

HIDROGEOLOGI DAN HIDROKIMIA AIR TANAH PADA AREA PENAMBANGAN EMAS TRADISIONAL DI WILAYAH KALIREJO, KOKAP, KULON PROGO, DAERAH ISTIMEWA YOGYAKARTA

Riana Listiyastuti¹, Lestari Sutra Simamora¹, Muhamad Ilham¹, I Wayan Warmada¹, Doni
Prakasa Eka Putra^{1*}

Afiliasi : ¹Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia
e-mail : putra_dpe@ugm.ac.id

Abstrak. Kondisi air tanah di suatu daerah secara alami dipengaruhi oleh faktor geologi dan hidroklimatologi namun dapat berubah akibat aktivitas manusia. Daerah penelitian berada di Kalirejo, Kokap, Kulon Progo yang secara geologi tersusun oleh litologi batuan beku intrusi beserta dengan produk alterasi dan mineralisasinya. Alterasi dan mineralisasi di area ini berasosiasi dengan potensi emas, sehingga banyak dijumpai tambang emas dan pengolahan emas skala kecil yang dikelola masyarakat. Berdasarkan litologinya, hidrogeologi Kalurahan Kalirejo merupakan daerah air tanah langka. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan model konseptual hidrogeologi di wilayah ini dan karakteristik hidrokimia air tanahnya melalui evaluasi data geologi, analisis sifat fisika-kimia, serta analisis kandungan ion mayor pada air tanah dalam keterkaitan dengan dampak kegiatan pertambangan terhadap air tanah. Observasi lapangan dan 28 sampel air tanah telah diambil mewakili kondisi geologi dan kegiatan tambang emas. Analisis data geologi primer dan sekunder serta analisis menggunakan *Ion Chromatography* (IC) dan titrasi dilakukan untuk sampel air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar air tanah di area penelitian memiliki karakteristik yang serupa, yakni berasal dari akuifer dangkal yang terbentuk dari hasil pelapukan dan rekahan batuan (*fractured rock aquifer*). Pada beberapa area di daerah penelitian terdapat anomali kandungan sulfat pada air tanah yang cukup tinggi yang disebabkan oleh pelarutan dari mineral sulfat dan sulfida yang intensif dalam kaitannya dengan proses alterasi hidrotermal serta pembentukan air asam tambang akibat aktivitas penambangan yang ada.

Kata Kunci: air tanah; hidrokimia; konseptual hidrogeologi; tambang emas tradisional

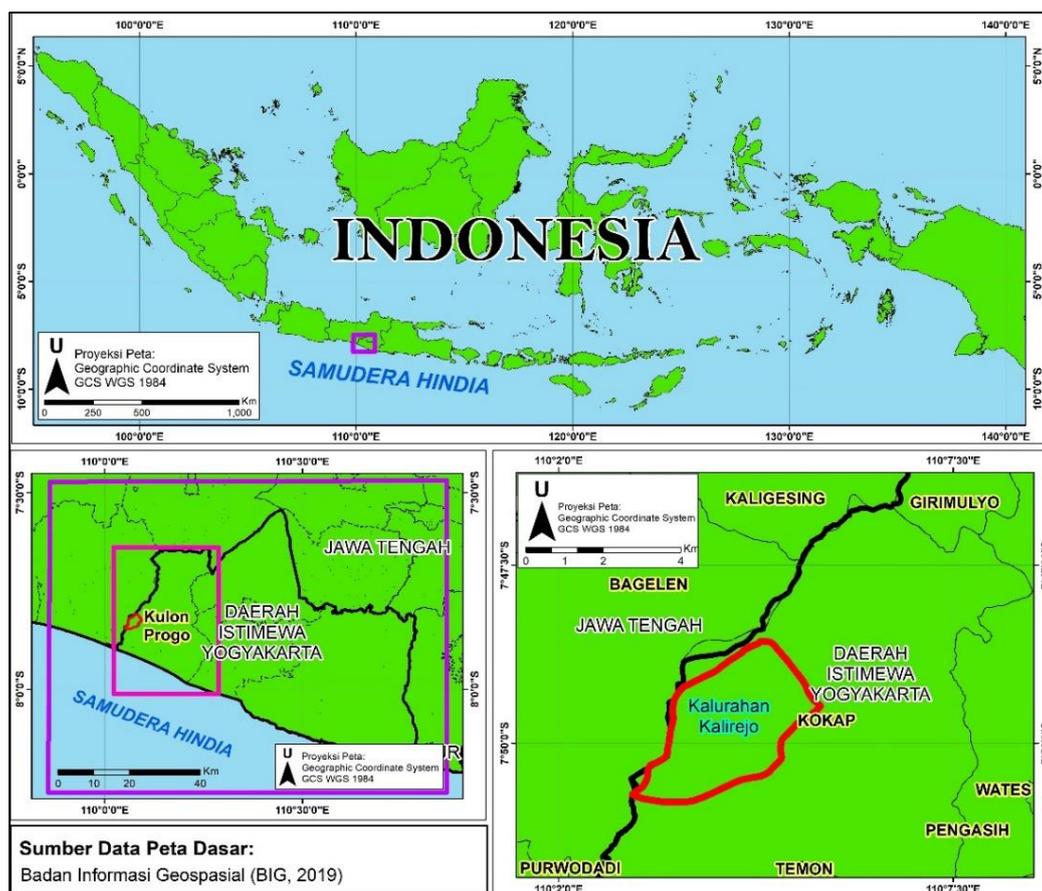
Abstract. The groundwater conditions in an area are naturally influenced by geological and hydroclimatological factors but can change due to human activities. The study area is located in Kalirejo, Kokap, Kulon Progo, which geologically consists of intrusive igneous rocks along with alteration and mineralization products. These alterations and mineralizations are associated with gold potential, leading to the presence of small-scale gold mining and processing managed by the local community. Due to its lithology, Kalirejo Village is classified as a water-scarce area in terms of hydrogeology. This study aims to develop a conceptual hydrogeological model of the area and characterize the hydrochemical properties of its groundwater by evaluating geological data and analyzing the physical-chemical properties and major ion content of the groundwater, especially in relation to the impact of mining activities. Field observations and 28 groundwater samples were collected to represent geological conditions and gold mining activities. Primary and secondary geological data analysis, as well as tests using *Ion Chromatography* (IC) and titration, were conducted on the water samples. The study results indicate that most of the groundwater in the area has similar characteristics, originating from shallow aquifers formed by weathered and fractured rocks (*fractured rock aquifers*). In some parts of the study area, high sulfate content anomalies were found in the groundwater, caused by the dissolution of sulfate and sulfide minerals. This process is related to intensive hydrothermal alteration and the formation of acid mine drainage due to mining activities.

Keywords: groundwater; hydrochemistry; conceptual hydrogeology; artisanal gold mining

PENDAHULUAN

Kondisi geologi di suatu daerah dapat memengaruhi kondisi air tanah melalui mekanisme interaksi kimiawi, fisik, dan kinetis (Tóth, 1999). Pada area yang didominasi oleh batuan beku intrusif, potensi air tanah kemungkinan dijumpai pada zona dangkal hasil pelapukan batuan dan pada rekahan-rekahan batuan (Gustafson dan Krásný, 1994). Oleh karena itu, potensi air tanah pada area tersebut cenderung minim dan kualitasnya akan sangat dipengaruhi proses geologi yang ada, seperti pelapukan, mineralisasi, dan alterasi (Kurwadkar dkk., 2020). Mengingat kondisi tersebut, pemahaman terkait model konseptual hidrogeologi dan hidrokimia air tanah pada area yang didominasi batuan beku intrusif menjadi sangat penting, karena kedepannya dapat dijadikan referensi dalam memahami potensi kontaminasi air tanah di daerah tersebut.

Salah satu wilayah yang disusun oleh batuan beku intrusif adalah Kalurahan Kalirejo (Pambudi dkk., 2018). Secara administratif, Kalurahan Kalirejo adalah bagian dari Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Gambaran lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1. Pada area penelitian terdapat aktivitas penambangan tradisional yang dilakukan dengan menggali bukit dan mengikuti urat-urat yang mengandung bijih logam, kemudian diolah menggunakan merkuri melalui metode amalgamasi sehingga berpotensi mencemari air tanah (Simamora, 2021). Selain itu, proses penggalian berpotensi meningkatkan oksidasi batuan dan melepaskan logam-logam berat pada air tanah.



Gambar 1. Lokasi Area Kajian (batas area kajian, Kalurahan Kalirejo, ditandai dengan garis merah)

Kalurahan Kalirejo termasuk ke dalam daerah sulit air prioritas 1 dengan rincian: daerah sulit air, dapat dilakukan pengeboran air tanah dalam, tidak ada sumber PAM (Perusahaan Air Minum), serta tidak ada sumber air lain (Hendrayana dkk., 2021). Dikarenakan tidak terdapat sumber air lain yang memadai, masyarakat di Kalurahan Kalirejo menggunakan air tanah dangkal dan air sungai untuk keperluan sehari-hari. Di sisi lain, air tanah di Kalirejo sangat rawan tercemar logam berat karena kondisi alamiah yang merupakan produk dari alterasi dan mineralisasi pada zona epitermal sulfidasi rendah serta adanya proses antropogenik berupa

penambangan emas rakyat (Pramumijoyo dkk., 2017). Penelitian terdahulu menunjukkan adanya kandungan logam berat pada air tanah, air sungai, dan sedimen sungai di Kalurahan Kalirejo (Simamora, 2021).

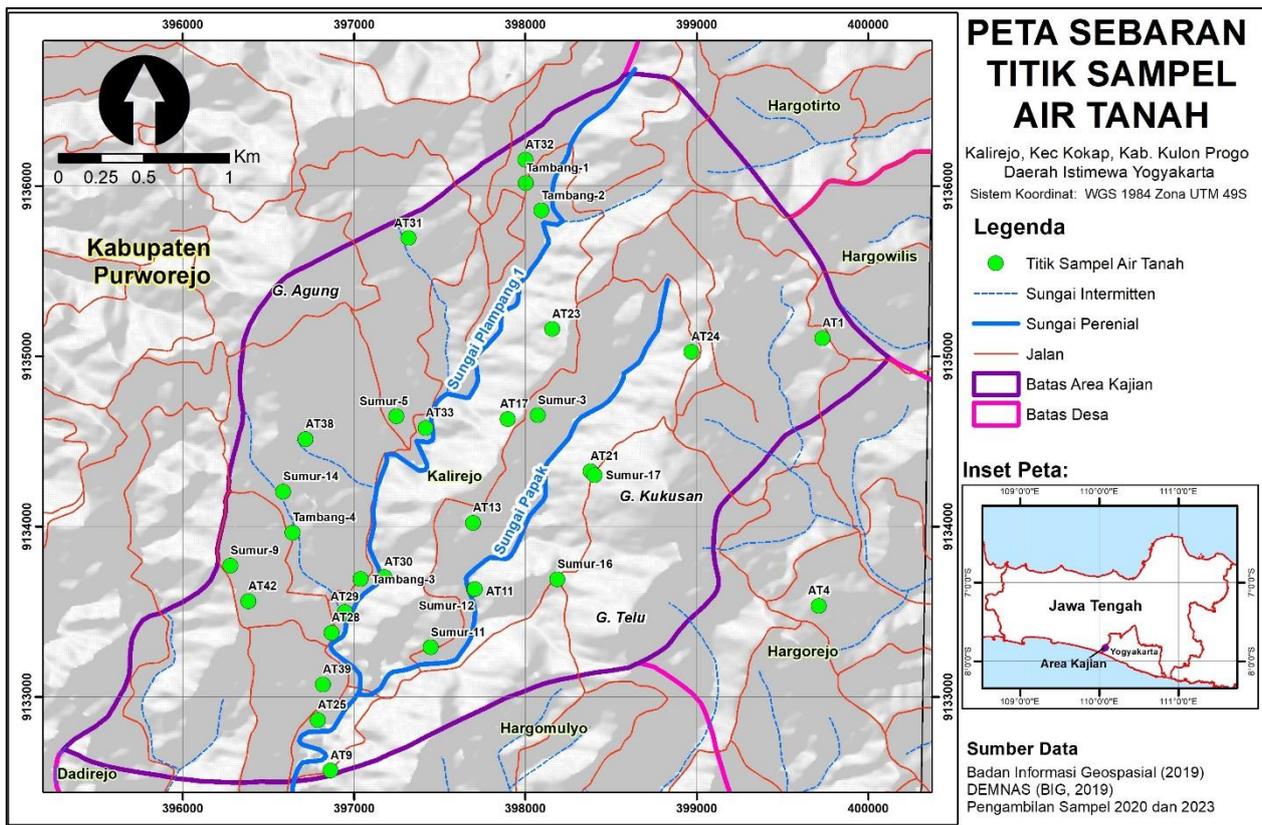
Secara geologi regional, Kalurahan Kalirejo termasuk ke dalam Formasi Andesit Tua yang terletak pada tubuh bagian selatan dari Gunung Ijo (Rahardjo dkk., 1995; Widagdo dkk., 2020). Secara hidrogeologi regional, Kalurahan Kalirejo termasuk ke dalam Cekungan Air Tanah (CAT) Menoreh yang tersusun oleh Formasi Andesit Tua yang merupakan produk dari vulkanisme (Hendrayana dkk., 2020). Komposisi akuifer didominasi oleh hasil pelapukan batuan beku andesit dari formasi tersebut yang menyebabkan daerah ini memiliki ketebalan akuifer dan transmisivitas yang kecil, sehingga produktivitas akuifer menjadi kecil dan termasuk ke dalam daerah air tanah langka dan rawan terhadap pemanfaatan air tanah (Hendrayana dkk., 2021).

Mengingat kebutuhan air tanah yang semakin meningkat, sedangkan kondisi geologi dan aktivitas penambangan di area penelitian memiliki potensi mengontaminasi air tanah, penelitian terkait model konseptual hidrogeologi dan hidrokimia air tanah perlu dilakukan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui gambaran model konseptual hidrogeologi dan karakteristik hidrokimia air tanah di Kalurahan Kalirejo, sehingga kedepannya diharapkan dapat menjadi referensi dalam memahami potensi kontaminasi pada air tanah yang ada.

METODOLOGI

Dalam rangka menghasilkan model konseptual hidrogeologi dan karakteristik hidrokimia air tanah di area penelitian maka dilakukan pengumpulan data primer dan data sekunder. Data primer berupa data observasi lapangan yang dilakukan pada kuartal 2 tahun 2023 dan data hasil pengujian kandungan ion mayor di laboratorium. Observasi lapangan yang dilakukan terdiri dari pengamatan kondisi geologi serta pengumpulan data hidrogeologi sumur dangkal dan lubang tambang yang meliputi titik koordinat, data fisik sumur (kedalaman sumur, kedalaman muka air tanah), data fisika-kimia air tanah (pH, TDS, DHL, suhu) dan pengambilan sampel ion mayor air tanah yang mengacu SNI 6989.58:2008 (BSN, 2008) Elevasi muka air tanah yang digunakan untuk pembuatan kontur muka air tanah pada peta hidrogeologi diperoleh melalui elevasi DEM (*Digital Elevation Model*) dikurangi dengan kedalaman muka air tanah dari permukaan tanah. Pengukuran sifat fisika-kimia (pH, suhu, TDS, dan DHL) menggunakan alat *water quality meter 4 in 1* tipe EZ-9908. Data dasar untuk peta dan data DEM pada penelitian ini didapatkan dari Badan Informasi Geospasial (BIG, 2019) yang dapat diakses dari situs berikut: <https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/>.

Sumur gali dengan TDS relatif tinggi, mewakili bagian hulu-hilir pada setiap punggung, atau relatif dekat dengan area tambang dipilih untuk dilakukan pengambilan sampel air tanah dan dilakukan pengujian kandungan ion mayor. Dari total keseluruhan 31 stasiun observasi, pengujian kandungan ion mayor dilakukan pada 1 lubang tambang yang terletak pada hulu punggung bagian barat Kalirejo dan 27 sumur gali yang tersebar di Kalurahan Kalirejo (lihat Gambar 2). Kandungan ion mayor seperti kation Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} serta anion Cl^- , SO_4^{2-} diuji menggunakan *Ion Chromatography Metrohm 850 P*, sedangkan kandungan HCO_3^- menggunakan metode titrasi. Hasil analisis dalam satuan mg/L diubah menjadi meq/L, kemudian dilakukan perhitungan *Charge Balance Error* (CBE). Nilai error $\pm 2-5\%$ menunjukkan bahwa proses analisis sampel valid, sehingga sampel dapat dianalisis lebih lanjut. Konsentrasi ion-ion tersebut digunakan untuk mengidentifikasi tipe kimia air tanah yang divisualisasikan dalam bentuk diagram Piper, Durov, Schoeller, dan Stiff (Piper, 1944; Durov, 1948; Schoeller, 1965; Peng dkk., 2022; Goswami dkk., 2022). Hasil pengeplotan pada diagram Piper digunakan untuk mengelompokkan sampel berdasarkan kandungan ion dominan pada air tanah, sedangkan diagram Durov dan Schoeller digunakan untuk mengetahui pola kandungan ion mayor. Apabila menunjukkan pola-pola yang sama, maka sampel-sampel tersebut dapat diduga dipengaruhi kondisi yang sama, sehingga dapat dikelompokkan menjadi kelompok yang sama pada diagram Stiff.



Gambar 2. Peta Sebaran Titik Sampel Air Tanah di Area Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Geologi Daerah Penelitian

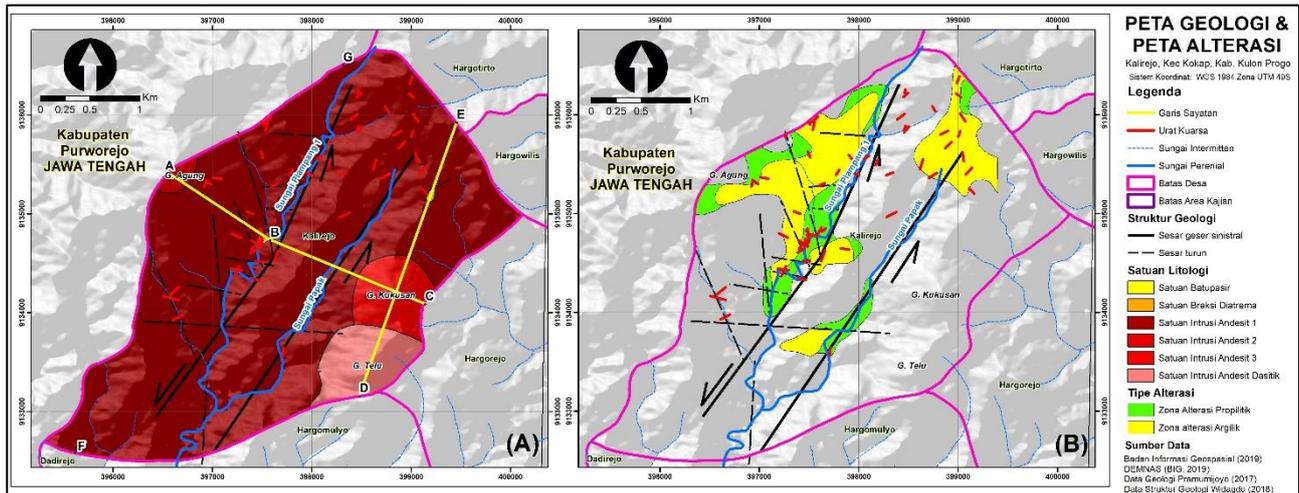
Pramumijoyo dkk. (2017) membagi Kalirejo menjadi 6 satuan litologi berdasarkan waktu terbentuknya dan kenampakan secara megaskopis (Gambar 3). Satuan dari yang tertua hingga termuda terdiri dari Satuan Batupasir, Satuan Intrusi Andesit 1 yang tersusun oleh andesit hornblenda, Satuan Intrusi Andesit 2 dengan litologi berupa andesit, Satuan Breksi Diatrema, Satuan Intrusi Andesit 3 (penyusun Gunung Kukusan), dan Satuan Intrusi Andesit Dasitik (penyusun Gunung Telu). Penampang geologi dapat dilihat pada Gambar 4. Menurut Pramumijoyo (2017), terdapat satuan batupasir di area kajian, namun satuan tersebut tidak dijumpai saat observasi lapangan.

Litologi di Kalirejo, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo merupakan produk dari alterasi dan mineralisasi pada zona epitermal sulfidasi rendah pada kedalaman yang dalam (Pramumijoyo dkk., 2017), serta menjadi lokasi tambang emas tradisional yang ada di Daerah Istimewa Yogyakarta. Pada area penelitian, terdapat tiga zona alterasi yaitu alterasi *silica-clay*, alterasi propilitik, dan alterasi argilik (Pramumijoyo dkk., 2017) (Gambar 3). Alterasi *silica-clay* dicirikan dengan kehadiran kuarsa-ilit-ilit/smektit-kaolinit-kaolinit/smektit-serisit±smektit. Alterasi argilik terbentuk pada suhu yang lebih rendah dengan penciri berupa mineral lempung kaolinit/smektit dan ilit. Alterasi propilitik ditandai dengan kehadiran mineral klorit dan kalsit yang menyebabkan batuan berwarna kehijauan serta mineral lempung smektit dan ilit/smektit.

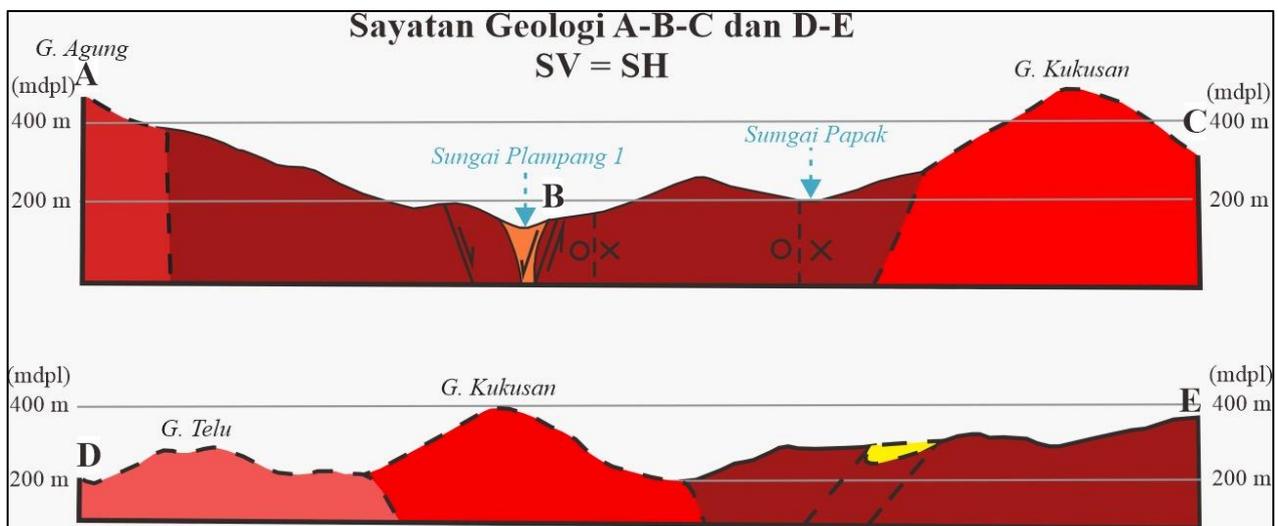
Hasil analisis XRD batuan menurut Pramumijoyo dkk. (2017) menunjukkan bahwa secara komposisi kimia, batuan segar dan batuan teralterasi propilitik didominasi oleh kalsium (CaO, 6.9-10.5% pada batuan) dan magnesium (MgO, 3.1-5.9% pada batuan), diikuti dengan kandungan natrium (Na₂O), dan kalium (K₂O) yang hampir sama (Ca>Mg>Na>K atau Ca>Mg>K>Na). Batuan teralterasi *silica-clay* dan argilik didominasi oleh kalium (1.5-4.9%), diikuti dengan magnesium (0,4-1%), natrium (<0.6%), dan kalsium (<0.3%) dalam

jumlah yang kecil ($K > Mg > Na > Ca$). Produk mineralisasi yang dijumpai berupa arsenopirit, sfalerit, galena, kalkopirit, pirit, markasit, kovelit, goetit, hematit, dan anastase (Pramumijoyo dkk., 2017).

Widagdo dkk. (2018) menjelaskan bahwa setidaknya terdapat dua fase tektonik yang mengontrol struktur di Kalirejo (Gambar 3). Fase pertama berupa kompresi U-S yang menghasilkan kekar gerus yang berkembang menjadi sesar sinistral berarah timur laut-barat daya (Sesar Plampang 1 dan Sesar Kukusan). Fase kedua berupa fase ekstensi utara-selatan yang menghasilkan sesar turun dengan arah jurus relatif barat-timur (Sesar Sangon Barat, Sesar Sangon Selatan, Sesar Sangon Utara).



Gambar 3. Peta Geologi dan Alterasi Daerah Kalirejo menurut Pramumijoyo (2017) dan Struktur Geologi menurut Widagdo (2018).

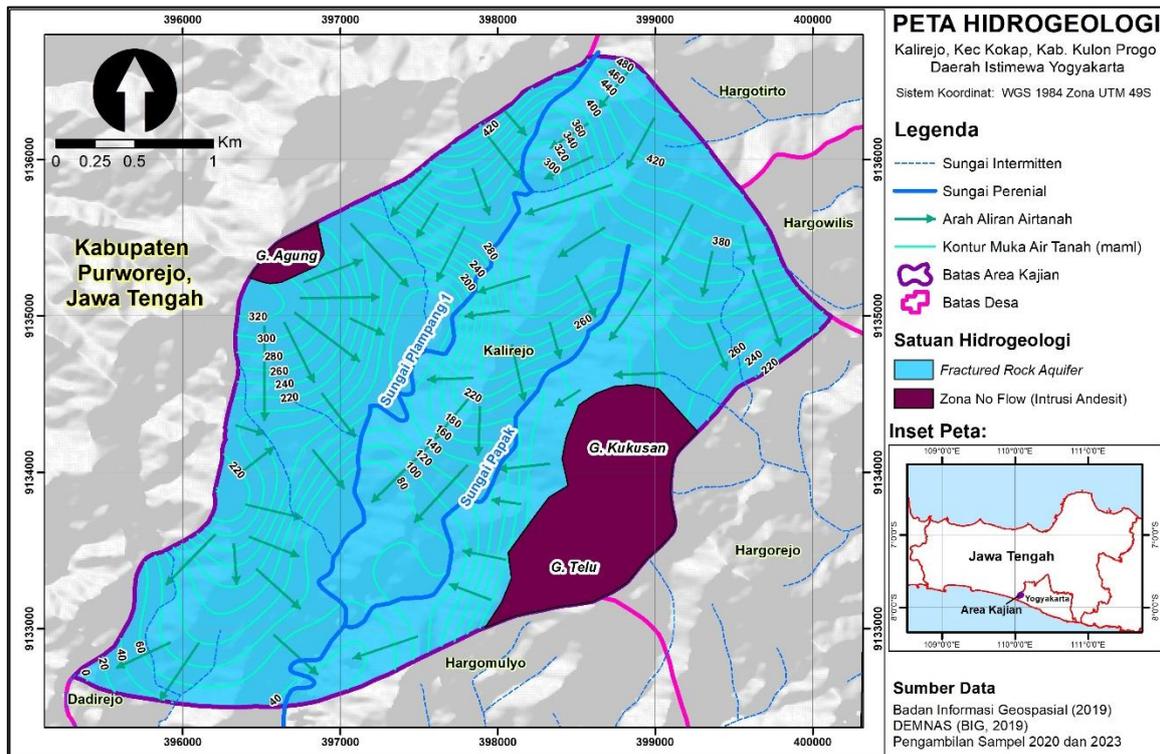


Gambar 4. Sayatan Geologi Daerah Kalirejo menurut Pramumijoyo (2017)

Kondisi Hidrogeologi

Pola dan arah aliran air tanah di daerah penelitian ditunjukkan pada Gambar 5. Pola dan arah aliran air tanah ini merupakan hasil interpolasi dari data kemunculan air tanah (sumur gali, lubang tambang) dan muka air sungai di daerah penelitian, dimana pada gambar tersebut, air tanah berada pada akuifer yang disusun oleh hasil pelapukan batuan (Gambar 6a) dan celah batuan (*fractured aquifer*) (Gambar 6b). Intrusi Gunung Agung dan Gunung Kukusan diinterpretasikan sebagai area kedap air atau akuifug karena kenampakan yang masif, tidak dijumpai mata air, sungai, maupun sumur gali pada area tersebut (Gambar 6c). Berdasarkan pada Gambar 5, arah aliran air tanah pada punggung-punggungan di Kalirejo mengalir ke arah timur, tenggara, selatan, barat daya, dan barat, mengisi area yang lebih rendah yaitu Sungai Plampang dan Sungai Papak, kemudian mengalir relatif ke arah barat daya sehingga secara umum, air tanah di Kalirejo relatif mengalir ke arah barat

daya. Daerah imbuhan air tanah di Kalirejo diperkirakan berasal dari bagian tengah-utara dari Pegunungan Kulon Progo berasosiasi dengan kontur elevasi topografi yang relatif lebih tinggi serta kontur muka air tanah yang relatif lebih rapat. Daerah lepasan ditunjukkan dengan topografi yang relatif lebih rendah yang berasosiasi dengan kemunculan sungai atau rembesan dan sumur gali sebagai penciri. Misalnya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5, keberadaan sungai yang bersifat perenial yaitu Sungai Plampang di tengah bagian barat dan Sungai Papak di tengah bagian timur area penelitian berkaitan dengan pola aliran air tanah *effluent* (aliran air tanah masuk/menyuplai ke dalam aliran sungai tersebut).



Gambar 5. Peta Hidrogeologi Daerah Penelitian



Gambar 6. a) Akuifer Lapukan Batuan, Foto Diambil di LT-9, Kamera Menghadap Utara. b) Akuifer Rekahan Batuan (*Fractured Rock Aquifer*), Foto Diambil di Sungai Plampang 1, Timur Laut Dari Titik Pengamatan AT-39, Kamera Menghadap Utara. c) Akuifug pada Area Intrusi Andesit 3 (Gunung Kusakan) dan Intrusi Andesit Dasitik (Gunung Telu), Foto Diambil dari AT-17, Kamera Menghadap Tenggara.

Hidrokimia Air Tanah

Rangkuman kandungan ion mayor dan nilai pH serta TDS pada area penelitian dapat dilihat pada Tabel 1. Nilai pH pada air tanah di area penelitian, berdasarkan pengukuran langsung di lapangan, berada pada rentang 6,29-8,15 dengan rata-rata 7,11 sehingga masuk ke dalam kategori relatif netral. Nilai pH paling rendah dijumpai pada Sumur-1 (6,29) dan berada di bawah baku mutu Permenkes No. 2 Tahun 2023 (<6,5) (Kemenkes

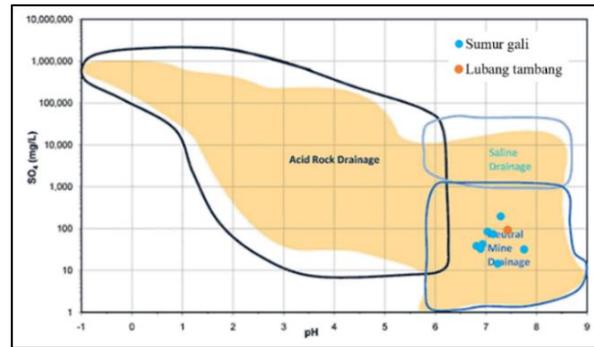
RI, 2023), sedangkan nilai pH tertinggi dijumpai pada Tambang-3 (8,15). Tidak terdapat keterkaitan antara nilai pH dengan kondisi geologi maupun hubungan hulu-hilir air tanah dangkal di Kalirejo. Area teralterasi memiliki rentang pH asam hingga basa (6,29-7,72), sama halnya dengan pH air tanah dengan akuifer batuan segar (6,7-8,15).

Hubungan nilai pH dan kandungan SO_4^{2-} digunakan untuk menentukan tipe air tambang, apakah termasuk ke dalam *Acid Rock Drainage*, *Saline Drainage*, atau *Neutral Mine Drainage*. Meskipun hanya terdapat satu sampel air tambang yang dianalisis kandungan sulfatnya, tetapi semua sampel lubang tambang termasuk ke dalam *Neutral Mine Drainage* karena tidak ada TDS air tambang yang nilainya melebihi 1.000 mg/L dan nilai pH pada lubang tambang berada pada rentang 6,53-8,15 (Gambar 7).

Tabel 1. Rangkuman Sifat Fisika-Kimia dan Kandungan Ion Mayor pada Air Tanah.

No	STA (ID Sampel)	Elevasi MAT (mdpl)	pH	TDS (mg/L)	Ion Mayor (mg/L)						Jenis Alterasi	
					Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻		SO ₄ ²⁻
1	AT1	374,9	7,2	220	1,20	0,03	4,47	1,16	5,20	0,73	0,29	Batuan Segar
2	AT4	305,5	6,8	230	1,32	0,03	5,53	1,17	5,00	1,34	1,14	Batuan Segar
3	AT9	47,68	6,5	200	1,86	0,08	4,66	2,02	5,80	1,79	0,28	Batuan Segar
4	AT11	47,68	7	350	0,72	0,02	5,34	1,30	4,00	0,17	2,58	Propilitik
5	AT13	217,2	6,8	250	0,72	0,02	4,44	1,40	5,80	0,24	0,24	Batuan Segar
6	AT17	289,35	6,6	630	0,56	0,01	7,38	1,45	4,40	0,32	4,76	Argilik
7	AT21	251,56	6,5	250	0,54	0,02	2,27	0,68	2,30	0,19	0,66	Batuan Segar
8	AT23	308,45	6,6	340	0,82	0,05	1,59	1,46	1,60	0,41	2,20	Batuan Segar
9	AT24	367,55	6,3	290	0,97	0,01	5,50	1,86	4,20	0,29	3,37	Batuan Segar
10	AT25	59,6	6,5	260	1,13	0,04	4,25	1,53	4,90	0,47	0,85	Batuan Segar
11	AT28	79,25	6,8	230	0,84	0,05	3,62	1,42	4,70	0,19	0,50	Batuan Segar
12	AT29	78,95	6,6	370	1,10	0,12	5,50	1,94	4,60	0,70	2,88	Batuan Segar
13	AT30	89,00	6,6	290	0,66	0,04	4,67	1,37	3,20	0,42	3,29	Batuan Segar
14	AT31	237,17	6,6	260	0,59	0,06	6,54	0,73	4,40	0,36	2,61	Batuan Segar
15	AT32	391,88	6,4	100	0,51	0,02	1,80	0,54	2,30	0,17	0,13	Propilitik
16	AT33	135,40	6,0	380	0,53	0,05	3,35	0,51	0,80	0,21	3,75	Propilitik
17	AT38	228,35	6,7	400	0,71	0,03	6,72	2,08	3,40	0,32	6,52	Batuan Segar
18	AT39	39,75	6,4	280	1,34	0,06	4,64	1,86	6,00	0,71	0,87	Batuan Segar
19	AT42	236,00	6,9	210	0,75	0,03	4,66	1,22	4,60	0,36	1,08	Batuan Segar
20	Sumur-3	242,92	7,0	288	0,45	0,00	3,95	0,94	3,70	0,37	1,75	Batuan Segar
21	Sumur-5	156,39	6,9	294	0,68	0,01	2,98	2,17	5,20	0,25	0,87	Batuan Segar
22	Sumur-9	227,78	7,11	417	0,92	0,02	4,12	1,46	5,00	0,58	1,51	Batuan Segar
23	Sumur-11	87,25	6,78	417	0,65	0,00	4,37	1,62	6,40	0,13	0,79	Batuan Segar
24	Sumur-12	89,38	7,72	274	0,56	0,00	3,57	1,01	4,90	0,12	0,65	Propilitik
25	Sumur-14	174,04	6,86	216	0,54	0,01	2,85	0,99	3,80	0,30	0,67	Batuan Segar
26	Sumur-16	198,49	7,2	326	0,97	0,01	3,45	1,05	5,20	0,38	0,30	Batuan Segar
27	Sumur-17	258,06	7,26	445	1,15	0,03	5,13	2,62	5,40	0,20	4,07	Batuan Segar
28	Tambang -1	366,17	7,40	281	0,41	0,02	4,59	0,69	4,20	0,16	1,84	Argilik
29	Tambang -2	311,05	6,53	-	-	-	-	-	-	-	-	Propilitik
30	Tambang -3	84,86	8,15	-	-	-	-	-	-	-	-	Argilik
31	Tambang -4	146,95	7,00	-	-	-	-	-	-	-	-	Batuan Segar

AT: Sampel Air Tanah pengambilan tahun 2020, Sumur-X dan Tambang-Y: Sampel air tanah dan rembesan air di lubang tambang pengambilan tahun 2023, “-” : Tidak dilakukan pengujian parameter.



Gambar 7. Hubungan antara pH dengan Sulfat untuk Menentukan Tipe Air Tambang (INAP, 2009)

Nilai TDS pada air tanah dangkal dan air tambang berkisar 100 mg/L-630 mg/L. Nilai TDS terendah dijumpai pada AT-32, sedangkan nilai TDS tertinggi dijumpai pada AT-17. Berdasarkan klasifikasi jenis air berdasarkan TDS menurut Todd dan Mays (2005), air tanah dangkal dan air tambang termasuk dalam kategori air tawar. Secara teori, TDS di daerah hilir akan lebih tinggi daripada daerah hulu akibat waktu interaksi kimia antara air dan batuan yang lebih lama, tetapi peta TDS menunjukkan adanya anomali pada bagian tengah Kalirejo. Proses geogenik seperti tektonik berulang yang menyebabkan hadirnya struktur geologi, intrusi, proses alterasi, dan mineralisasi mengubah kandungan kimia batuan asal yang juga berpengaruh terhadap kandungan kimia air tanah. Area dengan TDS tinggi relatif berada pada batuan segar dan batuan teralterasi propilitik sedangkan litologi teralterasi argilik dan *silica-clay* memiliki nilai TDS relatif lebih rendah.

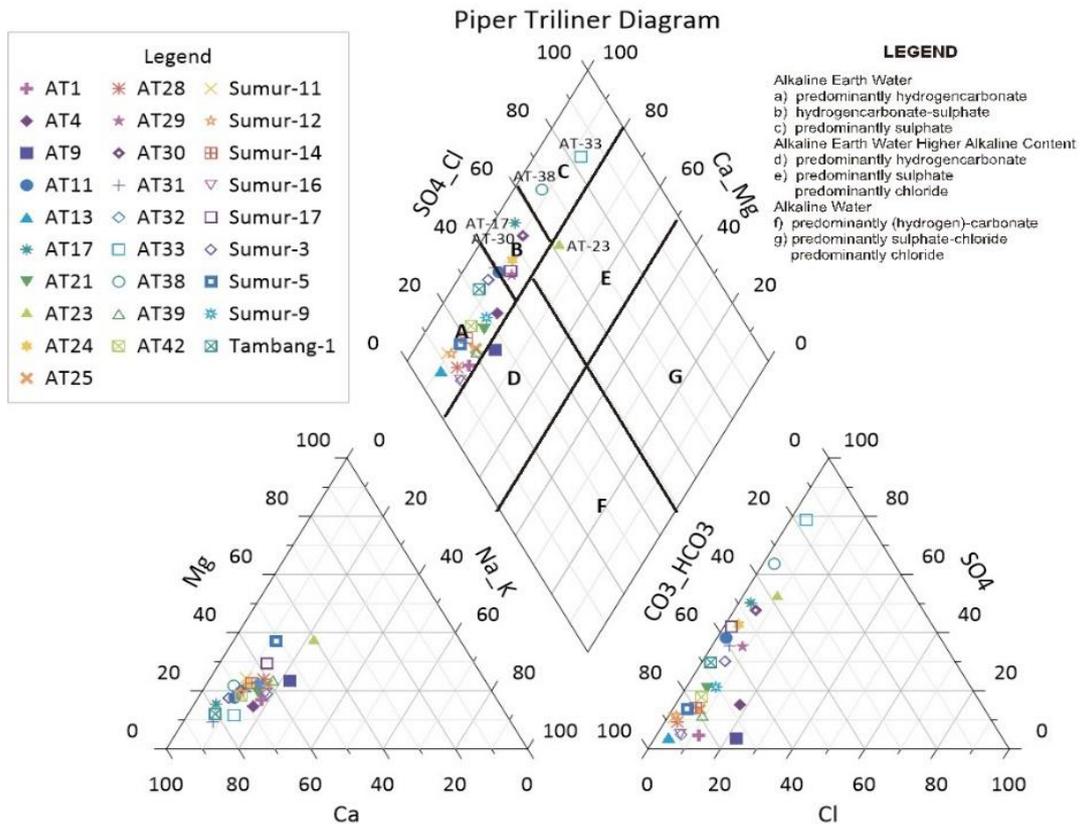
Semakin masif struktur geologi, maka permeabilitas semakin tinggi sehingga transmisivitas air tanah relatif besar dan waktu tinggal air tanah yang relatif lebih singkat. Punggungan bagian barat memiliki nilai TDS <300 mg/L akibat banyaknya struktur geologi, alterasi, dan urat batuan yang menurunkan kandungan kimia mudah terlarut pada batuan sehingga proses pelarutan lebih sedikit. Struktur geologi yang sedikit pada punggungan tengah dan timur Kalirejo menyebabkan permeabilitas batuan yang rendah sehingga waktu tinggal (*resident time*) air tanah relatif lebih lama dan proses interaksi kimia antara air dan batuan menjadi lebih masif. Proses tersebut didukung dengan tipe struktur geologi yang terbuka dan tidak terisi urat (*open space*) serta batuan yang lebih segar dan kaya dengan unsur mudah terlarut (kalsium dan magnesium pada hornblenda, klinopiroksen, dan plagioklas).

Hasil perhitungan CBE menunjukkan bahwa terdapat total 28 sampel ion mayor yang dapat dianalisis lebih lanjut (CBE $\pm 2-5\%$). Analisis diagram Piper dilakukan untuk mengetahui pengelompokan dominansi ion pada sampel yang ada di area penelitian. Dapat dilihat pada Gambar 8 bahwa sebagian besar sampel air tanah yang ada masuk ke dalam kelompok A (dominan hidrogenkarbonat). Sebagian sampel lainnya masuk ke kelompok B, dimana terdapat beberapa sampel yang sulfatnya cukup tinggi (AT-17, AT-30, AT-24, Sumur 17, AT-29). Terdapat dua sampel yang memiliki nilai sulfat yang sangat tinggi dan masuk ke kelompok C (AT-33 dan AT-38). Selain itu, terdapat satu sampel AT-23 yang tergolong ke dalam golongan E karena memiliki kandungan klorida yang cukup tinggi.

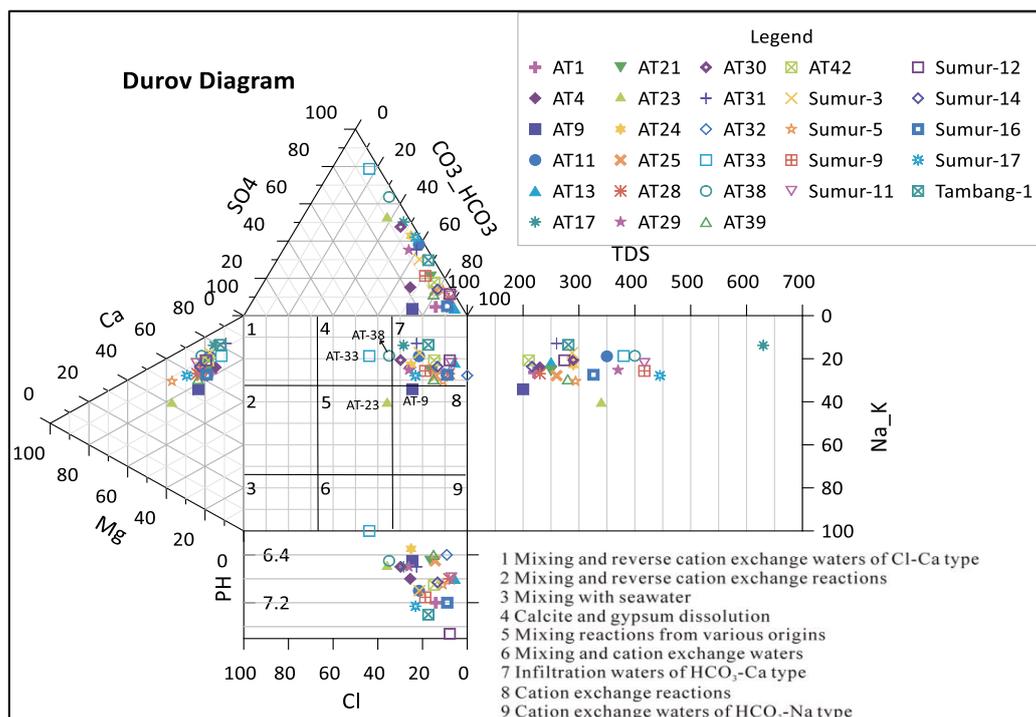
Untuk mengetahui gambaran faktor pengaruh pada hidrokimia air tanah, dilakukan analisis diagram Durov. Pada hasil pengeplotan di Gambar 9, sebagian besar sampel masuk ke dalam golongan nomor 7 yang dipengaruhi oleh infiltrasi air dengan tipe Ca-HCO_3^- . Terdapat dua sampel (AT-33 dan AT-38) dengan kandungan sulfat yang paling dominan masuk ke dalam kelompok 4 dan diduga terdapat pengaruh pelarutan mineral (kalsit, gipsum, dan sulfida). Terdapat sampel AT-23 yang berbeda dari sampel lainnya, dimana tergolong ke dalam kelompok 5 yang diduga terdapat pengaruh dari beberapa sumber sehingga kandungan klorida-nya menjadi tinggi.

Untuk mengonfirmasi tren hidrokimia air tanah secara umum dan beberapa pola anomali di area penelitian, dilakukan analisis diagram Schoeller. Secara umum, pola sebagian besar sampel air tanah yang ada di area penelitian (dengan dominansi hidrogenkarbonat) dapat dilihat berupa garis merah pada Gambar 10. Beberapa pola yang berbeda dijumpai pada beberapa sampel, pada AT-9 dijumpai nilai Na^+ dan Cl^- yang relatif lebih tinggi, pada sampel AT-23 juga dijumpai nilai Cl^- yang lebih tinggi. Kandungan sulfat yang tinggi dari

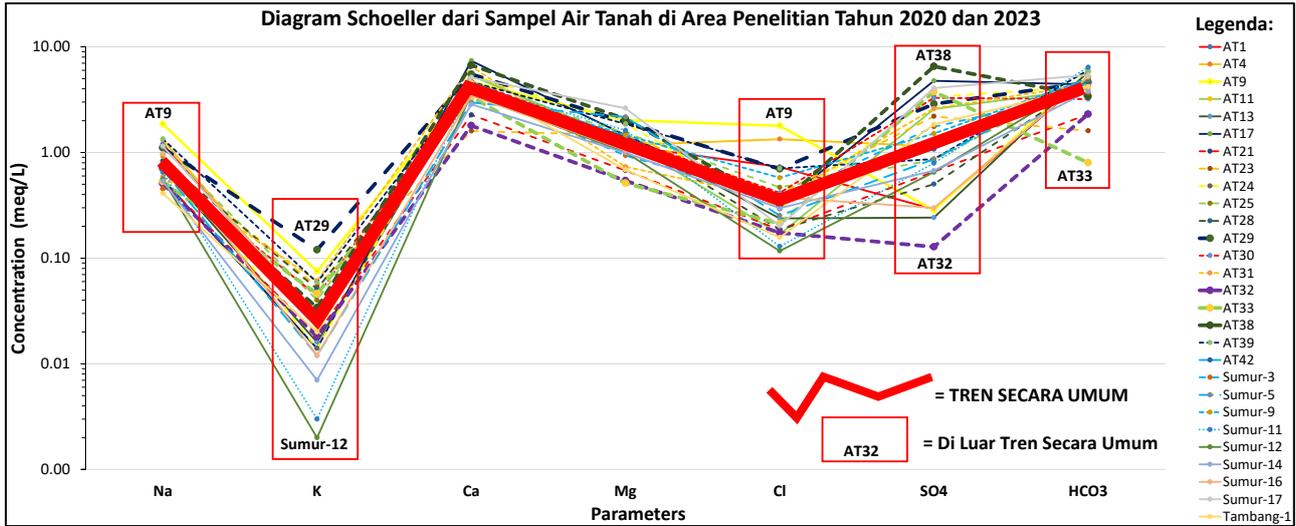
AT-38 juga terekam menghasilkan pola yang berbeda dari sampel lainnya. Dapat terlihat juga bahwa sampel AT-32 menunjukkan kandungan sulfat yang cenderung sangat rendah dan sampel AT-33 menunjukkan kandungan HCO_3^- yang relatif sangat rendah.



Gambar 8. Hasil Pengeplotan Kandungan Ion Mayor pada Diagram Piper

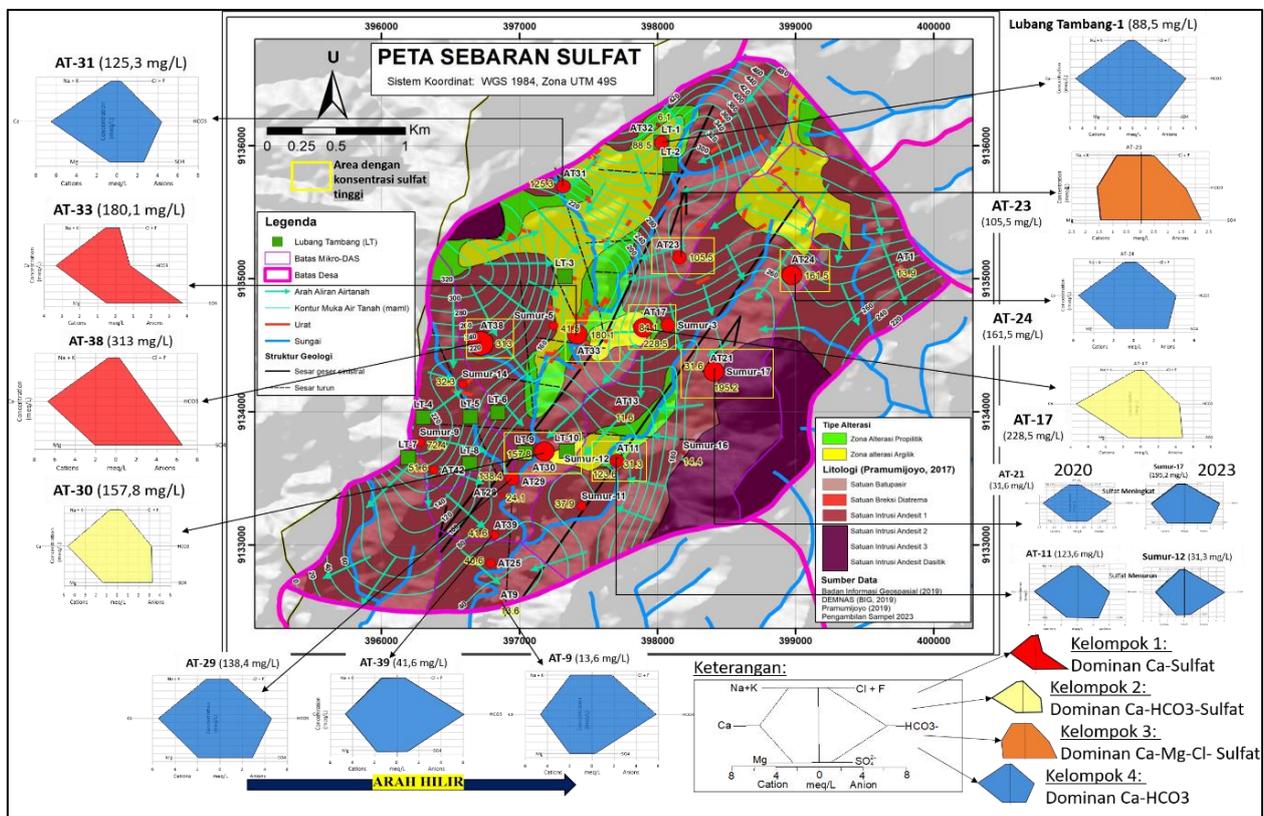


Gambar 9. Hasil Pengeplotan Sampel Air Tanah pada Durov Diagram



Gambar 10. Hasil Pengeplotan Diagram Schoeller Air Tanah dan Air Tambang di Daerah Penelitian (Fetter, 2001).

Keseluruhan hasil dari analisis diagram yang ada kemudian digunakan untuk pengelompokan pada diagram Stiff. Pada Gambar 11, dapat dilihat sebaran nilai sulfat dan profil diagram Stiff yang dapat menjadi indikasi Air Asam Tambang (AAT). Pengelompokan hidrokimia air tanah di area penelitian dapat terbagi menjadi 4, yakni dominan sulfat, dominan hidrokarbonat sulfat, dominan Ca-Mg-Cl sulfat, dan dominan Ca-Hidrogenkarbonat. Kelompok air tanah yang memiliki kandungan sulfat yang tinggi (Kelompok 1-2) dan magnesium yang tinggi (Kelompok 3) diduga terpengaruh kuat oleh pelarutan mineral sulfat (barit), mineral bijih yang berasosiasi dengan sulfida, dan mineral serpentin serta brusit. Semakin tinggi kandungan hidrogenkarbonat pada air tanah menunjukkan bahwa air tanah semakin alami atau belum mengalami kontaminasi sulfat yang signifikan (Kelompok 4).



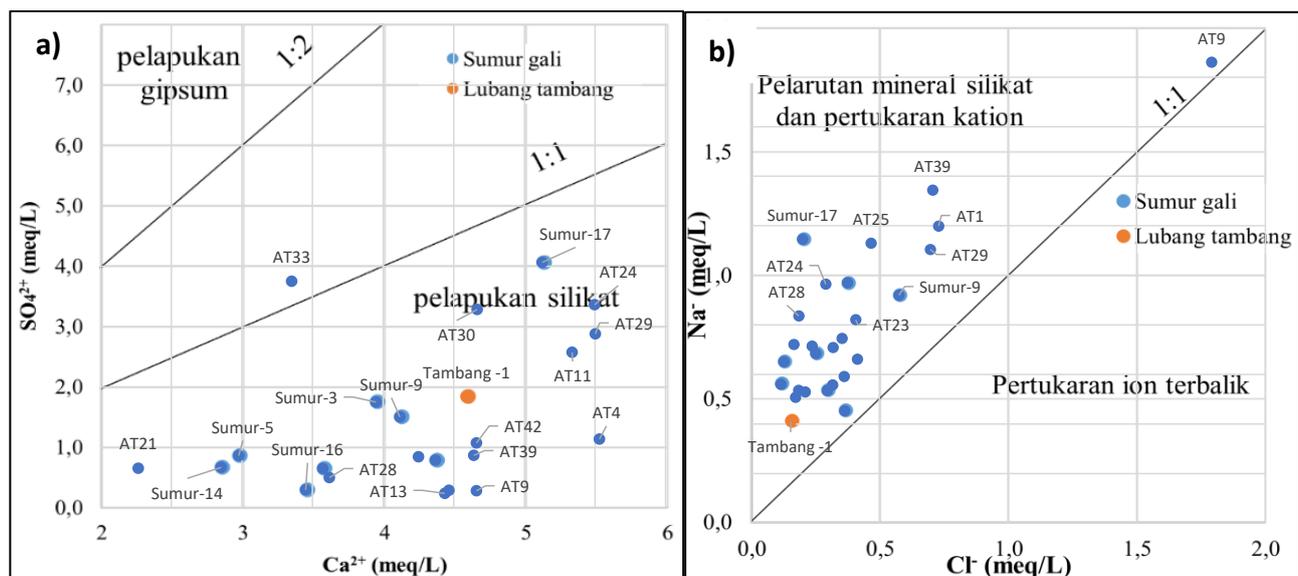
Gambar 11. Peta Sebaran Sulfat dan Diagram Stiff pada Beberapa Titik Sampel Air Tanah.

Proses pelapukan mineral silikat dan pertukaran ion menjadi faktor dominan penentu kandungan Ca^{2+} dan SO_4^{2-} pada air tanah. Gambar 12a menunjukkan bahwa kandungan sulfat dipengaruhi oleh proses pelapukan dan pelarutan mineral silikat. Untuk memperkuat pernyataan bahwa komposisi kimia air tanah dipengaruhi oleh proses pertukaran ion, perhitungan indeks kloro-alkalin digunakan dengan persamaan Goswami dkk. (2022) sebagai berikut: $\text{CAI1} = \frac{\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)}{\text{Cl}^-}$. Perhitungan indeks kloro-alkalin menunjukkan bahwa 100% sampel memiliki hasil negatif sehingga air tanah di Kalirejo mengalami proses pertukaran ion normal (Ca^{2+} digantikan oleh Na^+) (Goswami dkk., 2022).

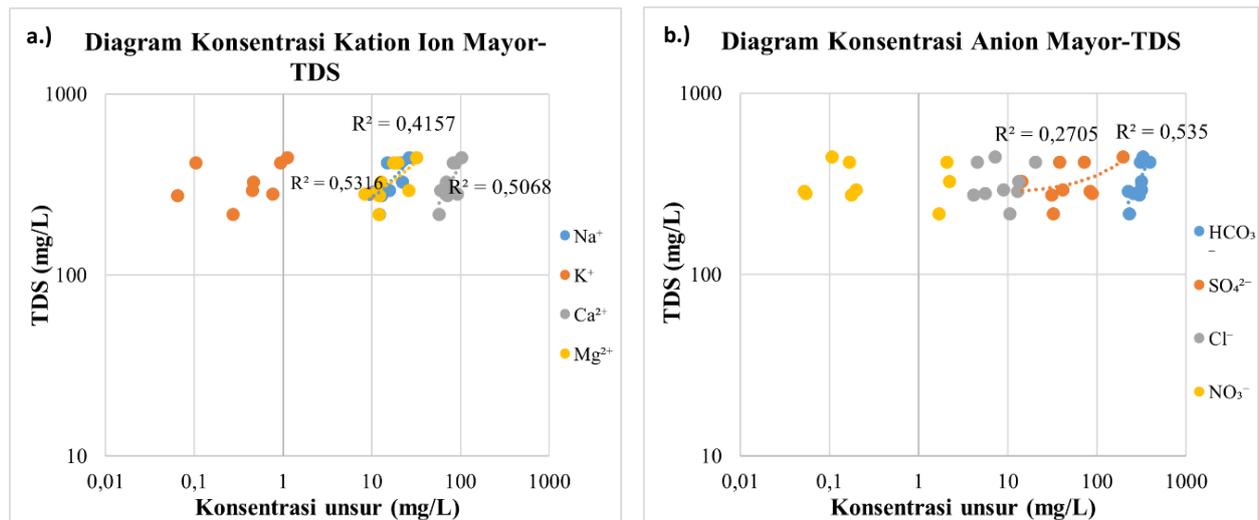
Untuk menjelaskan mekanisme spesifik dari tiap kelompok air tanah yang dihasilkan, dilakukan beberapa pengeplotan dan perbandingan komponen pada air tanah. Hasil pengeplotan diagram Ca^{2+} dan SO_4^{2-} (Gambar 12a) menunjukkan bahwa sebagian besar sampel berada di bawah garis 1:1 sehingga kandungan Ca^{2+} dan SO_4^{2-} di Kalirejo dipengaruhi oleh proses pelapukan mineral silikat (Goswami dkk., 2022). Namun, terdapat satu sampel (AT-33) yang berada di atas garis 1:1 sehingga diinterpretasikan mengalami pengaruh yang cukup intensif dari pelarutan mineral sulfat.

Kandungan Ca^{2+} dapat mengalami proses pertukaran ion dengan Na^+ atau terpresipitasi menjadi kalsit. Proses pertukaran ion maju juga dibuktikan pada hasil pengeplotan Cl^- terhadap Na^+ (Gambar 12b). Semua sampel berada di atas garis 1:1 (rasio $\text{Na}:\text{Cl} > 1$) sehingga proses pelapukan silikat dan proses pertukaran ion menjadi sumber utama kandungan Na^+ dan Cl^- pada air tanah. Ion natrium (Na^+) yang berasal dari mineral lempung hasil alterasi di Kalirejo maupun pada batuan (Na -plagioklas) menggantikan ion kalsium (Ca^{2+}) yang hadir pada air tanah maupun batuan, membentuk proses pertukaran kation.

Konsentrasi ion mayor Ca^+ , Na^+ , Mg^{2+} , dan HCO_3^- memiliki pengaruh yang sedang terhadap peningkatan nilai TDS (Gambar 13a). Mineral silikat dan karbonat menjadi sumber utama kandungan ion-ion tersebut karena mengalami proses pelapukan kimiawi seperti pelarutan oksidasi, dan hidrolisis (Mazor, 2004). Nilai K^+ memiliki hubungan yang lemah karena kandungan kation tersebut jarang dijumpai pada batuan dan cenderung resisten terhadap proses hidrolisis, sedangkan kehadiran SO_4^{2-} lebih dipengaruhi oleh proses oksidasi mineral sulfida. Konsentrasi NO_3^- dan Cl^- tidak memiliki hubungan yang signifikan terhadap peningkatan TDS (Gambar 13b) karena unsur-unsur tersebut lebih dipengaruhi oleh proses antropogenik dan pelarutan batuan evaporit, sedangkan hadirnya kandungan kimia air tanah dangkal di Kalirejo lebih dipengaruhi oleh proses pelapukan batuan beku andesit dan interaksi kimia antara air dengan batuan.



Gambar 12. Pengeplotan Diagram Pencar Hubungan Antarion Mayor (Luo dkk., 2018). a) Hubungan Ca^{2+} dan SO_4^{2-} . b) Hubungan Na^+ dan Cl^- .



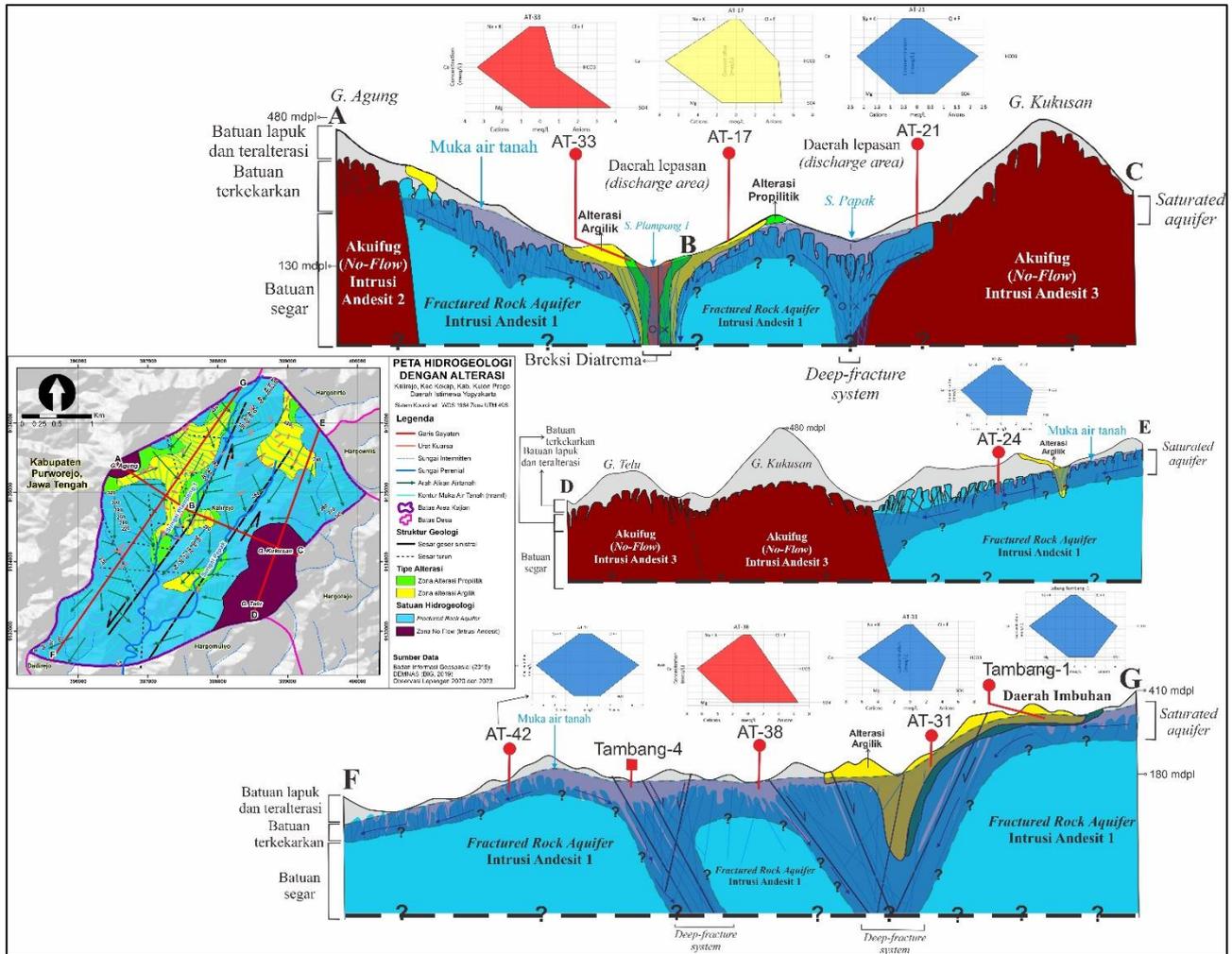
Gambar 13. Hubungan Konsentrasi Ion Mayor dengan TDS. (a) Hubungan Konsentrasi Kation dengan TDS. (b) Hubungan Konsentrasi Anion dengan TDS.

Model Konseptual Hidrogeologi

Model konseptual 2D disusun berdasarkan informasi kondisi geologi dan dikonfirmasi dengan hidrokimia air tanah yang ada di area penelitian. Model A-B-C menunjukkan hubungan antara tiga punggung di daerah Kalirejo yang terpisahkan oleh adanya sesar geser (Gambar 14). Pada wilayah sekitar Gunung Agung dengan satuan litologi Intrusi Andesit 2 (sisi barat sayatan), merupakan area sumber yang menyuplai air pada Sungai Plampang di bagian barat area penelitian, sedangkan wilayah Gunung Kukusan dengan satuan litologi Intrusi Andesit 3 (sisi timur sayatan) menyuplai air pada Sungai Papak. Sumur AT-17 berada pada batuan teralterasi argilik, tetapi memiliki nilai TDS yang tinggi (600 mg/L) dibandingkan sumur AT-33 (380 mg/L, propilitik) dan AT-21 (250 mg/L, batuan segar). Kandungan ion Ca^{2+} , Mg^{2+} , dan HCO_3^- pada AT-17 juga lebih tinggi karena air tanah pada sumur tersebut lebih dipengaruhi oleh pelarutan batuan teralterasi propilitik di dekatnya.

Model hidrogeologi D-E (Gambar 14) menunjukkan bahwa Intrusi Andesit 3 (Gunung Kukusan) memiliki topografi yang tinggi. Area hulu Kalurahan Kalirejo mendapatkan suplai air tanah dari area imbuhan yang terletak lebih utara dari lokasi penelitian, ditunjukkan dengan kontur air tanah dangkal pada area hulu yang relatif mengalir ke selatan. Sedikitnya struktur geologi dan alterasi yang berkembang pada area ini menyebabkan komposisi kimia intrusi andesit tidak banyak berubah dan tercermin pada komposisi kimia air tanah. Kandungan kimia sumur AT-24 memiliki tipe kalsium-magnesium hidrogenkarbonat (Ca-HCO_3) sesuai dengan komposisi kimia dominan pada andesit segar sehingga sumur tersebut lebih dipengaruhi oleh interaksi air tanah dengan batuan segar. Alterasi yang tidak berkembang pada area ini juga ditunjukkan dengan kandungan sulfat yang rendah pada air tanah.

Model hidrogeologi F-G (Gambar 14) menunjukkan hubungan antara kondisi geologi dan aktivitas antropogenik di Kalirejo, dimana lubang tambang emas terkonsentrasi pada area ini, termasuk hadirnya proses geologi yang kompleks sehingga berpengaruh terhadap komposisi kimia air tanah. Struktur geologi, mineralisasi, dan proses alterasi berkembang secara masif pada punggung bagian barat Kalirejo yang menjadi fokus dari arah sayatan F-G. Apabila ditinjau secara kombinasi terhadap data hidrokimia, dapat dilihat bahwa pada beberapa sampel terdapat korelasi antara intensitas alterasi dengan tipe air tanah. Semakin intensif alterasi yang ada, tipe air tanah yang ada semakin menuju ke kelompok 1 (kaya akan sulfat). Namun, pada beberapa sampel (AT-24 dan AT-31) dijumpai bahwa kondisi alterasi yang cukup intens tidak merubah tipe air tanah yang ada dan hanya menyebabkan kadar sulfat yang tinggi (>100 mg/L).



Gambar 14. Model Konseptual Hidrogeologi Daerah Penelitian dengan Penampang dan Tipe Hidrokimia

PENUTUP

Simpulan dan Saran

Kondisi geologi di area penelitian tersusun atas beberapa intrusi andesit yang kemudian membentuk beberapa zona alterasi. Intrusi andesit tertua (andesit hornblenda) diperkirakan yang merupakan penyusun sebagian besar area penelitian, kemudian disusul oleh intrusi andesit yang menyusun Gunung Agung, lalu disusul oleh intrusi andesit penyusun Gunung Kukusan, setelah itu terbentuk Breksi Diatrema, dan diakhiri dengan intrusi andesit dasitik penyusun Gunung Telu. Berdasarkan observasi lapangan, tidak dijumpai satuan batupasir yang sebelumnya dijumpai oleh Pramumijoyo (2017), sehingga pada penelitian ini diperkirakan sebagai bagian dari satuan intrusi andesit tertua yang mengalami pelapukan. Kontrol struktur geologi yang cukup intensif menyebabkan pada beberapa area terbentuk zona alterasi yang juga intens dan memengaruhi kandungan kimia batuan. Sebagian besar tipe alterasi di area kajian adalah argilik dan propilitik yang terkonsentrasi di area barat laut dan utara area kajian.

Secara kondisi hidrogeologi, daerah penelitian tersusun atas dua satuan hidrogeologi, yakni *fractured rock aquifer* (zona akuifer rekahan/celah) dan akuifug (zona no flow). Zona akuifer rekahan/celah menyusun sebagian besar area penelitian dan digunakan oleh masyarakat sebagai sumber air untuk kebutuhan sehari-hari. Aliran air tanah di area kajian secara umum bergerak ke arah barat daya, searah dengan sebagian besar aliran sungai di permukaan. Namun, untuk aliran air tanah terbagi arahnya menuju ke arah lembahan pada area puncak bukit (sebagai *groundwater divide*) dan menyuplai sungai pada lembahan yang ada (*effluent*).

Air tanah dangkal di Kalirejo memiliki karakteristik fisika-kimia sebagai berikut, yaitu nilai pH berada pada rentang sedikit asam-sedikit basa dengan nilai $7 \pm 1,5$. Nilai TDS berada pada rentang 100 mg/L – 630 mg/L sehingga termasuk ke dalam kategori air tawar. Berdasarkan analisis diagram Piper, tipe kimia air tanah di daerah Kalirejo (baik pada air tanah dangkal maupun air tambang) sebagian besar merupakan Kalsium-Hidrogenkarbonat, namun terdapat beberapa sampel masuk ke dalam golongan yang kaya akan sulfat dan hidrogenkarbonat-sulfat. Sampel-sampel tersebut berasosiasi dengan kontrol struktur geologi dan alterasi yang intensif, sehingga terdapat pengaruh sulfat yang cukup dominan. Selain itu, didukung dengan hasil analisis diagram Durov, beberapa anomali tingkat sulfat yang tinggi pada beberapa titik diperkirakan berkaitan dengan perbedaan tingkat pengayaan logam sulfida pada batuan. Berdasarkan analisis diagram Schoeller, tingkat variasi yang tinggi juga dijumpai pada kandungan sulfat, namun secara keseluruhan pola garis-nya masih menunjukkan masih mirip, sehingga diduga masih dalam satu sistem akuifer yang sama. Hal tersebut didukung dengan hasil analisis diagram stiff dimana berdasarkan pola yang ada, perubahan tipe air tanah dipengaruhi sebagian besar oleh peningkatan kandungan sulfat. Berdasarkan analisis hubungan antar ion, peningkatan kandungan kimia pada air tanah berbanding lurus dengan kandungan TDS dan proses interaksi antara batuan dan air tanah (*water-rock interaction*) yang terjadi di Kalurahan Kalirejo adalah berupa oksidasi, hidrolisis, dan pelapukan batuan.

Berbasis data geologi, hidrogeologi, dan hidrokimia, model konseptual hidrogeologi telah ditentukan di mana air tanah di daerah Kalurahan Kalirejo terakumulasi pada zona dangkal akibat pelapukan batuan dan zona-zona rekahan pada batuan (*fractured rock aquifer*). Secara evolusi hidrokimia, intensitas dan jenis alterasi diperkirakan memengaruhi tipe air tanah yang ada, namun tidak signifikan. Tipe alterasi, intensitas struktur geologi, tingkat pelapukan, serta keberadaan lubang tambang diduga menjadi faktor utama dalam peningkatan sulfat pada air tanah yang ada.

Kedepannya, dengan mengetahui gambaran konseptual hidrogeologi dan karakteristik hidrokimia air tanah yang ada pada penelitian ini, diharapkan dapat dilakukan kajian lebih mendalam terkait potensi kontaminasi logam berat di area penelitian. Hal ini dikarenakan kondisi pH pada air tanah yang ada cenderung netral, sehingga terdapat kemungkinan adanya logam berat berupa Arsen (As) yang dapat terlarut pada air tanah netral. Selain itu, proses penambangan yang semakin lama semakin intensif pada area penelitian juga diperkirakan akan memberikan dampak yang signifikan terhadap potensi pencemaran logam berat pada air tanah di Kalurahan Kalirejo.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Departemen Teknik Geologi Universitas Gadjah Mada karena telah memberikan pendanaan pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Informasi Geospasial Indonesia (BIG). (2019), Peta Rupa Bumi Indonesia dan DEMNAS (*Digital Elevation Model*). Diakses pada 1 Oktober 2024. Dapat diakses melalui: <https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/>
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2008), Standar Nasional Indonesia Nomor 6989.58:2008 tentang Metoda pengambilan contoh air tanah. Jakarta, Indonesia.
- Durov, S. A. (1948), Natural waters and graphical representation of their composition. *DoklAkadNauk SSSR*, 59, 87–90.
- Fetter, C.W. (2001), Applied hydrogeology 4th Edition. Prentice-Hall, Inc. ISBN 0-13-088239-9
- Goswami, R., Neog, N., dan Thakur, R. (2022), Hydrogeochemical analysis of groundwater quality for drinking and irrigation with elevated arsenic and potential impact on agro-ecosystem in the upper Brahmaputra plain, India: *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, p. 68735–68756, doi:10.1007/s11356-022-20600-8.
- Gustafson, G dan Krásný, J. (1994), Crystalline rock aquifers: their occurrence, use and importance. *Applied Hydrogeology*, 2, 64-75.
- Hendrayana, H., Riyanto, I.A., dan Nuha, A. (2021), Study of water difficulty area in Kulon Progo regency Special Region of Yogyakarta: *La Geografia*, v. 19, p. 176–192.

- Hendrayana, H., Widyastuti, M., Riyanto, I.A., Nuha, A., dan Aprimanto, B. (2020), Neraca airtanah Cekungan Air tanah Menoreh dan Wates Kabupaten Kulon Progo: *Geomedia*, v. 18, p. 10–29, doi:10.21831/gm.v18i2.33636.
- International Network for Acid Prevention (INAP). (2009), The global acid rock drainage guide (GARD) Guide. Diambil pada 10 Oktober 2024 dari <http://www.gardguide.com>
- Kurwadkar, S., Kanel, S. R., & Nakarmi, A. (2020), Groundwater pollution: Occurrence, detection, and remediation of organic and inorganic pollutants. *Water Environment Research*, 92(10), 1659-1668.
- Luo, W., Gao, X., Zhang, X., dan Ng, C.A. (2018), Geochemical processes controlling the groundwater chemistry and fluoride contamination in the Yuncheng Basin , China — An area with complex hydrogeochemical conditions: *PLOS ONE*, v. 13, p. 1–25, doi:<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199082>.
- Mazor, E. (2004), *Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology*: New York, Marcel Dekker Inc, 453 p.
- Pambudi, D., Winarno, T., dan Aribowo, Y. (2018), Geologi dan mineralisasi logam daerah Sangon, Kokap, Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta: *Jurnal Geosains dan Teknologi*, v. 1, p. 74, doi:10.14710/jgt.1.2.2018.74-80.
- Piper, AM. (1944), A graphical procedure in the geochemical interpretation of water analysis. *Am Geophys Union Trans.* 25:914–928.
- Peng, L., Jianyuan, C., Ji, L., Tiantian, W. and Jian, Y. (2022), Hydrogeochemical characteristics and solute sources of groundwater in the Yuhengbei mining area, Shaanxi Province, China. *Environmental Earth Sciences*, 81(21), p.516.
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia (Kemenkes RI). (2023), Peraturan Menteri Kesehatan (Permenkes) Nomor 2 Tahun 2023 tentang Kesehatan Lingkungan. Jakarta, Indonesia.
- Pramumijoyo, P., Idrus, A., Warmada, I.W., dan Yonezu, K. (2017), Geology, geochemistry and hydrothermal fluid characteristics of low sulfidation epithermal deposit in the Sangon area, Kokap, Special Region of Yogyakarta: *Journal of Applied Geology*, v. 2, p. 48, doi:10.22146/jag.42442.
- Rahardjo, W., Sukandarrumidi, dan Rosidi, H.M.D. (1995), Peta Geologi Lembar Yogyakarta, Jawa: Bandung, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, skala 1:100.000, 1 lembar.
- Schoeller H. (1965), Qualitative evaluation of groundwater resources. In: *Methods and techniques of groundwater investigation and development*. Water Research, Series-33. UNESCO, Delft, pp 54–83.
- Simamora, L.S. (2021), Geokimia air tanah dan air sungai pada daerah pertambangan dan pengolahan emas tradisional di Dusun Plampang dan sekitarnya, Kalurahan Kalirejo, Kapanewon Kokap, Kabupaten Kulon Progo, DIY [Skripsi, Tidak Dipublikasikan]: Universitas Gadjah Mada, 196 p.
- Todd, D.K., dan Mays, L.W. (2005), *Groundwater Hydrology*: Arizona, John Wiley & Sons, Inc, 416 p., doi:10.1002/0470871660.
- Tóth, J. (1999), Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology journal*, 7, 1-14.
- Widagdo, A., Pramumijoyo, S., dan Harijoko, A. (2018), Tectonostratigraphy-volcanic of Gajah-Ijo-Menoreh Tertiary volcanic formations in Kulon Progo mountain area, Yogyakarta-Indonesia, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 212, p. 1–12, doi:10.1088/1755-1315/212/1/012052.
- Widagdo, A., Pramuwijoyo, S., dan Harijoko, A. (2020), Kontrol struktur geologi terhadap kemunculan Formasi Nanggulan di daerah Kecamatan Nanggulan, Kabupaten Kulon Progo, Yogyakarta: *Geosapta*, v. 6, p. 97–101.