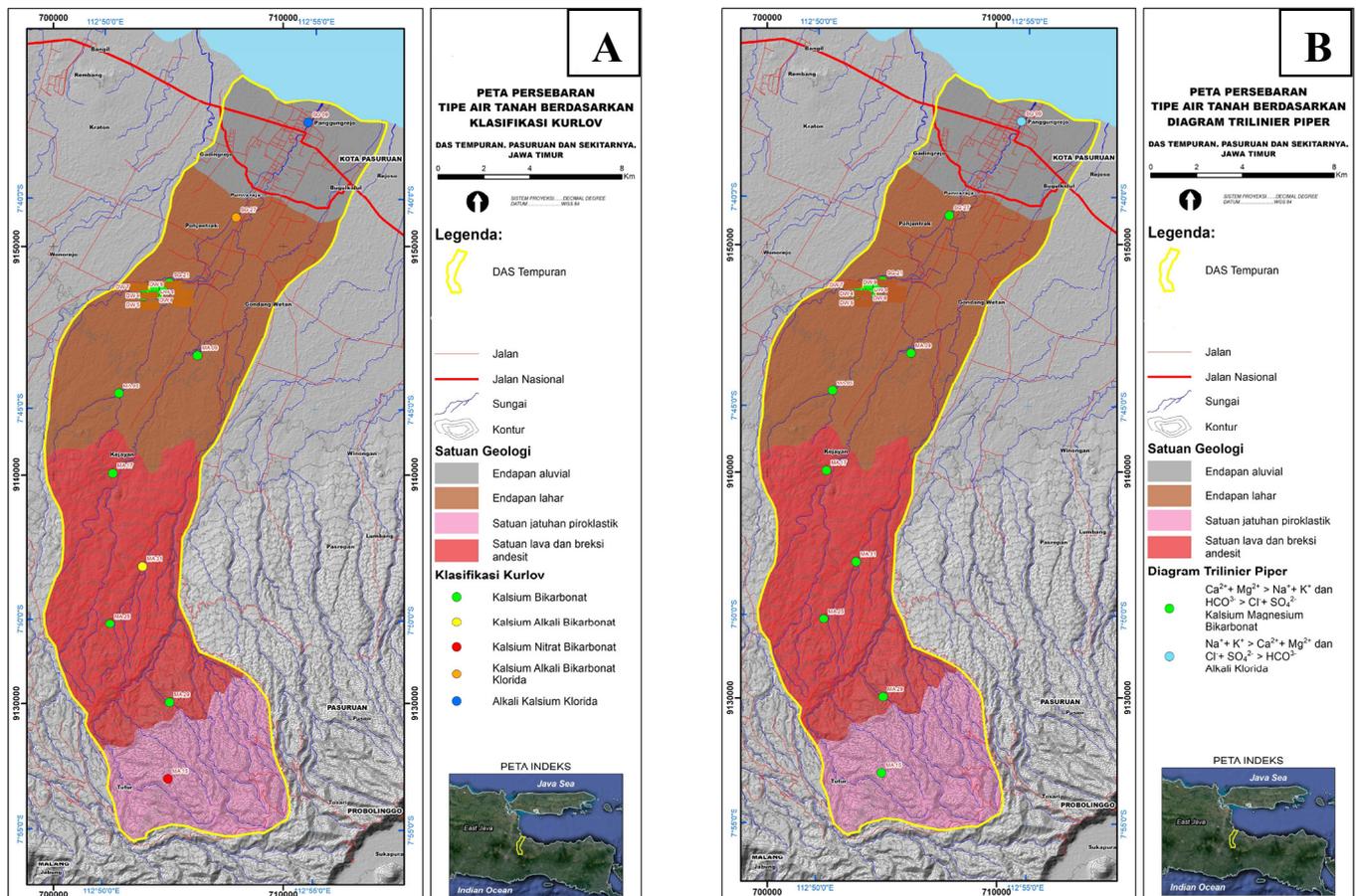
(Sumber : Hasil Olah 2023)

Magnesium Bikarbonat dan tipe Alkali Klorida (**Gambar 7b**). Tipe Kalsium-Magnesium Bikarbonat meliputi 20 sampel air tanah yaitu MA 5, MA 9, MA 15, MA 17, MA 25, MA 29, MA 31, SG 21, SG 27, DW 1, DW 2, DW 3, DW 4, DW 5, DW 6, DW 7, DW 8, DW 9, DW 10, dan Sumur Artesis (**Gambar 8**). Tipe air tanah Kalsium-Magnesium Bikarbonat dan tipe Alkali Klorida dominan berada pada wilayah vulkanik Hendrayana et al., (2023); Toulrier et al., (2019); Irawan et al., (2009). Sifat kimia air ion kalsium dan magnesium (alkali tanah) lebih tinggi dibanding ion sodium + potassium (alkali) dan ion bikarbonat yang lebih tinggi dibanding ion klorida dan sulfat. Kualitas air tanah pada daerah penelitian memiliki kandungan alkali tanah melebihi kandungan alkali, kandungan asam lemah melebihi kandungan asam kuat, kekerasan karbonat (alkali sekunder) lebih dari 50%, dan sifat air tanah didominasi alkali tanah dan asam lemah. Tipe air tanah dengan kandungan kalsium-magnesium bikarbonat menunjukkan air tanah pada daerah penelitian berasal dari jenis litologi dengan ion kalsium dan magnesium yang tinggi. Kandungan ion kalsium dan magnesium yang tinggi terdapat pada batuan vulkanik (breksi andesit, lava andesit, breksi laharik, serta jatuhnya piroklastik) yang tersusun oleh mineral utama berupa plagioklas dan piroksen. Ion karbonat yang lebih tinggi dari ion klorida menunjukkan air tanah berasal dari reaksi antara air hujan dengan atmosfer pada kedalaman dangkal.

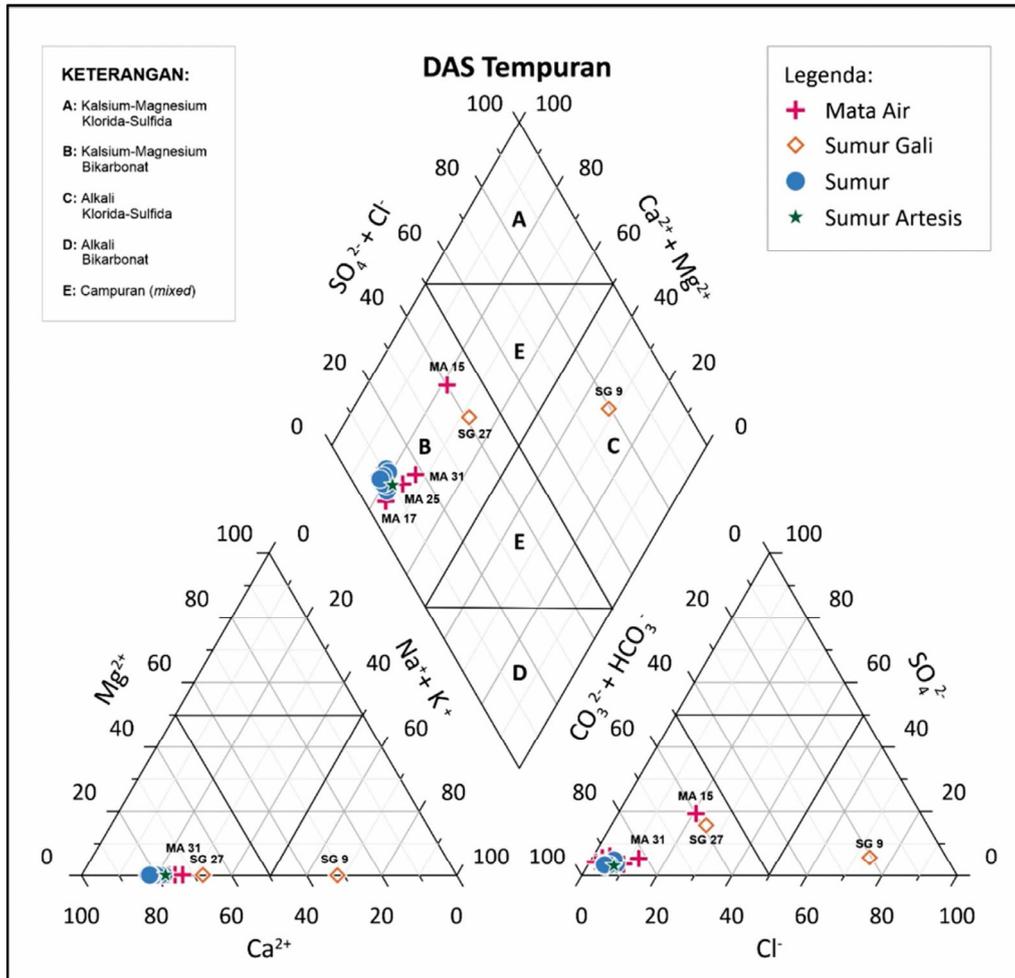
Tipe kedua, Alkali Klorida dicirikan dengan ion  $Ca^{2+}+Mg^{2+} > Na^{+}+K^{+}$  dan  $HCO_3^{-} > Cl^{-}+SO_4^{2-}$  yaitu pada sampel SG 9. Air tanah yang dicirikan dengan sifat kimia

ini merupakan air tanah yang berasal dari litologi material lepasan berukuran pasir-lempung dalam satuan litologi endapan aluvial. Kualitas air tanah pada daerah penelitian memiliki kandungan alkali melebihi kandungan alkali tanah, kandungan asam kuat melebihi kandungan asam lemah dan non-karbonat alkali (garam primer) lebih dari 50%, dan sifat air tanah didominasi alkali dan asam kuat. Tipe air tanah dengan kandungan alkali klorida menunjukkan air tanah pada daerah penelitian berasal dari jenis litologi dengan ion sodium dan potassium yang tinggi pada daerah penelitian, sedangkan ion klorida yang lebih tinggi dari ion karbonat menunjukkan air tanah yang berasosiasi dengan air laut.

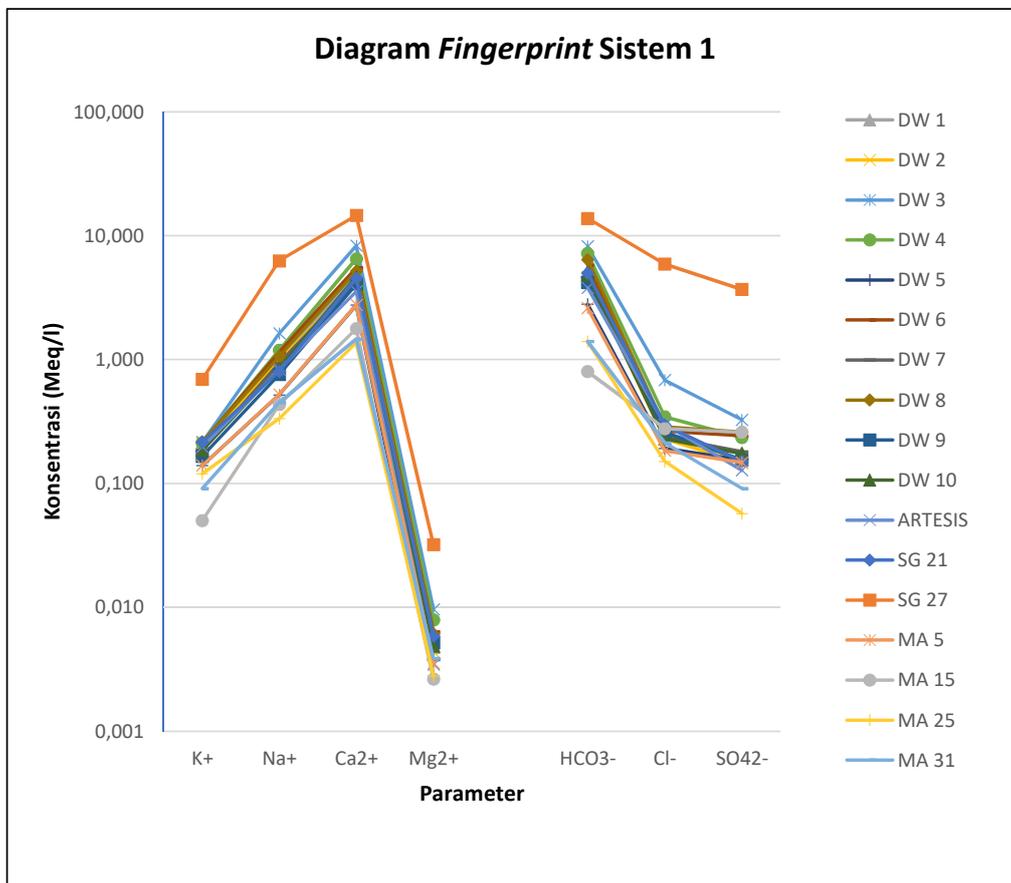
Analisis diagram *fingerprint* menunjukkan adanya 3 tipe air tanah (**Gambar 9 A,B,C**). Sistem 1 yaitu air tanah yang memiliki nilai konsentrasi  $K^{+} < Na^{+} < Ca^{2+} > Mg^{2+}$  dengan nilai  $HCO_3^{-} > Cl^{-} > SO_4^{2-}$ . Sampel air tanah yang termasuk ke dalam sistem 1 adalah MA 5, MA 15, MA 25, MA 31, SG 21, SG 27, DW 1, DW 2, DW 3, DW 4, DW 5, DW 6, DW 7, DW 8, DW 9, DW 10, dan sumur artesis. Sistem 2 yaitu air tanah yang memiliki nilai konsentrasi  $K^{+} < Na^{+} < Ca^{2+} > Mg^{2+}$  dengan nilai  $Cl^{-}$  rendah dan ion  $HCO_3^{-} > SO_4^{2-}$ . Sampel air tanah yang termasuk ke dalam sistem 2 adalah MA 9, MA 17, dan MA 29. Sistem 3 yaitu air tanah yang memiliki nilai konsentrasi  $K^{+} < Na^{+} > Ca^{2+} > Mg^{2+}$  dengan nilai  $Cl^{-}$  tinggi dan ion  $HCO_3^{-} > SO_4^{2-}$ . Sampel air tanah yang termasuk ke dalam sistem 3 adalah SG 9. Pola sistem 1 dan 2 memiliki kesamaan pada hasil diagram *fingerprint* pada Gunungapi lainnya (Hadian et al., 2016; Hendrayana et al., 2023; Maheswari et al., 2023).



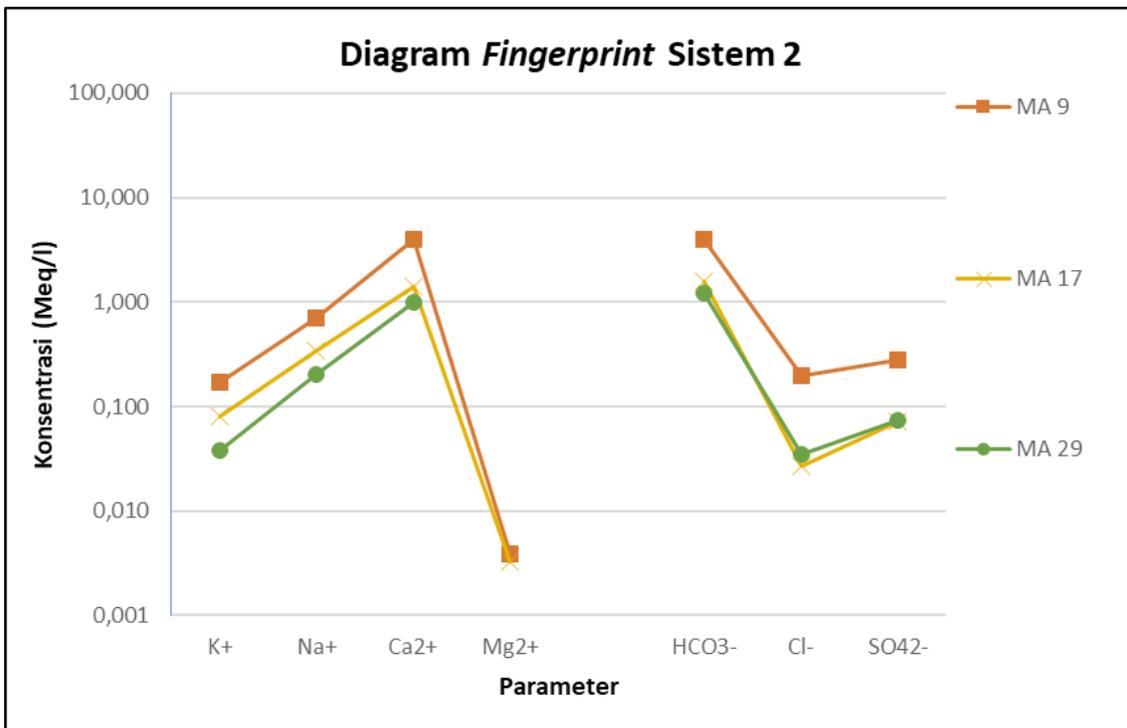
Gambar 7.a Peta Sebaran Klasifikasi Kurlov dan Gambar 7.b Peta Sebaran Klasifikasi Piper Diagram (Sumber Peta Dasar : BIG 2004)



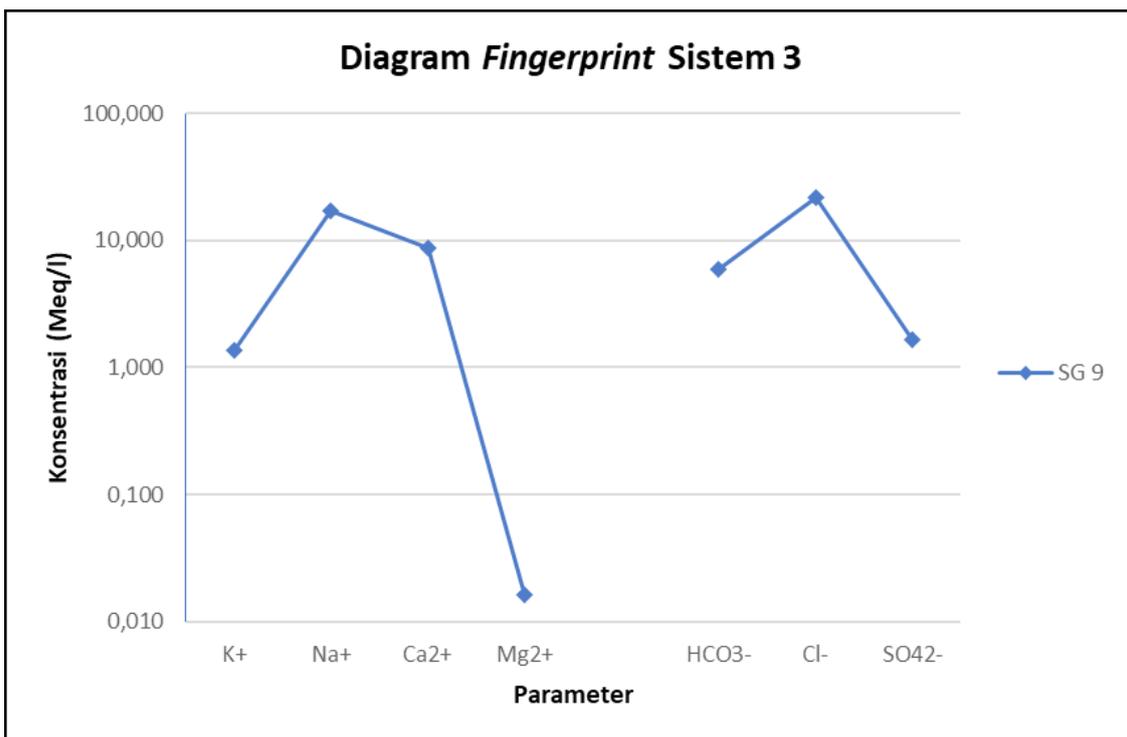
Gambar 8. Analisis Tipe Air Tanah dengan Diagram Trilinier Piper



Gambar 9A. Analisis Tipe Air Tanah dengan Fingerprint Diagram Sistem 1



Gambar 9B. Analisis Tipe Air Tanah dengan Fingerprint Diagram Sistem 2



Gambar 9C. Analisis Tipe Air Tanah dengan Fingerprint Diagram Sistem 3

**3. Karakteristik Hidroisotop**

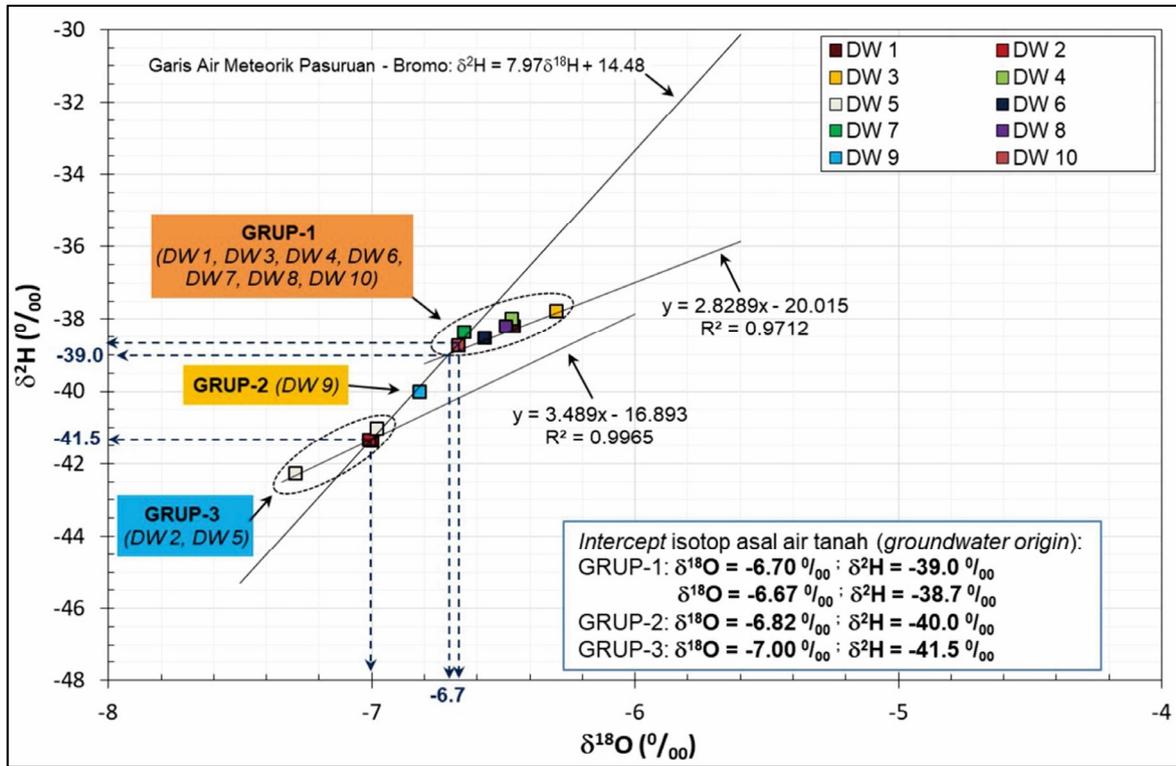
Analisis Isotop <sup>18</sup>O dan <sup>2</sup>H lokasi kajian terdiri atas 3 tipe (Gambar 10). Grup 1 terdiri atas DW 1, DW 3, DW 4, DW 6, DW 7, DW 8, dan DW 10 (Tabel 2). Dilihat dari garis evaporasi, air tanah dari sumur-sumur bor ini digolongkan dalam satu kelompok. Hasil tersebut menunjukkan berasal dari daerah resapan yang relatif sama. Sementara itu air tanah DW 3 sebagian besar nilai isotop <sup>δ18</sup>O dan <sup>2</sup>H air tanah berada dekat garis air meteorik lokal (LMWL) Pasuruan. Air tanah DW 3 relatif mengalami fenomena evaporasi yang kemungkinan

disebabkan interaksi dengan air tanah yang lebih dangkal. Grup 2 terdiri atas DW 9 yang berada diantara air tanah Grup-1 dan Grup-3. Nilai isotop <sup>δ18</sup>O dan <sup>2</sup>H dari air tanah DW 9 ini berada pada LMWL Pasuruan. Hasil tersebut menunjukkan tipikal air tanahnya masih merepresentasikan sebagai air meteorik. Grup 3 terdiri atas DW 2 dan DW 5. Dari grafik terlihat bahwa dari dua kali pengambilan dalam waktu yang berbeda, nilai isotop <sup>δ18</sup>O dan <sup>2</sup>H air tanah DW 2 konsisten berada pada LMWL Pasuruan. Sementara nilai isotop <sup>δ18</sup>O dan <sup>2</sup>H air tanah DW 5 nilai isotop <sup>δ18</sup>O dan <sup>2</sup>H yang

lebih *depleted* dibandingkan air tanah DW 2. Hasil tersebut menunjukkan tipikal kondensasi, yaitu air meteorik yang infiltrasi saat musim hujan dengan temperatur lebih rendah dibandingkan saat infiltrasi air meteorik DW 2. Pengambilan sampel kedua memiliki nilai isotop  $\delta^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  air tanah DW 5 ini berhimpit dengan air tanah DW 2 dan berada pada LMWL Pasuruan. Air tanah DW 2 dan DW 5 tersebut berasal dari daerah resapan yang relatif sama.

Air tanah yang diambil dari mataair di tiga lokasi yaitu MA-05, MA-06 dan MA-17. MA-05 dan MA-06 berada dekat

LMWL Pasuruan yang merepresentasikan masih memiliki karakter yang tetap sebagai air tanah yang berasal dari air hujan (**Gambar 11**). MA-17 mengalami fenomena evaporasi atau interaksi dengan air permukaan. MA-06 memiliki nilai isotop  $\text{d}^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  paling kaya dibandingkan air tanah lainnya. Hasil tersebut menunjukkan MA-06 berasal dari air hujan setempat atau *imbuhan lokal*. Air tanah SG-21 berada pada garis LMWL Pasuruan atau masih memiliki karakter sebagai air meteorik. Air tanah SG-21 ini merupakan sumur gali tertutup yang menggunakan pompa dalam pemanfaatan sehari-harinya.



Gambar 10. Grafik Kelompok Air tanah

Tabel 2. Hasil analisis isotop  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  sampel air tanah

Kode	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
DW 1	-6,46	-38,2
DW 2	-7,00	-41,4
DW 3	-6,30	-37,8
DW 4	-6,47	-38,0
DW 5	-7,29	-42,3
DW 6	-6,57	-38,5
DW 7	-6,65	-38,4
DW 8	-6,49	-38,2
DW 9	-6,82	-40,0
DW 10	-6,67	-38,7
Artesis 1	-6,28	-36,6
MA-05	-6,52	-37,0
MA-06	-6,31	-35,5
MA-17	-6,03	-37,0
SG-17	-6,20	-37,8
SG-21	-6,35	-36,2
SB-01	-6,96	-40,2
SB-02	-6,84	-39,5

(Sumber : Hasil Olah 2023)

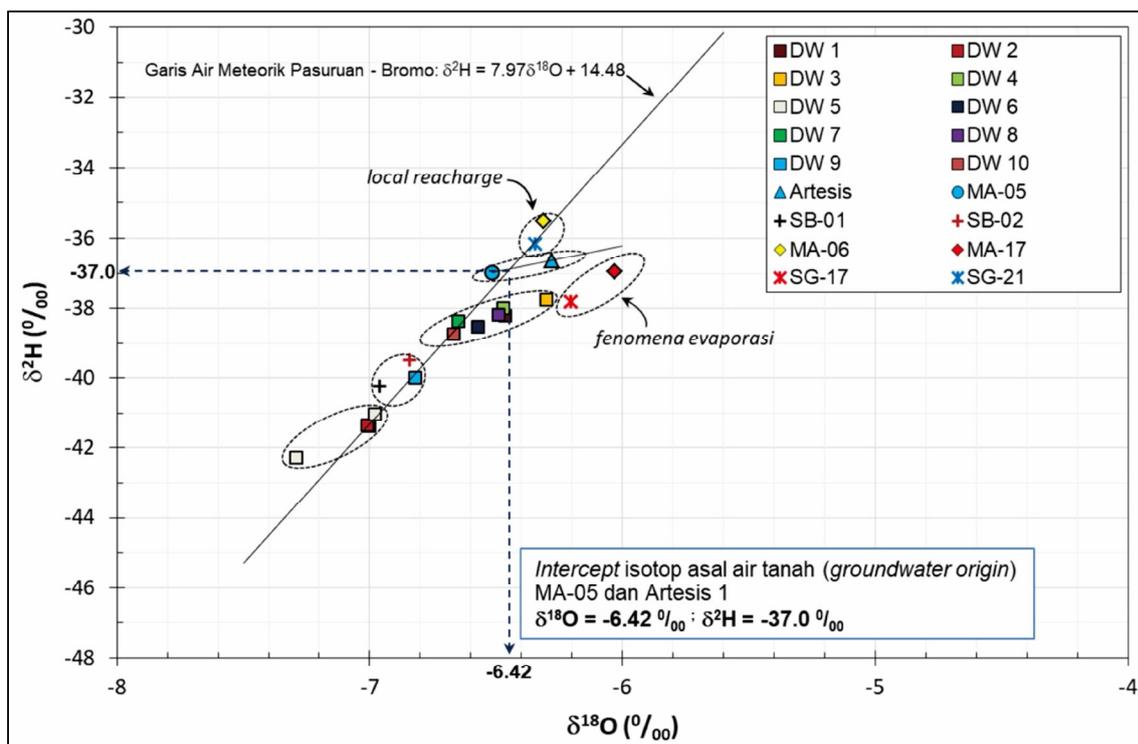
Sementara air tanah SG-17 menunjukkan fenomena evaporasi akibat kontak langsung dengan udara luar. Air tanah SG-17 ini merupakan sumur terbuka yang menggunakan timba dalam pemanfaatan sehari-harinya. Air tanah Artesis 1 dalam grafik terlihat berada dekat LMWL Pasuruan, namun nilai isotop  $\delta^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  lebih kaya dibanding SB-01 dan SB-02. Hasil tersebut mengindikasikan perbedaan asal imbuhan air tanahnya atau ada faktor lain yang mempengaruhinya. Air tanah Artesis 1 diperkirakan memiliki asal air tanah yang relatif sama dengan air tanah MA-05, namun air tanah Artesis 1 diperkirakan dipengaruhi air meteorik setempat sehingga nilai kedua isotopnya menjadi lebih kaya dibandingkan MA-05. SB-01 dan SB-02 masing-masing berada relatif dekat dengan DW 9 atau berada satu kelompok dengan air tanah Grup-2 dan diperkirakan ketiganya berasal dari daerah resapan yang relatif sama.

Hasil substitusi nilai isotop  $\delta^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  dalam persamaan elevasi (1) dan (2) air tanah di lokasi kajian berasal dari 4 kelas elevasi yang berbeda dengan rentang 430-805 mdpl (Tabel 3). Hasil tersebut cukup berbeda pada lereng Gunungapi Bromo

bagian utara untuk elevasi imbuhan terendah pada rentang 700-1.300 mdpl (Toulier *et al.*, 2019). Kelas elevasi Grup-1 terdiri atas DW 1, DW 3, DW 4, DW 6, DW 7, DW 8, dan DW 10. Nilai perpotongan isotop dari grup 1 adalah  $\delta^{18}\text{O} = -6,70 \text{ ‰}$ ;  $^2\text{H} = -39,0 \text{ ‰}$  dan  $\delta^{18}\text{O} = -6,67 \text{ ‰}$ ; dan  $^2\text{H} = -38,7 \text{ ‰}$ . Grup-2 terdiri atas DW 9, SB-01, SB-02. Nilai perpotongan nilai isotop dari ketiga air tanah tersebut diperkirakan relatif sama, yaitu dengan mengacu pada nilai isotop DW 9,  $\delta^{18}\text{O} = -6,82 \text{ ‰}$ ;  $^2\text{H} = -40,0 \text{ ‰}$ . Grup-3 terdiri atas DW 2 dan DW 5. Nilai perpotongan nilai isotop dari kedua air tanah tersebut yaitu  $\delta^{18}\text{O} = -7,00 \text{ ‰}$ ;  $^2\text{H} = -41,5 \text{ ‰}$ . Grup 4 terdiri atas Artesis 1 dan MA-05. Nilai *intercept* nilai isotop dari kedua air tanah ini, yaitu  $\delta^{18}\text{O} = -6,42 \text{ ‰}$ ;  $^2\text{H} = -37,0 \text{ ‰}$ . Hasil menunjukkan imbuhan air tanah dilokasi kajian tepatnya berada di Kecamatan Pasrepan. Puspo, dan Tukur (Gambar 12).

$$\text{Elevasi} = -1054,1\delta^{18}\text{O} - 6599,8 \tag{1}$$

$$\text{Elevasi} = -133,45\delta^2\text{H} - 4735,4 \tag{2}$$

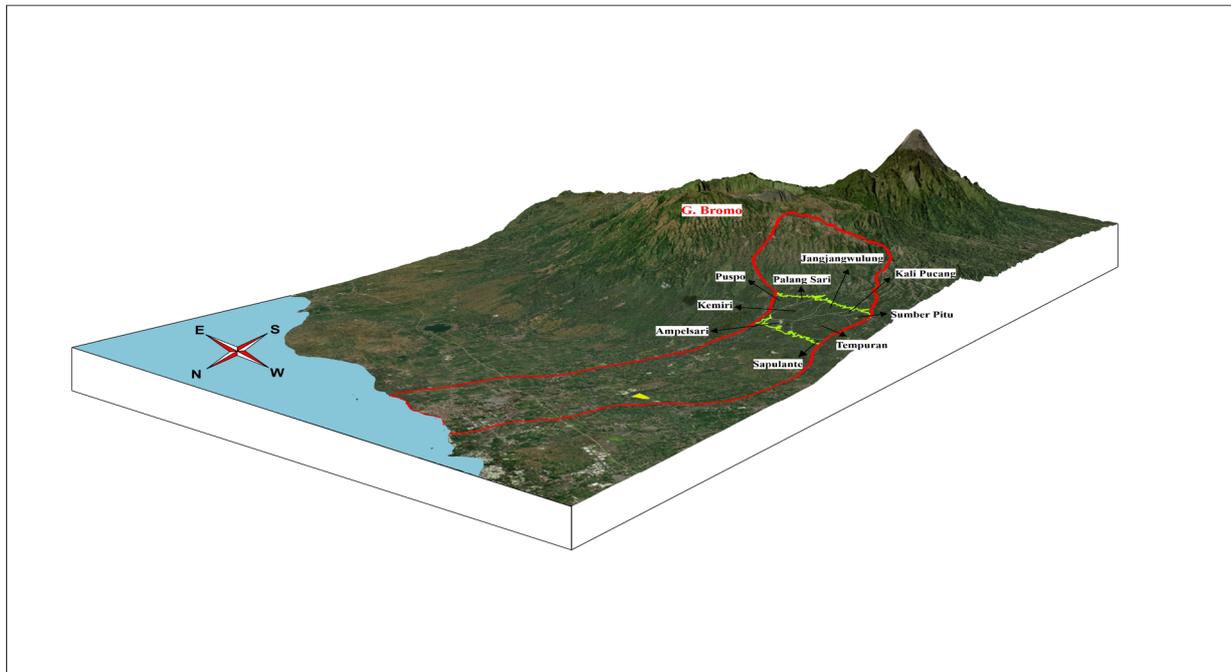


Gambar 11. Grafik Asal Usul Air tanah

Tabel 3. Estimasi elevasi imbuhan air tanah

Grup/Kode Sampel	Elevasi sampel (m dpl)	Estimasi elevasi imbuhan air tanah	
		berdasarkan pers. (1) (mdpl)	berdasarkan pers. (2) (mdpl)
<b>Grup-1</b>			
DW 1, DW 3, DW 4, DW 6, DW 7, DW 8, DW 10	44 – 49	430	470
<b>Grup-2</b>			
DW 9	51	585	605
SB-01, SB-02	76 – 82		
<b>Grup-3</b>			
DW 2, DW 5	46 – 48	775	805
Artesis 1	52	165	205
MA-05	85		

(Sumber : Hasil Olah 2023)



Gambar 12. Daerah imbuhan air tanah berdasarkan kajian hidroisotop

#### 4. Model Konseptual

Model konseptual sistem hidrogeologi lokasi kajian dapat dilihat pada (Gambar 13). Konfigurasi bawah permukaan berdasarkan kondisi geologi di daerah penelitian menunjukkan satuan endapan aluvial dan endapan lahar merupakan zona akuifer dengan aliran air melalui ruang antar butir (produktivitas tinggi dan penyebaran luas). Satuan endapan aluvial dan endapan lahar bertindak sebagai akuifer yang tersusun atas material lepasan, serta breksi laharik dengan matriks berupa pasir dan fragmen andesit. Satuan lava dan breksi andesit merupakan zona akuifer dengan aliran air melalui celahan dan ruang antar butir (produktivitas sedang dan penyebaran luas). Akuiklud dilokasi kajian tersusun atas litologi lava andesit dan breksi andesit. Satuan jatuhan piroklastik merupakan zona akuifer dengan aliran air melalui celahan dan ruang antar butir (produktivitas sedang dan penyebaran setempat). Akuitard dilokasi kajian tersusun atas litologi tuf dan lapilli tuf. Hasil konseptual model tersebut mendekati hasil model Toulrier et al., (2019). Validasi lainnya diperoleh dari 10 data pengeboran sumur dalam (SIPA) yang terdiri atas tanah (0-6 m), litologi tuf kasar (6-30 m), batupasir (30-70 m), batupasir sisipan tuf sangat halus (70-90 m), tuf sangat halus (90-100 m), dan lapisan paling bawah tersusun atas lava (>100 m) (ESDM, 2022).

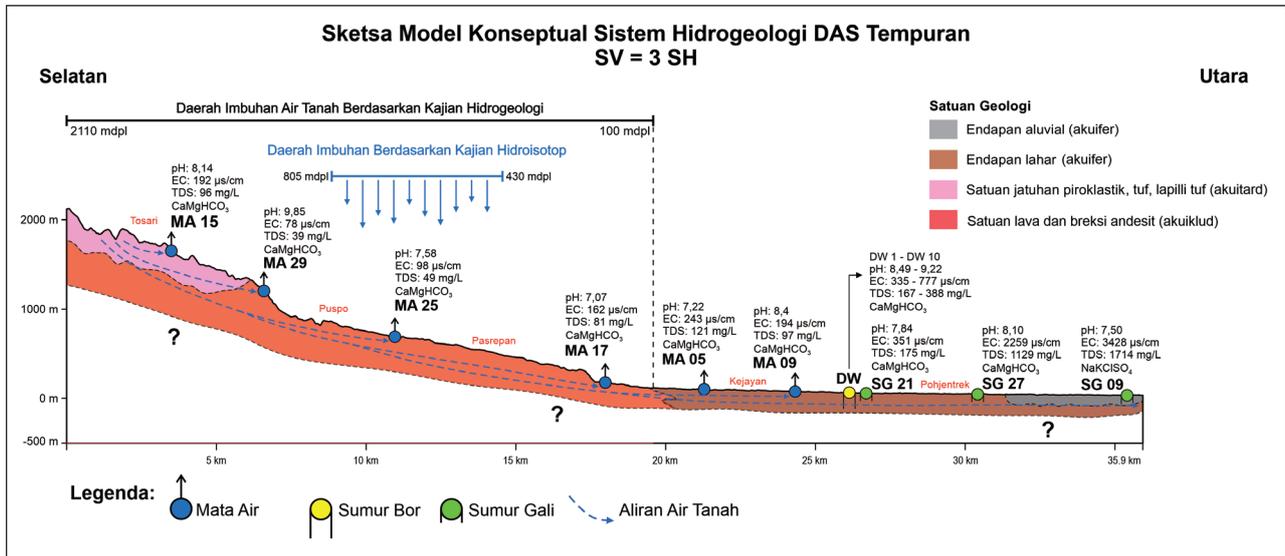
Daerah imbuhan air tanah berada pada lereng gunung Bromo di sebelah barat daerah penelitian berdasarkan hasil analisis hidrogeologi terletak pada elevasi 100 hingga 2.110 mdpl, sedangkan daerah lepasan air tanah pada elevasi 50-100 mdpl merupakan zona manifestasi dari air tanah di bagian utara daerah penelitian (Gambar 11). Berdasarkan hasil analisis isotop daerah imbuhan air tanah dilokasi kajian berada pada elevasi sekitar 430 hingga 805 mdpl. Kedalaman muka air tanah di daerah penelitian berkisar 0,35-36 meter. Pola aliran air tanah di daerah penelitian mengalir dari selatan ke arah utara dengan garis kontur elevasi muka air tanah berkisar 2.005 meter sampai 31 meter. Nilai DHL, TDS, suhu, dan pH air tanah menunjukkan kecenderungan nilai yang semakin tinggi ke arah utara. Pola tipe Airtanah dari hulu-

tengah DAS termasuk kalsium-bikarbonat dan mulai berubah menjadi alkali klorida pada bagian hilir.

Kondisi geologi daerah penelitian dengan potensi penggunaan air tanah yang berkelanjutan dapat dilihat dari model konseptual yang membagi tipe akuifer. Daerah yang sulit dimanfaatkan airnya adalah satuan lava dan breksi andesit (akuiklud). Hal tersebut disebabkan oleh Akuifer bercelah atau sarang dengan produktif kecil dan penyebaran setempat. Manajemen yang perlu dilakukan adalah dengan menampung air dari mataair dan mendistribusikannya. Daerah dengan air tanah dengan produktivitas sedang-tinggi dan penyebaran luas-setempat terdapat Litologi satuan jatuhan piroklastik, tuf, dan lapilli tuf. Potensi mataair melimpah dapat ditampung dan juga di distribusikan. Akuifer dengan aliran air melalui ruang antar butir dengan produktif dan penyebaran luas terdapat pada litologi endapan lahar dan aluvial. Kedua litologi tersebut memiliki potensi air tanah yang besar dan dangkal sehingga mudah dimanfaatkan.

Karakteristik sifat kimia-fisika air tanah dengan potensi penggunaan air tanah yang berkelanjutan dilokasi kajian dapat dilihat dari nilai masing masing kandungan ion pada air tanah. Analisis hidrogeokimia menunjukkan tingkat pencemaran air tanah yang ada di daerah penelitian dikategorikan tidak tercemar dan kualitasnya sangat baik. Air tanah dilokasi kajian sangat sesuai untuk dikonsumsi karena setiap parameter air tanahnya masih jauh di bawah kadar maksimum yang diperbolehkan (Tabel 4). Manajemen yang dapat dilakukan supaya sifat kimia-fisika air tanah tetap terjaga adalah melindungi sempadan mata air dan recharge area supaya tidak tercemar. Selain itu pemanfaatan air tanah pada area pesisir perlu memperhatikan safe yield supaya tidak terjadi intrusi air laut.

Zona imbuhan air tanah berdasarkan kajian hidroisotop didominasi dengan penggunaan lahan berupa tegalan dan kebun. Wilayah imbuhan air tanah tersebut perlu dilakukan konservasi supaya ketersediaan air tanah tetap terjaga pada area zona lepasan. Teknik konservasi air yang dapat dilakukan pada area tegalan dan kebun dengan membuat pola tanam *alley*



Gambar 13. Model konseptual sistem hidrogeologi DAS Tempuran

Tabel 4. Kandungan ion utama dalam air tanah dan batasan kandungan ion

Parameter	Baku Mutu Permenkes 492 Tahun 2010	Satuan	Rata-Rata Hasil Analisis	Satuan
Klorida (Cl <sup>-</sup> )	250	mg/l	54,43	mg/l
Besi (Fe <sup>3+</sup> )	0,3	mg/l	-	mg/l
Sulfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	250	mg/l	19,75	mg/l
Fluorida (F <sup>-</sup> )	1,5	mg/l	-	mg/l
Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	50	mg/l	8,95	mg/l
Mangan (Mn <sup>2+</sup> )	0,1	mg/l	-	mg/l
Sodium (Na <sup>+</sup> )	200	mg/l	41,69	mg/l
Kesadahan (Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup> +HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	500	mg/l	368,23	mg/l
pH	6,5 - 8,5	-	7,8	-

*croppig* (penanaman sejajar kontur) dan membuat rorakan untuk meresapkan air dan menahan sedimen (BPDAS, 2004). Selain itu terdapat penggunaan lahan permukiman dengan luasan terendah pada area recharge. Teknik konservasi yang dapat dilakukan pada area permukiman dengan menggunakan sumur resapan dan biopori untuk meresapkan air hujan ke sistem air tanah.

**KESIMPULAN**

Litologi penyusun DAS Tempuran terdiri atas satuan lava dan breksi andesit, satuan jatuhan piroklastik, endapan lahar, dan endapan aluvial. Nilai TDS, pH, Suhu, dan EC di DAS Tempuran semakin meningkat dari hulu ke hilir. Pola aliran air tanah pada DAS Tempuran secara umum mengalir dari arah selatan menuju utara. Satuan lava dan breksi andesit merupakan akuifer, lava andesit dan breksi andesit merupakan akuiklud, jatuhan piroklastik merupakan akuifer, dan tuf dan lapilli tuf merupakan akuitard. Tipe air tanah pada DAS Tempuran didominasi oleh tipe kalsium bikarbonat dan kalsium magnesium bikarbonat. Sampel air tanah di DAS Tempuran keseluruhan berasal dari air meteorik. Imbunan air tanah di DAS tempuran berasal dari elevasi 430-805 mdpl. Kondisi air tanah dilokasi kajian tergolong memiliki kualitas

air yang bagus dan tidak tercemar dari analisis sifat fisika-kimia air tanah. Potensi air tanah dilokasi kajian termasuk potensi yang besar pada litologi endapan lahar dan endapan aluvial. Selain itu potensi mataair yang besar terdapat pada litologi jathan piroklastik, lapilli tuf, dan tuff. Konservasi perlu dilakukan pada area imbunan air tanah pada penggunaan lahan tegalan dan kebun berupa alley cropping dan rorakan. Sumur resapan dan biopori perlu ditambhkan pada permukiman di area imbunan air tanah.

**UCAPAN TERIMA KASIH**

Terimakasih penulis sampaikan kepada Departemen Teknik Geologi Universitas Gadjah Mada atas perizinan dan dukungan dalam kegiatan lapangan. Selain itu penulis juga menyampaikan terimakasih atas kolaborasi penelitian bersama dengan PT Tirta Fresindo Jaya Pasuruan.

**KONTRIBUSI PENULIS**

**Penulis Pertama** mendisain penelitian dan membuat naskah publikasi; **Penulis Kedua** menulis dan mereview naskah; dan **Penulis Ketiga** analisis data dan interpretasi hasil, menulis naskah.

## DAFTAR PUSTAKA

- Angelakis, A. N., Voudouris, K. S., & Mariolakos, I. (2016). Groundwater utilization through the centuries focusing on the Hellenic civilizations. *Hydrogeology Journal*, 24(5), 1311–1324. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1392-0>
- Batan. 2006. *Laporan isotop air tanah PT Nestle*. Bandung : Badan Atom Nasional.
- Baud, B., Lachassagne, P., Jourde, H., De Montety, V., Fadillah, A., Dörfli, N., Hendrayana, H., & Rachmansyah, A. (2021). Preliminary conceptual model of the Arjuno Welirang hydrogeological system, and comparison with the Bromo: An illustration of the hydrogeological systems diversity in volcanic areas. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 851(1). DOI 10.1088/1755-1315/851/1/012016
- BPDAS. 2004. Informasi Teknik Rehabilitasi Lahan dan Konservasi Tanah. Yogyakarta : Departemen Kehutanan Balai Pengelolaan DAS Serayu Opak Progo.
- Cholo, B. E., & Tolossa, J. G. (2023). Identification of groundwater imbuhan and flow processes inferred from stable water isotopes and hydraulic data in Bilate River watershed, Ethiopia. *Hydrogeology Journal*, 31(6). <https://doi.org/10.1007/s10040-023-02698-3>
- Giordano, M. (2009). Global groundwater? Issues and solutions. *Annual Review of Environment and Resources*, 34, 153–178. DOI 10.1146/annurev.enviro.030308.100251
- Glynn, P. D., & Plummer, L. N. (2005). Geochemistry and the understanding of ground-water systems. *Hydrogeology Journal*, 13(1), 263–287. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0429-y>
- Hadian, M.S.D., Hendarmawan, Sulaksanan, N., and Azy, F.N. (2016). Hydrogeology of volcanic characterisation based on Volcanic Facies, Ground, Water Chemical Content, and Stable Isotope of Groundwater. *Proceeding International of Chemical, Biology, and Environment Engineering*. <https://DOI:10.7763/IPCBE.2016.V94.22>
- 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., Nuha, A., Riyanto, I. A., & Aprimanto, B. (2021a). Kajian Perubahan Muka Air tanah di Cekungan Air tanah Yogyakarta-Sleman. *Majalah Geografi Indonesia*, 35(1), 30–44. <https://doi.org/10.22146/mgi.62396>
- Hendrayana, H., Riyanto, I. A., & Nuha, A. (2020). Tingkat Pemanfaatan Air tanah di Cekungan Air tanah (CAT) Yogyakarta-Sleman. *Geodika: Jurnal Kajian Ilmu Dan Pendidikan Geografi*, 4(2), 127–137. <https://doi.org/10.29408/geodika.v4i2.2643>
- Hendrayana, H., Riyanto, I. A., Nuha, A., & Lisan, A. R. an K. (2021a). Unregistered Artesian Well Management in Pasuruan, Indonesia: An Attempt to Protect Groundwater Resources. *Indonesian Journal of Geography*, 53(3), 453–464. <https://doi.org/10.22146/IJG.68185>
- Houben, G. J., & Batelaan, O. (2022). The Thiem team - Adolf and Günther Thiem, two forefathers of hydrogeology. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(15), 4055–4091. <https://doi.org/10.5194/hess-26-4055-2022>
- Irawan, D.E., Puradimaja, D.J., Notosiswoyo, S., and 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>
- Jakeman, A. J., Barreteau, O., Hunt, R. J., Rinaudo, J. D., & Ross, A. (2016). Integrated groundwater management: Concepts, approaches and challenges. In *Integrated Groundwater Management: Concepts, Approaches and Challenges*, (pp. 1–762). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9>
- Khasanah, N., Tanika, L., Pratama, L. D. Y., Leimona, B., Prasetyo, E., Marulani, F., Hendriatna, A., Zulkarnain, M. T., Toulrier, A., & Van Noordwijk, M. (2021). Groundwater-extracting rice production in the Rejoso water-shed (Indonesia) reducing urban water availability: Characterisation and intervention priorities. *Land*, 10(6), 1–28. <https://doi.org/10.3390/land10060586>
- Maheswari, A.S., Putra, D.P.E., Handini, E., Wilopo, W., dan 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:10.22146/mgi.70636>
- Maheswari, A.S., Putra, D.P.E., Handini, E., Wilopo, W., dan Susatio, R. (2023). Karakteristik Hidrokimia dan Model Konseptual Sistem Akuifer di Desa Sumberarum, Kecamatan Tempuran, Kabupaten Magelang, Jawa Tengah. *Majalah Geografi Indonesia*, 37(2), 138-146.
- Peraturan Menteri Kesehatan RI. (2010). Nomor 492, Tentang Persyaratan Kualitas Air Minum. Kementerian Kesehatan. Jakarta.
- Poespowardoyo, R.S. (1984). *Peta Hidrogeologi Indonesia 1:250.000 Lembar X Kediri (Jawa)*. Bandung: Direktorat Geologi Tata Lingkungan.
- Rosyidi, M. I. (2018). Journal of Indonesian Tourism and Development Studies The Challenges of Developing Tourism Events in Bromo Tengger Semeru National Park. *J. Ind. Tour. Dev. Std*, 6(3). <https://doi.org/10.21776/ub.jitode.2018.006.03.02>
- Santosa, S., & Suwarti, T. (1992). *Peta Geologi Lembar Malang skala 1:100.000*. Bandung : Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Selles, A., Deffontaines, B., Hendrayana, H., & Violette, S. (2015). The eastern flank of the Merapi volcano (Central Java, Indonesia): Architecture and implications of volcanoclastic deposits. *Journal of Asian Earth Sciences*, 108, 33–47. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.04.026>
- Selles, A., Deffontaines, B., Hendrayana, H., & Violette, S. (2015). The eastern flank of the Merapi volcano (Central Java, Indonesia): Architecture and implications of volcanoclastic deposits. *Journal of Asian Earth Sciences*, 108, 33–47. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.04.026>
- Suharsono, & Suwarti, T., 1992, *Peta Geologi Lembar Probolinggo skala 1:100.000*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Sunarmi, N., Kumailia, E. N., Nurfaiza, N., Nikmah, A. K., Aisyah, H. N., Sriwahyuni, I., & Lailly, S. N. (2022). Analisis faktor unsur cuaca terhadap perubahan iklim di Kabupaten Pasuruan pada tahun 2021 dengan metode Principal Component Analysis. *Newton-Maxwell Journal of Physics*, 3(2), 56–64. <https://doi.org/10.33369/nmj.v3i2.23380>
- Toulrier, A., Baud, B., Montety, V. De, Lachassagne, P., Leonardi, V., Pistre, S., Dautria, J., & Hendrayana, H. (2019). Regional Studies Multidisciplinary study with quantitative analysis of isotopic data for the assessment of imbuhan and functioning of volcanic aquifers : Case of Bromo-Tengger volcano, Indonesia. *Journal of Hydrology*, 26, 100634. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100634>
- Wijatna, A.B., Sudarmadji., Sunarno., dan Hendrayana, H. (2013). Studi Variabilitas Isotop Airhujan Sebagai Fungsi Elevasi untuk Mendapatkan Merapi Meteoric Water Line (MMWL). 35(1), 50-57.
- Zaennudin, A., Hadisantono, R. D., Erfan, R. D., & Mulyana, A. R. (1994). *Peta Geologi Gunungapi Bromo - Tengger, Jawa Timur skala 1:50.000*. Jakarta: Direktorat Vulkanologi.