



Kontaminasi Arsen dan Tembaga pada Air Tanah di Wilayah Penambangan Rakyat Kalurahan Kalirejo, Kokap, Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta

Arsenic and Copper Contamination in the Groundwater of Artisanal Mining Area of Kalirejo Village, Kokap, Kulon Progo, Special Region of Yogyakarta

Doni Prakasa Eka Putra¹

Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

Riana Listiyastuti

Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

I Wayan Warmada

Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

Lestari Sutra Simamora

Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

Muhamad Ilham

Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

Artikel Masuk : 5 Desember 2024

Artikel Diterima : 3 November 2025

Tersedia Online : 21 November 2025

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk menelaah hubungan antara aktivitas pertambangan dengan kandungan logam berat pada air tanah dengan studi kasus di kawasan pertambangan rakyat Kalurahan Kalirejo, Kokap, Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Beberapa logam berat yang umum berasosiasi dengan wilayah pertambangan dengan tipe alterasi hidrotermal adalah arsen (As) dan tembaga (Cu). Kalurahan Kalirejo memiliki kondisi geologi yang ditandai oleh kehadiran batuan intrusi, disertai mineralisasi serta alterasi hidrotermal yang cukup intensif. Selain itu, praktik pertambangan tradisional yang relatif masif di kawasan ini semakin meningkatkan potensi kontaminasi air tanah. Mengingat tingginya ketergantungan masyarakat terhadap sumber air tanah, penting dilakukan kajian mengenai kandungan Cu dan As serta keterkaitannya dengan kondisi geologi setempat. Penelitian dilakukan melalui analisis kandungan Cu dan As pada sampel air tanah, batuan, dan urat kuarsa. Hasil menunjukkan bahwa konsentrasi Cu pada air tanah masih tergolong aman (<2 mg/L) sesuai Permenkes No. 2 Tahun 2023, dengan rentang

¹ Korespondensi Penulis: Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

Email: putra_dpe@ugm.ac.id

How to Cite

Putra, D. P. E., Listiyastuti, R., Warmada, I. W., Simamora, L. S., & Ilham, M. (2025). KONTAMINASI

ARSEN DAN TEMBAGA PADA AIR TANAH DI WILAYAH PENAMBANGAN RAKYAT KALURAHAN

KALIREJO, KOKAP, KULON PROGO, DAERAH ISTIMEWA YOGYAKARTA. Jurnal Wilayah dan

Lingkungan, 13(2), 99-116. <https://doi.org/10.14710/jwl.13.2.99-116>

0,0027–0,94 mg/L. Sebaliknya, konsentrasi As telah melampaui ambang batas aman ($>0,01$ mg/L), yaitu 0,0623–0,1287 mg/L. Kondisi pH netral pada air tanah Kalirejo diduga menjadi faktor pengontrol utama kelarutan logam, sehingga As (V) cenderung lebih mudah larut dibandingkan Cu. Konsentrasi As yang lebih tinggi juga ditemukan pada area dengan alterasi argilik dan pelapukan batuan intensif. Oleh karena itu, tindakan remediasi air tanah direkomendasikan, terutama pada wilayah permukiman dengan kadar As tinggi.

Kata Kunci: air tanah dangkal; arsen; hidrokimia; tambang tradisional; tembaga

Abstract: *This study aims to examine the relationship between mining activities and heavy metal content in groundwater with the case study in artisanal mining areas of Kalirejo Village, Kokap, Kulon Progo, Special Region of Yogyakarta. Several heavy metals commonly associated with mining areas with hydrothermal alteration are arsenic (As) and copper (Cu). Kalirejo Village has geological conditions characterized by the presence of intrusive rocks, accompanied by mineralization and fairly intensive hydrothermal alteration. In addition, relatively massive traditional mining practices in this area further increase the potential for groundwater contamination. Given the high dependence of the community on groundwater sources, it is important to conduct a study on the Cu and As content and its relationship with local geological conditions. The research was conducted through analysis of Cu and As content in groundwater, rock, and quartz vein samples. The results show that the Cu concentration in groundwater is still classified as safe (<2 mg/L) according to Permenkes No. 2 of 2023, with a range of 0.0027–0.94 mg/L. In contrast, the As concentration exceeded the safe threshold (>0.01 mg/L), ranging from 0.0623 to 0.1287 mg/L. The neutral pH condition of Kalirejo groundwater is thought to be the main factor controlling metal solubility, making As (V) more soluble than Cu. Higher As concentrations were also found in areas with argillic alteration and intense rock weathering. Therefore, groundwater remediation is recommended, especially in residential areas with high As levels.*

Keywords: *arsenic; artisanal mining; copper; groundwater; hydrothermal*

Pendahuluan

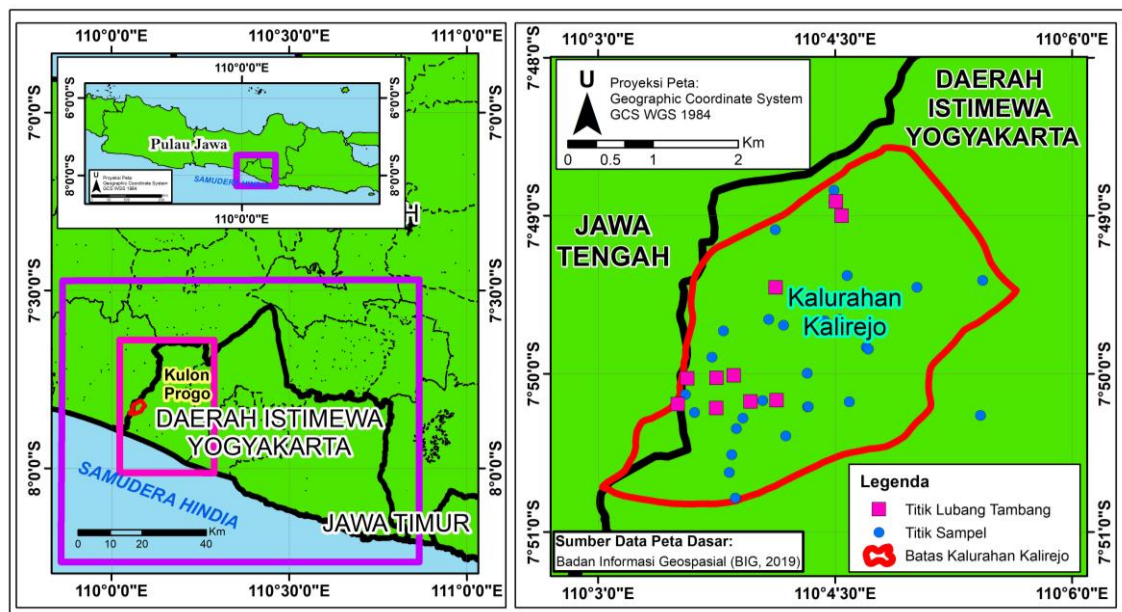
Keberadaan logam berat pada air tanah adalah hal yang sangat perlu menjadi perhatian, karena apabila melebihi kadar tertentu dapat mengakibatkan banyak dampak negatif terhadap manusia maupun lingkungan secara umum (Nivetha et al., 2021). Salah satu wilayah yang memiliki potensi kandungan logam berat yang tinggi adalah area pertambangan (Tiwari et al., 2016). Beberapa logam berat yang umum dijumpai pada air tanah di area pertambangan, yang berasosiasi dengan zona hidrotermal, adalah Tembaga (Cu) dan Arsen (As) (Punia dan Siddaiah, 2017).

Pada kondisi geologi yang berasosiasi dengan hidrotermal, Arsen dan Tembaga umumnya muncul secara alami pada air tanah karena berasosiasi dengan proses mineralisasi dan pelapukan (Herath et al., 2016; Podgorski dan Berg, 2020). Namun demikian, proses-proses pada aktivitas manusia seperti pertambangan diduga dapat meningkatkan potensi kontaminasi Arsen dan kontaminan geogenik lainnya pada air tanah (Mukherjee et al., 2024). Limbah dari hasil pemrosesan bijih dan tereksposnya material akibat penggalian diduga menjadi beberapa sumber utama pencemaran yang terjadi (Li et al., 2021). Oleh karena itu, diperlukan analisis mendalam terkait korelasi antara kandungan Arsen dan Tembaga pada air tanah dengan kondisi geologi dan aktivitas pertambangan di area tersebut.

Analisis kandungan arsenik dan tembaga pada air tanah perlu dilakukan karena kedua unsur tersebut dapat hadir pada kondisi lingkungan yang berbeda. Arsenik dapat larut pada pH asam maupun basa serta dalam kondisi reduktif maupun oksidatif (Kanel et al., 2023), sedangkan tembaga terlarut akan tinggi pada pH asam dan kondisi reduktif (Clark, 2015). Kandungan arsenik yang tinggi pada air minum bersifat karsinogen yang

memicu penyakit seperti kanker kulit, kanker kandung kemih, kanker hati, dan paru-paru. Penyakit yang disebabkan karena keracunan arsenik (arsenikosis) ditandai dengan munculnya bintik kehitaman pada kulit. Selain itu, kandungan arsenik yang tinggi pada tubuh juga memicu penyakit kardiovaskular, hipertensi, dan diabetes melitus (Adeloju et al., 2021). Kandungan tembaga yang tinggi pada air minum juga bersifat racun yang dapat menyebabkan anemia, kerusakan hati, ginjal, dan sistem pencernaan (Devy dan Lakshmi, 2020).

Salah satu area yang di dalamnya terdapat proses aktivitas pertambangan yang cukup intensif adalah Kalurahan Kalirejo (Setiabudi 2005; Simamora, 2021). **Gambar 1.** menunjukkan bahwa Kalurahan Kalirejo memiliki karakteristik sangat rawan tercemar logam berat karena kondisi alamiah yang merupakan produk dari alterasi dan mineralisasi pada zona epitermal sulfidasi rendah (Pramumijoyo et al., 2017). Berdasarkan penelitian oleh Setiabudi (2005), terdapat setidaknya 25 titik bekas penambangan di Kecamatan Kokap dan enam titik penambangan tradisional yang ada di Kalurahan Kalirejo. Studi sebelumnya menemukan bahwa air tanah dan air sungai di Kalirejo mengandung tembaga yang cukup tinggi, yakni berkisar 0,153-0,94 mg/L (Simamora, 2021). Namun, untuk kandungan Arsen pada air tanah, belum pernah dilakukan analisis sebelumnya di Kalurahan Kalirejo.



Sumber: data dasar peta dari Badan Informasi Geospasial (BIG), 2019

Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Mengingat dampak negatif dari mengonsumsi air yang memiliki kandungan arsen dan tembaga, maka analisis mengenai kandungan Arsen dan tembaga pada air tanah serta mengetahui korelasinya terhadap kondisi geologi diperlukan. Adanya proses antropogenik berupa penambangan emas rakyat di Kalurahan Kalirejo diduga meningkatkan potensi pencemaran Arsen dan Tembaga pada air tanah yang ada. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kandungan logam berat tembaga (Cu) dan arsenik (As) pada air tanah serta mengetahui hubungannya dengan kondisi geologi dan proses antropogenik (penambangan) di daerah penelitian.

Dalam konteks perencanaan wilayah, Radutu et al. (2022) menekankan akan pentingnya perencanaan wilayah dengan mempertimbangkan karakteristik hidrogeologi suatu daerah sehingga dapat menunjang pengembangan di masa mendatang. Terlebih dalam hal pengembangan area permukiman, basis data dan kajian yang kuat terkait air

tanah akan mendukung dalam perencanaan regulasi terkait pemanfaatan kuantitas air tanah serta pemantauan kualitas air tanah (Canteiro et al., 2023). Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan sebagai upaya untuk penanganan dan pengurangan risiko pencemaran Arsen dan Tembaga pada air tanah, sehingga dapat menjadi referensi bagi pemerintah daerah setempat dalam hal pengembangan dan perencanaan wilayah yang bebas dari kontaminasi air tanah.

METODE PENELITIAN

Data primer berupa pengukuran langsung di lapangan dan pengujian di laboratorium serta data geologi sekunder dari penelitian sebelumnya digunakan pada penelitian ini. Pengambilan data lapangan dilakukan untuk mengetahui kondisi fisik-kimia air tanah di daerah penelitian. Selain itu, dilakukan juga pengambilan sampel air tanah untuk dilakukan pengujian kandungan Arsen dan Tembaga.

Pengujian kandungan unsur jejak berupa logam berat arsenik (As) dan tembaga (Cu) dilakukan pada 4 sampel air rembesan lubang tambang dan 4 sampel air tanah dangkal menggunakan metode GF-AAS (Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrophotometer). Beberapa sampel (19 buah) hasil uji kandungan Cu pada air tanah yang dilakukan oleh Simamora (2021) juga diikutsertakan pada analisis di penelitian ini. Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023 tentang Pedoman Penyelenggaraan Kesehatan Lingkungan (Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, 2023) menjadi acuan dalam menentukan kualitas air minum berdasarkan kandungan logam berat (Arsen dan Tembaga) di Kalurahan Kalirejo (**Tabel 1**).

Diagram dan grafik komparasi juga digunakan untuk mengetahui hubungan antar parameter di daerah penelitian. Perbandingan antara kandungan Arsen dan Tembaga dengan sifat fisik-kimia air tanah dan kandungan ion mayor air tanah, serta hubungan antara kandungan Arsen dan Tembaga pada batuan, urat kuarsa, dan air tanah dilakukan untuk melihat korelasi antar-parameternya. Analisis pada tiap jenis alterasi juga dilakukan untuk mengetahui hubungan antara jenis alterasi (dan tingkat pelapukan batuan) dengan kandungan Arsen dan Tembaga pada air tanah.

Data sekunder berupa data geologi seperti litologi, struktur, alterasi, mineralisasi, dan kandungan kimia batuan hasil dari penelitian Pramumijoyo et al. (2017) dan Widagdo et al. (2018) disesuaikan ulang dengan lokasi penelitian sehingga terkonsentrasi pada Kalurahan Kalirejo. Beberapa data geologi dari hasil penelitian oleh Simamora (2021) juga diikutsertakan pada analisis di penelitian ini. Informasi geologi yang didapatkan kemudian dikorelasikan dengan data kimia air tanah untuk mengetahui pengaruh kondisi geologi terhadap kandungan Arsen dan Tembaga pada air tanah di daerah penelitian.

Tabel 1. Batas maksimum kandungan TDS, pH, Arsen dan Tembaga pada air minum

Parameter	Batas Maksimum
pH	6,5-8,5
Arsenik (As) (mg/L)	0,01
Tembaga (Cu) (mg/L)	2

Sumber: Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia (Permenkes RI) No. 2 tahun 2023

HASIL DAN PEMBAHASAN

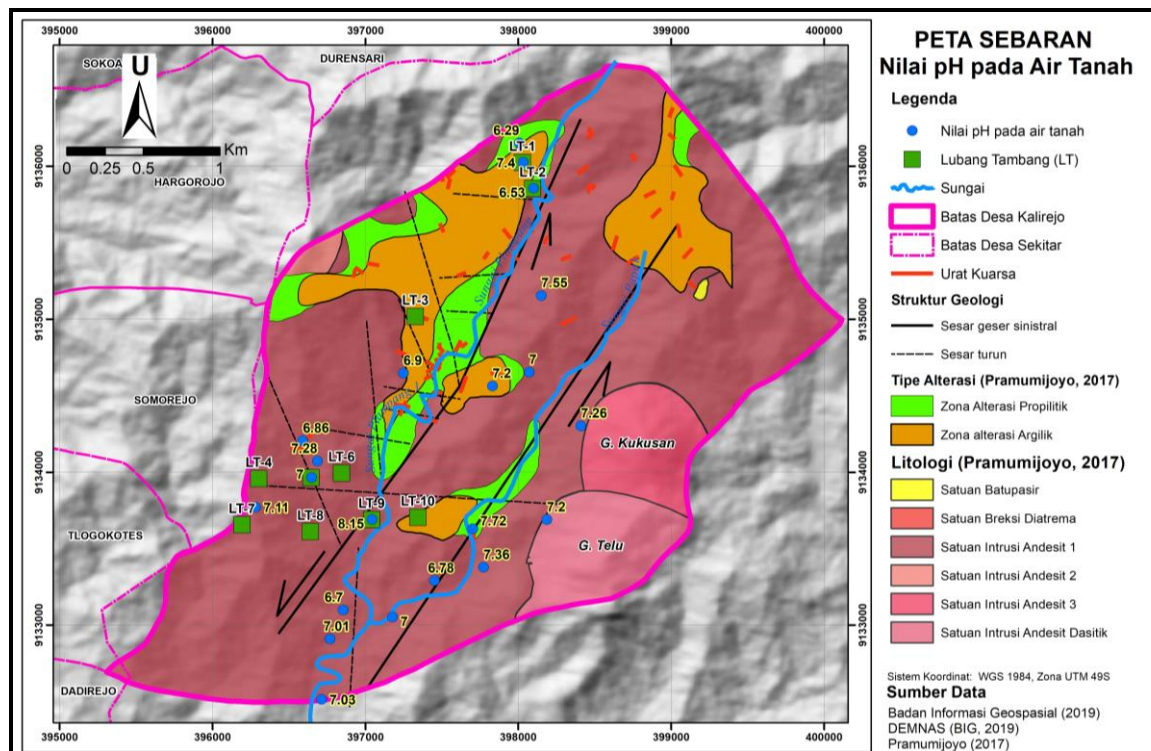
Geologi dan Kondisi pH Air Tanah di Daerah Penelitian

Berdasarkan penelitian oleh Pramumijoyo et al. (2017), Kalurahan Kalirejo tersusun oleh enam satuan litologi, berdasarkan waktu terbentuknya dan ketampakan secara megaskopis, yakni: (1) Satuan Batupasir, (2) Satuan Intrusi Andesit 1 tersusun oleh andesit hornblenda, (3) Satuan Intrusi Andesit 2 dengan litologi berupa andesit, (4) Satuan Breksi Diatrema, (5) Satuan Intrusi Andesit 3 merupakan penyusun dari Gunung Kukusan,

dan (6) Satuan Intrusi Andesit Dasitik (penyusun Gunung Telu). Gambaran sebaran litologi pada area penelitian dapat dilihat pada **Gambar 2** yang menjadi peta dasar pada peta sebaran di pH pada air tanah.

Litologi di area penelitian diinterpretasikan sebagai produk dari alterasi dan mineralisasi pada zona epitermal sulfidasi rendah (area dangkal di bawah permukaan bumi di mana air panas yang tidak terlalu asam naik dan mengendapkan logam-berharga pada rekahan batuan) pada kedalaman yang cukup dalam (Pramumijoyo et al., 2017). Hal ini menyebabkan pengayaan beberapa mineral ekonomis seperti arsenopirit, sfalerit, galena, kalkopirit, pirit, markasit, kovelit, goetit, hematit, dan anastase pada beberapa area, sehingga menjadi lokasi tambang tradisional oleh masyarakat sekitar (Pramumijoyo et al., 2017). Beberapa kandungan mineral tersebut diduga memengaruhi kondisi air tanah yang ada di area penelitian. Selain itu, proses penambangan tradisional yang dilakukan juga diduga dapat berpotensi meningkatkan kandungan logam berat (tembaga dan arsen) pada area penelitian.

Sebaran nilai pH pada area penelitian juga dapat dilihat pada **Gambar 2**. Nilai pH 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 terendah dijumpai pada AT-33 atau Titik 5, dengan nilai pH 6,0 dan berada di bawah baku mutu Permenkes No. 2 Tahun 2023 (<6,5), sedangkan nilai pH tertinggi dijumpai pada Tambang-3 (LT-3) dengan nilai pH 8,15. Area teralterasi memiliki rentang pH 6,29-7,72 dan pH air tanah memiliki rentang 6,7-8,15.



Sumber: data dasar untuk peta dan data Digital Elevation Model (DEM) dari Badan Informasi Geospasial, 2019)

Gambar 2. Peta sebaran pH pada air tanah di area penelitian

Kandungan Arsen (As) dan Tembaga (Cu) Pada Air Tanah

Konsentrasi arsenik pada semua sampel yang diuji berada di atas ambang batas air minum menurut Permenkes No. 2 Tahun 2023 (>0,01 mg/L), sedangkan kandungan

tembaga masih jauh di bawah ambang batas aman (<2 mg/L) (**Tabel 2**). Arsenik pada sumur gali berada pada rentang 0,0623-0,1012 mg/L, sedangkan konsentrasi arsenik pada lubang tambang berada pada rentang 0,0748-0,1287 mg/L. Konsentrasi arsenik terendah pada air tanah dangkal yang diuji dijumpai pada sampel Sumur-5 sedangkan konsentrasi arsenik tertinggi pada air tanah dangkal dijumpai pada Sumur-17. Kandungan arsenik tertinggi di area lubang tambang emas dijumpai pada Tambang-1, sedangkan konsentrasi arsenik terendah pada lubang tambang emas dijumpai pada sampel Tambang-4. Kandungan tembaga berada pada rentang 0,0027 mg/L-0,94 mg/L. Kandungan tembaga terendah dijumpai pada Tambang-3, sedangkan kandungan tembaga tertinggi dijumpai pada AT-39. Peta sebaran kandunga Arsen dan Tembaga pada air tanah dapat dilihat pada **Gambar 3**.

Kandungan arsenik yang tinggi diduga diakibatkan oleh proses geogenik seperti adanya struktur geologi, alterasi, dan mineralisasi. Hasil analisis kimia air tanah dangkal menunjukkan bahwa kandungan arsenik tertinggi dijumpai pada wilayah dengan litologi di sekitar sumur yang relatif segar. Intrusi berulang pada bagian tenggara Kalirejo serta adanya struktur geologi memungkinkan hadirnya mineralisasi yang lebih besar sehingga dijumpai mineral pembawa arsenik. Struktur geologi yang tidak terisi mineral meningkatkan luasan area reaksi antara air dan oksigen sehingga mineral pembawa arsenik menjadi mudah teroksidasi dan terlarut pada air tanah (Goswami et al., 2022).

Pola aliran air tanah pada area kajian dapat dilihat juga pada **Gambar 3**. Data muka air tanah dan arah alirannya didapatkan dari Listiyastuti et al. (2025). Dapat dilihat bahwa pola aliran air tanah cukup memiliki korelasi terhadap sebaran kandungan Cu (tembaga) dan As (Arsenik) pada air tanah. Faktor kedekatan dengan area pertambangan dapat menjadi faktor utama pengontrol kandungan Arsenik pada area pertambangan (Faria et al., 2023). Hal ini ditunjukkan pada area studi dimana pada wilayah dekat area lokasi tambang, kandungan Arsenik pada air tanah-nya tergolong tinggi. Sedangkan, untuk sebaran kandungan Tembaga pada air tanah, sebaran konsentrasi tinggi cenderung berada pada hilir sungai (Sungai Papak dan Sungai Plampang) dan relatif lebih rendah pada area Lubang Tambang. Hal ini dapat menjadi indikasi bahwa karakteristik penyebaran Arsen cenderung terpusat pada area Lubang Tambang dan karakteristik penyebaran Tembaga cenderung kumulatif pada area menjauhi Lubang Tambang.

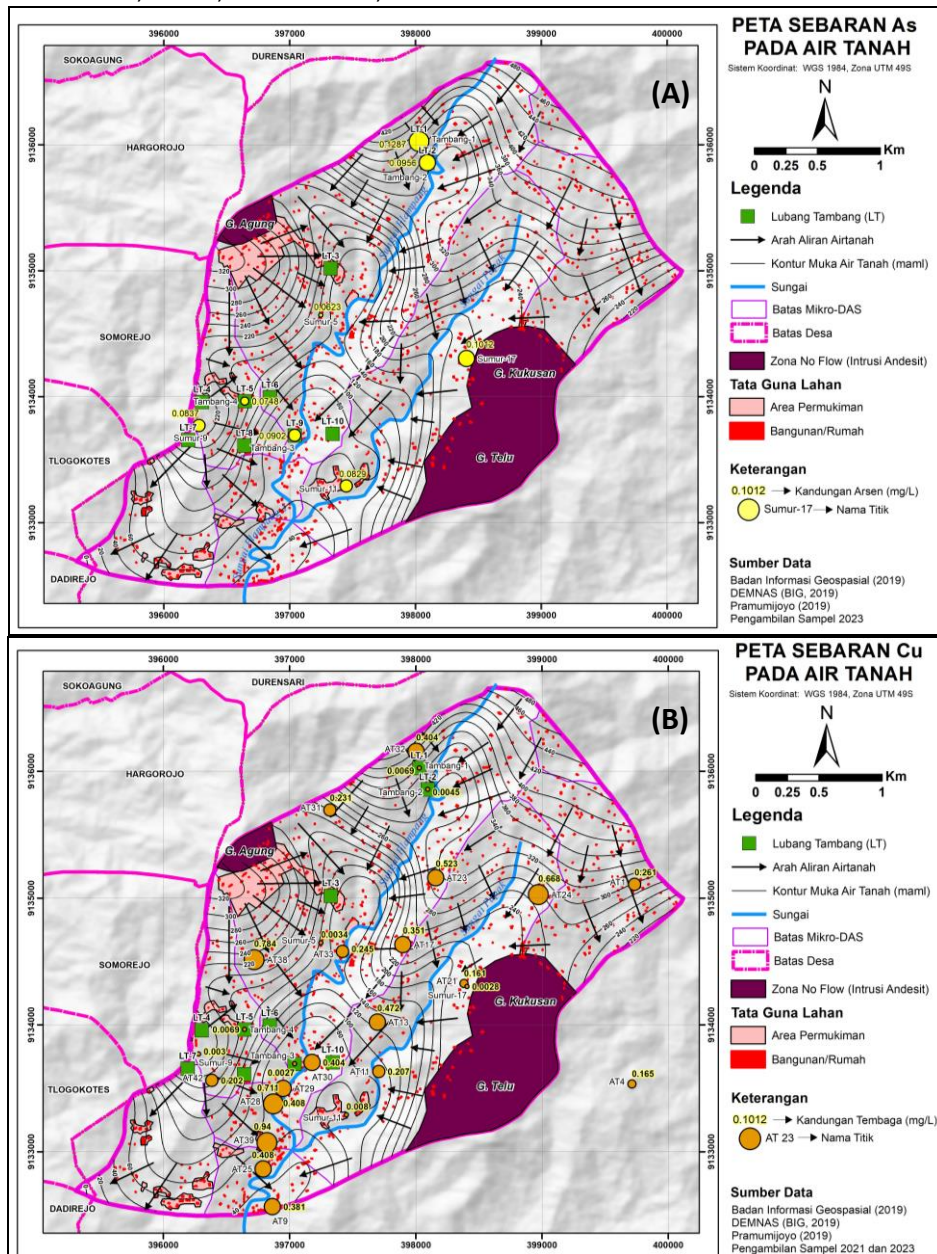
Tabel 2. Rangkuman kandungan Arsen dan Tembaga pada Air Tanah di area penelitian

STA (ID Sampel)	As (mg/L)	Cu (mg/L)	Jenis Alterasi
Sumur-5	0.0623	0.0034	Batuan Segar
Sumur-9	0.0837	0.003	Batuan Segar
Sumur-11	0.0829	0.008	Batuan Segar
Sumur-17	0.1012	0.0028	Batuan Segar
Tambang -1	0.1287	0.0069	Argilik
Tambang -2	0.0956	0.0045	Propilitik
Tambang -3	0.0902	0.0027	Argilik
Tambang -4	0.0748	0.0069	Batuan Segar
AT1	-	0.261	Batuan Segar
AT4	-	0.165	Batuan Segar
AT9	-	0.381	Batuan Segar
AT11	-	0.207	Propilitik
AT13	-	0.472	Batuan Segar
AT17	-	0.351	Argilik

STA (ID Sampel)	As (mg/L)	Cu (mg/L)	Jenis Alterasi
AT21	-	0.161	Batuan Segar
AT23	-	0.523	Batuan Segar
AT24	-	0.668	Batuan Segar
AT25	-	0.408	Batuan Segar
AT28	-	0.711	Batuan Segar
AT29	-	0.408	Batuan Segar
AT30	-	0.404	Batuan Segar
AT31	-	0.231	Batuan Segar
AT32	-	0.404	Propilitik
AT33	-	0.245	Propilitik
AT38	-	0.784	Batuan Segar
AT39	-	0.94	Batuan Segar
AT42	-	0.202	Batuan Segar

Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2024

Berkaitan dengan potensi dampak dari penyebaran Arsen dan Tembaga pada air tanah yang ada dan hubungannya dengan tata guna lahan (utamanya sungai dan permukiman), dapat dilihat bahwa aliran air tanah secara keseluruhan cenderung berarah barat daya (**Gambar 3**). Selain itu, pada Gambar 3 dapat dilihat bahwa aliran air tanah sebagian besar menyuplai aliran sungai baik Sungai Papak maupun Sungai Plampang. Titik merah dan zonasi merah muda yang ada menunjukkan lokasi rumah-rumah warga dan area padat permukiman yang ada di daerah penelitian. Wilayah paling rentan terhadap risiko pencemaran Arsen dan Tembaga adalah bagian utara daerah penelitian (dekat dengan LT-1 dan LT-2) dan area tengah cenderung ke selatan daerah penelitian (sekitar LT-9). Wilayah sekitar Gunung Kukusan (Sumur-17) patut diwaspadai karena memiliki potensi tinggi terhadap kontaminasi Arsen. Wilayah yang relatif aman terhadap kontaminasi adalah bagian timur laut area penelitian dan punggung yang memanjang timur laut – barat daya di tengah daerah penelitian.



Gambar 3. Peta Sebaran Kandungan Arsen (A, Atas) dan Tembaga (B, Bawah) pada air tanah di area penelitian Kalurahan Kalirejo, Kapanewon Kokap, Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta

Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2024

Sumur-17 (Intrusi Andesit 3) memiliki kandungan kimia air tanah yang lebih besar daripada Sumur-3 diduga karena adanya faktor geologi. Batuan Intrusi Andesit 3 relatif lebih segar dan terbentuk terakhir sehingga mineral pembawa Ca dan Mg seperti plagioklas dan hornblenda relatif lebih segar. Hal tersebut juga didukung oleh adanya struktur geologi yang lebih sedikit yang menyebabkan permeabilitas akuifer yang lebih rendah sehingga waktu tinggal air tanah semakin tinggi dan melarutkan kandungan kimia batuan secara lebih masif. Proses alterasi pada Intrusi Andesit 1 mengurangi konsentrasi Ca dan Mg pada batuan secara signifikan karena adanya proses pergantian oleh mineral yang lebih resisten sehingga berpengaruh terhadap kandungan kimia air tanah. Selain itu, struktur geologi pada Intrusi Andesit 1 berkembang lebih masif sehingga permeabilitas batuan lebih besar dan waktu tinggal air tanah yang relatif lebih sedikit. Kandungan Cu

dan kandungan As memiliki hubungan yang berbanding terbalik. Cu lebih sering dijumpai pada batuan, baik pada batuan segar maupun teralterasi, sedangkan kandungan As pada batuan sangat sedikit. Namun, kandungan As pada air tanah dangkal sangat tinggi dan melebihi ambang batas aman dibandingkan dengan kandungan Cu. Hal ini disebabkan oleh kondisi geologi dan lingkungan yang oksidatif sehingga mendukung proses pelarutan As dibandingkan Cu.

Hubungan antara kandungan Arsen dan Tembaga dengan kandungan kation dan anion pada sampel air tanah di daerah penelitian menunjukkan bahwa ion H^+ hasil oksidasi arsenopirit tidak membentuk asam pada air tanah di Kalurahan Kalirejo, dibuktikan dengan pH air tanah yang relatif netral, tetapi bereaksi dengan batuan sehingga terjadi proses hidrolisis dan proses pelarutan mineral karbonat.

Proses penggalian sumur dangkal dan penggalian bukit karena adanya proses penambangan emas menyebabkan batuan terekspos dan berinteraksi dengan oksigen. Air tanah di Kalirejo berada pada kondisi oksidatif dengan pH netral-sedikit basa. Mineral sulfida yang mengalami oksidasi dengan oksigen sebagai oksidan seperti pirit dan arsenopirit melepaskan arsenit dan sulfat pada pH tersebut. Proses tersebut menyebabkan adanya korelasi tinggi antara kandungan ion sulfat dengan konsentrasi arsenik pada air tanah. Semakin tinggi arsenik pada air tanah menunjukkan proses oksidasi mineral sulfida yang semakin tinggi sehingga kandungan sulfat yang terlarut juga semakin besar.

Konsentrasi arsenat ($As(V)$) meningkat dan semakin sulit tertransport seiring dengan bertambahnya nilai pH. Kalurahan Kalirejo memiliki pH relatif netral (**Gambar 2**) sehingga didominasi oleh kehadiran arsenat ($As(V)$) yang menunjukkan keadaan oksidatif. Arsenat bermuatan negatif pada kondisi pH asam ($pH\ 2-7$, rumus kimia $H_2AsO_4^-$) dan semakin negatif pada pH yang lebih basa ($pH\ 7-12$, rumus kimia $HAsO_4^{2-}$). Arsenat hadir dalam bentuk anion yang akan berikatan dengan kation pada batuan sehingga arsenat memiliki mobilitas rendah dan cenderung terkonsentrasi di dekat sumber. Arsenit bersifat lebih mudah bergerak karena tidak memiliki muatan (Herath et al., 2016) tetapi hampir sulit dijumpai di alam pada pH yang relatif netral karena terlalu stabil, tidak bermuatan (H_3AsO_3), dan harus berada pada kondisi reduktif. Kondisi oksidatif menyebabkan arsenit teroksidasi menjadi arsenat (Sarkar dan Paul, 2016).

Terkait kandungan tembaga (Cu) pada air tanah, daerah Kalirejo kaya akan mineral pembawa tembaga seperti kalkopirit dan kovelit. Akan tetapi, konsentrasi logam tersebut pada air tanah dangkal berada di bawah ambang batas ($<2\ mg/L$) karena kondisi lingkungan yang tidak memungkinkan terjadinya pelarutan tembaga. Mineral pembawa tembaga yang dijumpai di Kalirejo seperti kalkopirit ($CuFeS_2$) dan mineral supergen berupa kovelit (CuS) sulit larut dalam air tanah pada kondisi oksidatif dan cenderung reaktif pada kondisi reduktif dengan besi ferric (Fe^{3+}) sebagai oksidan. Kondisi reduktif dapat tercapai apabila pH asam, sedangkan air tanah dangkal Kalirejo memiliki pH netral. Kondisi asam menyebabkan tembaga hadir dalam bentuk $Cu(OH)_2$ dan $CuOH^+$. Semakin basa, maka kelarutannya semakin berkurang karena ion OH^- akan bereaksi dengan $CuOH^+$ mempresipitasikan $Cu(OH)_2(s)$ yang bersifat solid. Semakin basa, maka kandungan OH^- semakin banyak akibat meningkatnya pH sehingga tembaga tidak hadir dalam keadaan terlarut, tetapi terpresipitasi menjadi fase solid.

Konsentrasi tembaga meningkat pada pH yang asam, diikuti dengan peningkatan kandungan HCO_3^- dan penurunan kandungan sulfat serta penurunan kandungan kation mayor. Semakin asam, maka ion H^+ semakin banyak dan memicu pelarutan kalsit pada batuan sehingga kandungan HCO_3^- pada air tanah dangkal semakin tinggi. Hal ini disebabkan karena kalsit akan terus larut hingga kondisi bikarbonat menjadi jenuh. Nilai pH air tanah dangkal di Kalirejo adalah sedikit asam-sedikit basa sehingga SO_4^{2-} merupakan produk oksidasi mineral sulfida dengan oksigen sebagai oksidan (arsenopirit), bukan besi ferric (kalkopirit, kovelit) sehingga ketika tembaga memiliki konsentrasi tinggi,

maka oksidasi oleh oksigen sebagai oksidan semakin turun dan berakibat pada menurunnya kandungan sulfat pada air tanah. Ion H^+ yang tinggi pada air tanah asam cenderung berikatan dengan anion untuk mencapai kesetimbangan dibandingkan berikatan dengan batuan (hidrolisis) sehingga semakin asam pH air tanah, maka kandungan kation mayor semakin menurun. Kation Ca^{2+} dan Mg^{2+} cenderung tidak memiliki hubungan kuat dengan kandungan tembaga karena ion tersebut cenderung hadir akibat proses pelapukan dan hidrolisis mineral silikat seperti plagioklas, hornblenda, dan piroksen pada batuan andesit.

Hubungan Kondisi Geologi dengan Kehadiran Arsen dan Tembaga pada Air Tanah

Hadirnya alterasi dan aktivitas pertambangan juga meningkatkan kandungan As pada air tanah. Hal ini didukung dengan studi kasus di Desa Jendi, Kecamatan Selogiri, Kabupaten Wonogiri, Provinsi Jawa Tengah, yang juga merupakan area penambangan emas tradisional, dimana terdapat kontaminasi air tanah oleh logam berat (Nisaa, 2017). Pencemaran logam berat di Selogiri ditunjukkan dengan kandungan arsenik yang tinggi (0,146 mg/L-1,1327 mg/L) pada air tanah dangkal yang disertai dengan peningkatan nilai TDS (Nisaa, 2017). Oleh karena itu, diinterpretasikan bahwa proses penambangan emas berpengaruh terhadap peningkatan kandungan logam berat pada air tanah dangkal, terutama kandungan As meskipun peningkatan tersebut tidak besar. Tanpa adanya proses antropogenik yang masif, kandungan arsenik pada air tanah dangkal di Kalirejo sudah tinggi dan melebihi ambang batas aman. Tingginya arsenik pada air tanah dangkal disebabkan karena proses geogenik berupa proses alterasi hidrotermal dan pelapukan yang dominan (Goswami et al., 2022). Batuan di Kalirejo mengandung mineral pembawa arsenik secara alami yang berkontribusi terhadap kandungan arsenik pada air tanah. Apabila proses penambangan berjalan lebih masif, maka kualitas air tanah dangkal di Kalurahan Kalirejo akan semakin buruk karena meningkatkan proses oksidasi yang berpengaruh terhadap peningkatan kandungan arsenik terlarut pada air tanah. Kandungan tembaga dan arsen pada batuan dan urat kuarsa di area penelitian dapat dilihat pada **Tabel 4** (Pramumijoyo, 2017).

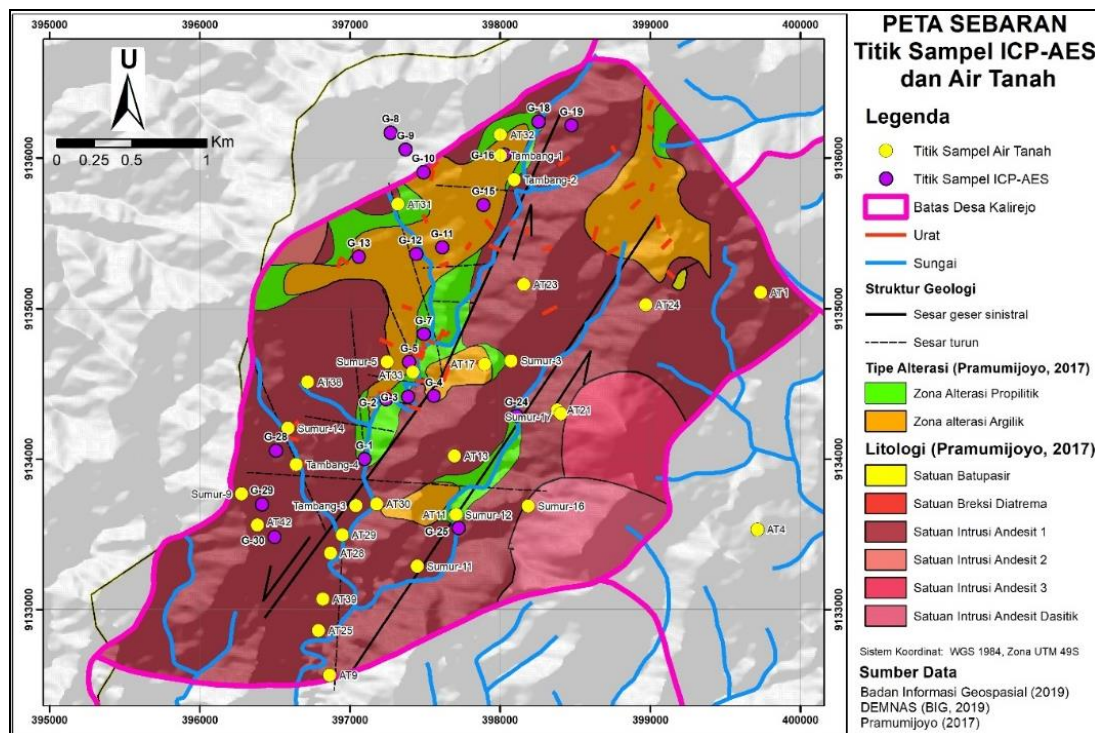
Peta sebaran titik sampel pengujian kandungan arsen dan tembaga pada batuan dan air tanah dapat dilihat pada **Gambar 4**. Titik sampel Tambang-1 dan Tambang-2 yang terletak pada zona alterasi propilitik memiliki konsentrasi arsenik yang lebih tinggi dibandingkan dengan konsentrasi arsenik di Tambang-3 yang batuan sekitarnya lebih segar. Kandungan tembaga (Cu) pada urat kuarsa di Kalurahan Kalirejo berada pada rentang rendah hingga cukup tinggi, yaitu 27,9 gr/ton-5171 gr/ton, sedangkan kandungan As pada urat kuarsa memiliki rentang 128,9 gr/ton-1010,5 gr/ton (Tabel 3). Konsentrasi arsenik dan tembaga pada urat kuarsa relatif lebih tinggi dibandingkan dengan konsentrasi pada batuan segar maupun teralterasi (**Tabel 3**). Meskipun demikian, arsenik dan tembaga tetap dijumpai pada batuan dan berasosiasi dengan veinlet kuarsa (urat-urat hasil presipitasi mineral kuarsa pada rekahan batuan akibat proses hidrotermal) atau terdiseminasi pada batuan akibat adanya struktur geologi yang menjadi jalan bagi fluida hidrotermal untuk mengendapkan produk mineralisasi. Hadirnya arsenik dan tembaga pada urat kuarsa, batuan segar, maupun batuan teralterasi menunjukkan bahwa secara alamiah, batuan di Kalurahan Kalirejo mengandung unsur yang berpotensi menjadi pencemar air tanah. Rangkuman rentang kandungan tembaga dan arsen pada batuan, urat kuarsa, dan air tanah pada air tanah pada masing-masing jenis alterasi dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 3. Hasil analisis kandungan kimia batuan dan urat kuarsa berdasarkan tingkat alterasinya menggunakan metode XRF dan ICP-AES.

Jenis Sampel	Kode Sampel	Jenis Alterasi	Cu (gr/ton)	As (gr/ton)
Batuan	G-18	Andesit Segar	24,5	b.d.
	G-24		30	b.d.
	G-9		14,5	6,5
	G-3		31,2	b.d.
Urat Kuarsa	G-19	Argilik	44	1010,5
	G-8		6,2	243,1
	G-13		0	20,1
Batuan	G-12	Argilik	16,4	84,7
	G-11		6,4	77,2
	G-16		3,5	248,5
	G-15		b.d	80,5
Urat Kuarsa	G-4	Propilitik	5171	103,3
	G-5		180,6	128,9
	G-10		27,9	151,7
Batuan	G-7	Propilitik	7,5	b.d.
	G-1		8,5	b.d.
Urat Kuarsa	G-25	Propilitik	22	9,7
	G-2		276,1	222,5

b.d. : below detection atau di bawah batas deteksi alat

Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2024

**Gambar 4. Sebaran titik sampel ICP-AES dan Air Tanah di area penelitian**

Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2024

Tabel 4. Rangkuman nilai kandungan Cu dan As pada batuan, urat kuarsa, dan air tanah di area penelitian pada masing-masing jenis alterasi.

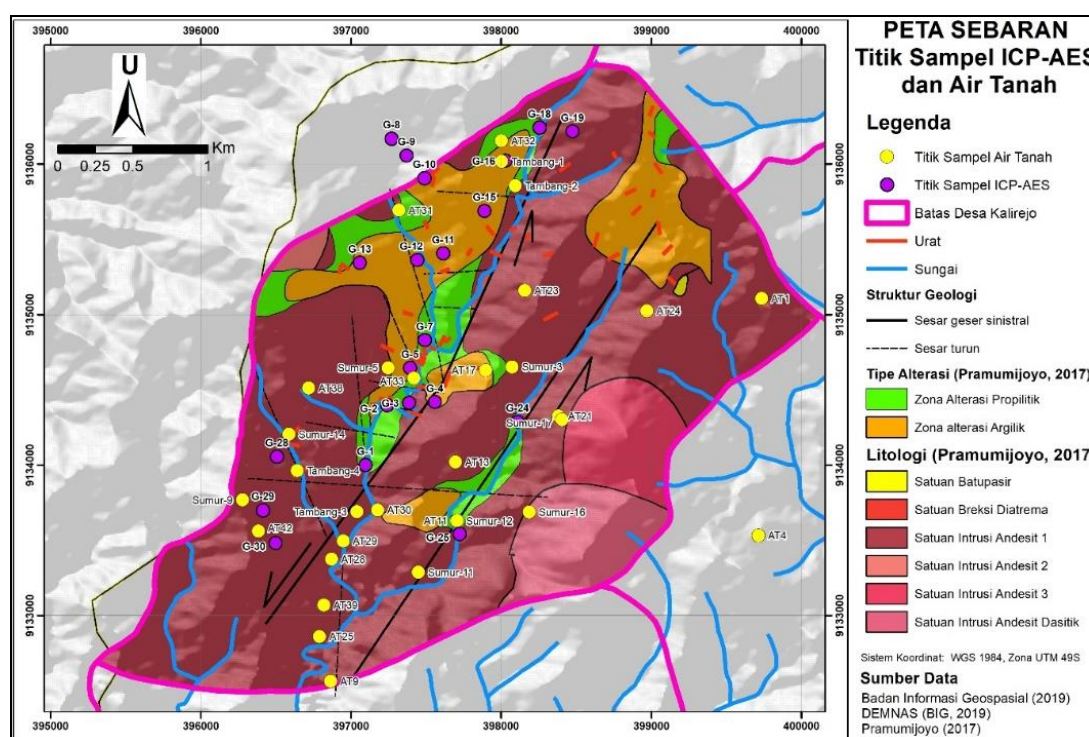
Kandungan Tembaga (Cu)		Andesit segar			Argilik			Propilitik		
		min	max	mean	min	max	mean	min	max	mean
Pada Batuan (hasil uji ICP-AES)	(gr/ton)	14.5	31.2	25.05	0	16.4	5.42	7.5	8.5	12.67
Pada Urat Kuarsa (hasil uji ICP-AES)	(gr/ton)	44	44	44	27.9	5171	1793.17	276.1	276.1	276.1
Pada Air Tanah	(mg/L)	0.0028	0.94	0.34	0.0027	0.35	0.12	0.0045	0.404	0.22

Kandungan Arsen (As)		Andesit segar			Argilik			Propilitik		
		min	max	mean	min	max	mean	min	max	mean
Pada Batuan (hasil uji ICP-AES)	(gr/ton)	0	6.5	3.25	20.1	248.5	125.68	0	9.7	3.23
Pada Urat Kuarsa (hasil uji ICP-AES)	(gr/ton)	1000	1010.5	1010.5	103.3	151.7	127.96	222	222.5	222.5
Pada Air Tanah	(mg/L)	0.062	0.1012	0.08	0.090	0.1287	0.11	0.096	0.096	0.096

Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2024

Apabila ditinjau dalam bentuk box plot, data pada

Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2024

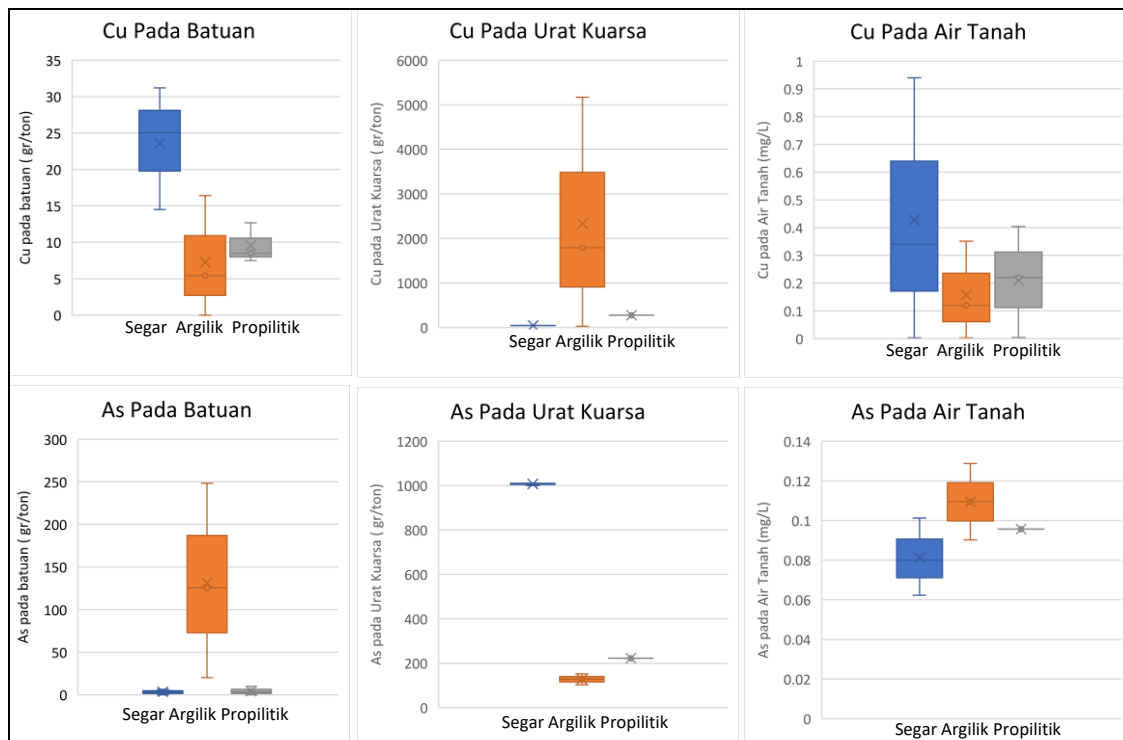


Gambar 4. Sebaran titik sampel ICP-AES dan Air Tanah di area penelitian

Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2024

Tabel 4 menjadi seperti pada Gambar 5. Secara umum dapat dilihat bahwa kandungan Tembaga dan Arsen pada batuan memiliki korelasi yang cukup tinggi dengan kandungan Tembaga dan Arsen pada Air Tanah. Hal ini juga dipertegas dengan penggambaran grafik dan diagram pada Gambar 6, yang menunjukkan bahwa seiring meningkatnya kandungan Tembaga dan Arsen pada batuan, maka meningkat juga

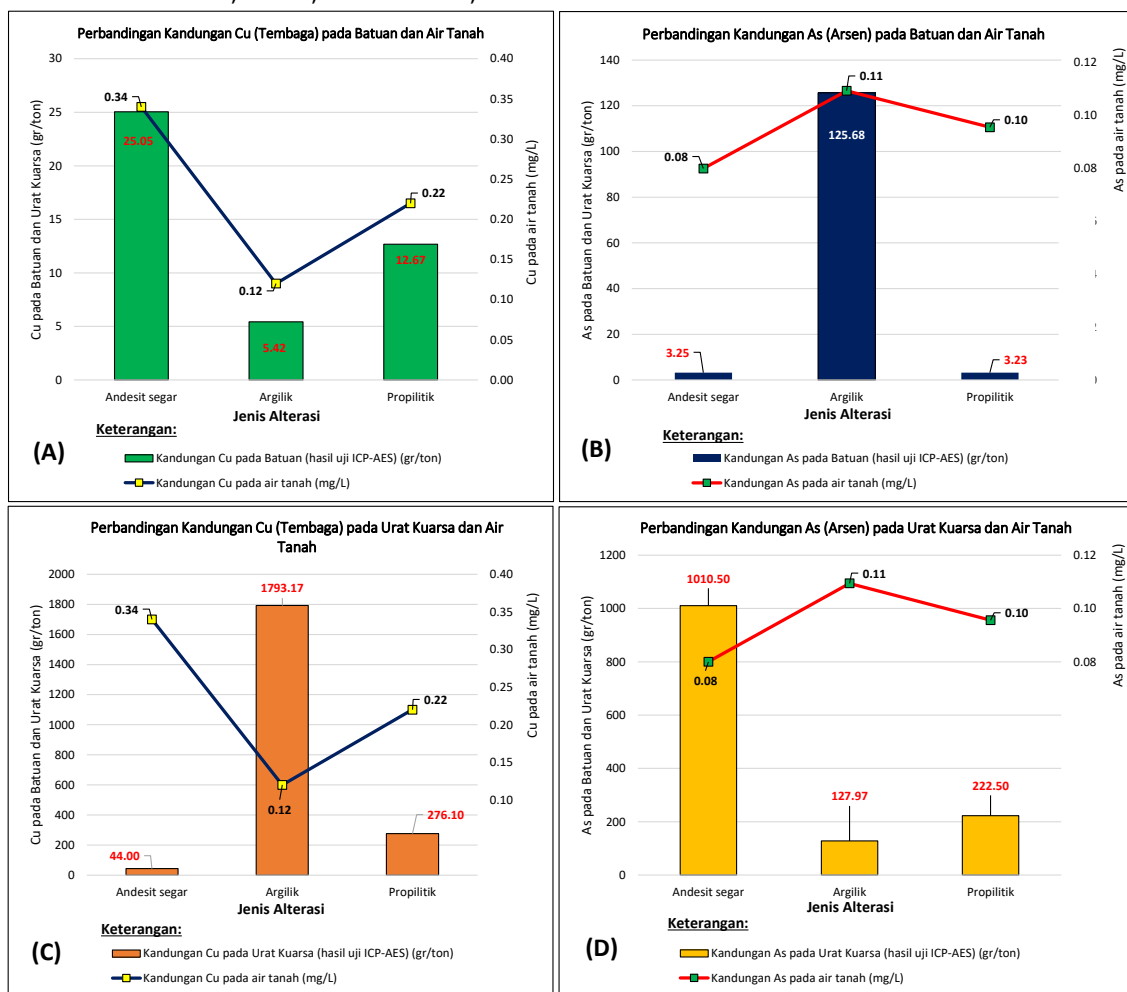
kandungannya di dalam air tanah. Sedangkan, kandungan Tembaga dan Arsen pada urat kuarsa tidak menunjukkan adanya korelasi terhadap kandungannya di air tanah.



Gambar 5. Perbandingan nilai minimum, rata-rata dan maksimum kandungan Cu dan As pada Batuan, Urat Kuarsa, dan Air Tanah pada masing-masing tipe alterasi (segar, argilik, dan propilitik)

Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2024

Apabila ditinjau terhadap jenis alterasinya, maka dapat diinterpretasikan bahwa kandungan Arsen paling tinggi berada pada wilayah dengan alterasi argilik (perubahan batuan asli menjadi mineral lempung seperti kaolinit, montmorillonit, dan illit. akibat interaksi dengan fluida magmatik/hidrotermal), sedangkan untuk tembaga berada pada wilayah dengan tanpa alterasi atau batuan segar. Hal ini diduga disebabkan oleh sifat dari Cu dan As itu sendiri. Arsen pada batuan semakin terkayakan apabila mengalami pelapukan intensif akibat alterasi dan sangat dikontrol oleh nilai pH, sedangkan tembaga pada dasarnya telah terkandung pada batuan yang berasosiasi dengan mineral bijih seperti kalkopirit, kalkosit, dan lain-lain, yang pada tidak terlalu terkontrol oleh jenis alterasi yang ada.

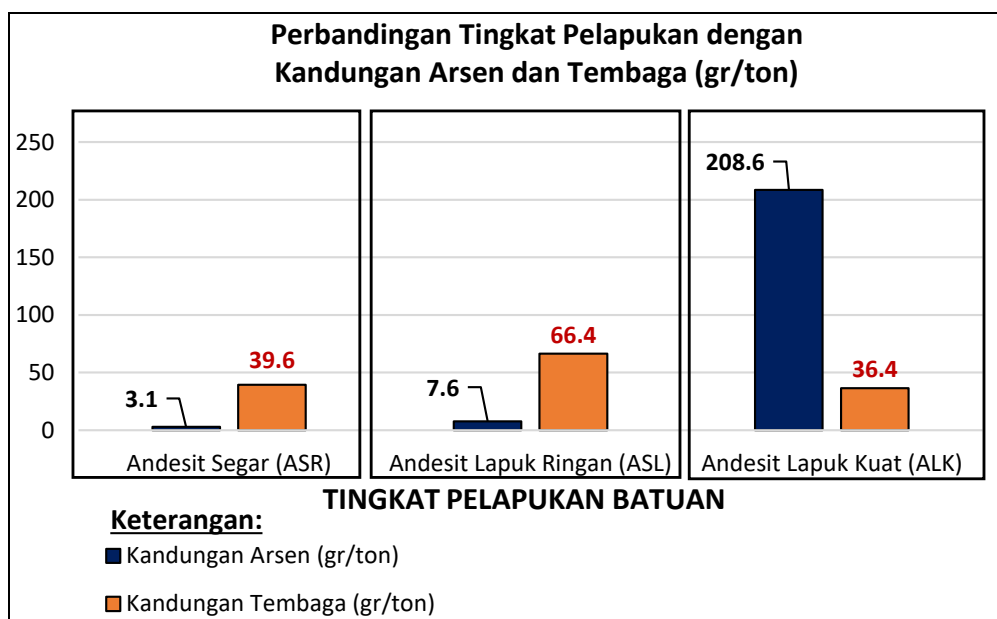


Gambar 6. Diagram dan grafik perbandingan rerata kandungan Cu dan As pada batuan, urat kuarsa dan air tanah pada masing-masing tipe alterasi (data pada batuan dan urat kuarsa didapat dari Pramumijoyo, 2017).

Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2024

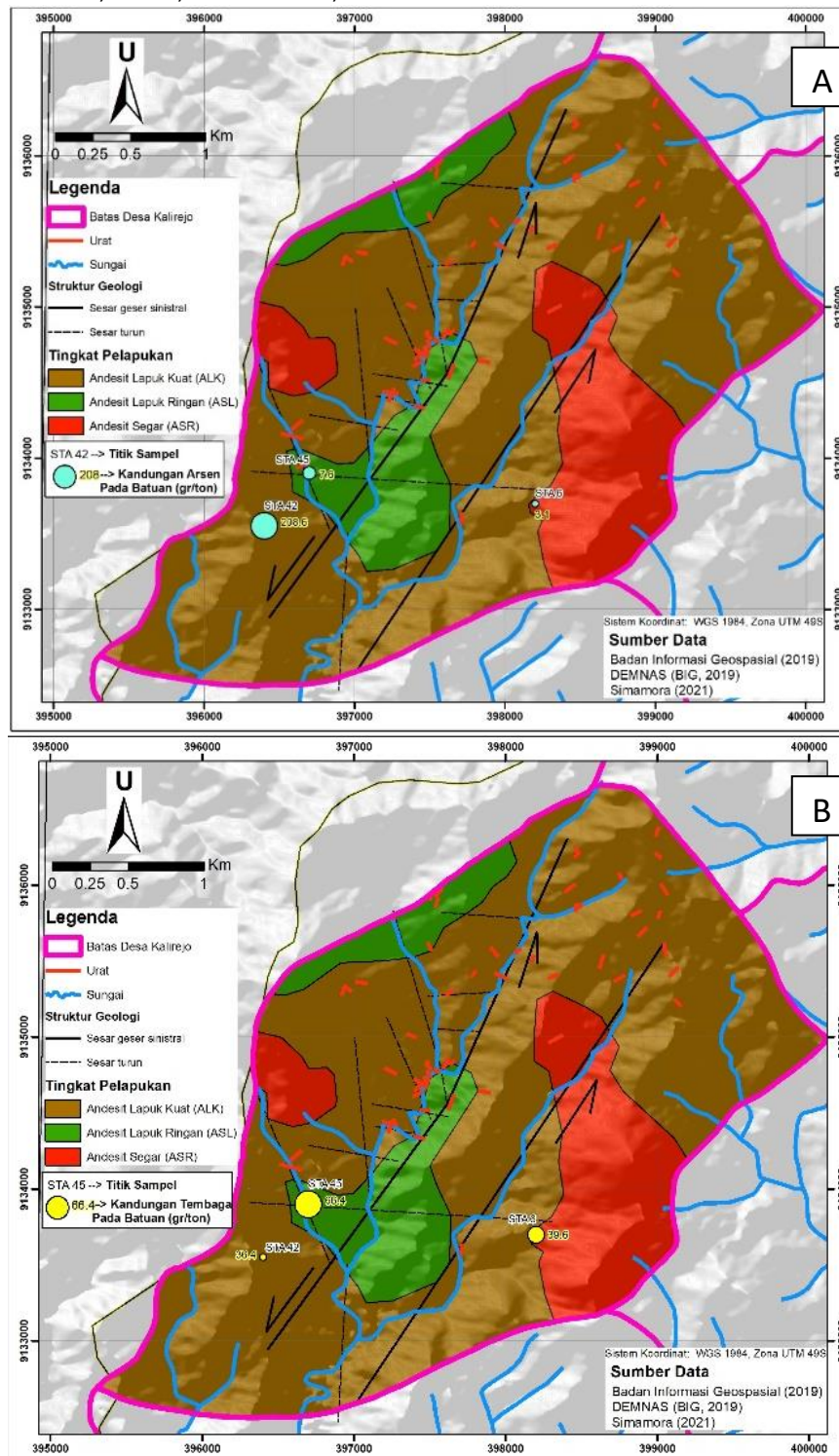
Sebagai langkah memperkuat penjelasan mengenai hubungan antara kandungan As dan Cu pada batuan dan air tanah, dilakukan korelasi antara tingkat pelapukan batuan dengan kandungan As serta Cu dalam batuan tersebut. Pada **Gambar 7**, dapat dilihat bahwa nilai As memiliki korelasi yang cukup kuat dengan semakin tingginya tingkat pelapukan, sedangkan nilai Cu tidak terlalu dipengaruhi oleh tingkat pelapukan. Sebaran sampel dengan tingkat pelapukannya dapat dilihat pada **Gambar 8**. Kandungan As pada batuan sangat lapuk bisa mencapai 208,6 gr/ton sedangkan pada batuan yang segar hanya 3.1 gr/ton. Untuk kandungan Tembaga, nilai tertinggi terdapat pada kondisi batuan dengan pelapukan yang ringan (senilai 66,4 gr/ton). Hal ini kemudian memperkuat penjelasan terkait dengan hubungan antara jenis alterasi dengan tingkat kandungan Arsen pada air tanah, dimana pada kondisi batuan yang semakin lapuk (akibat alterasi yang ada) maka pada dasarnya kandungan Arsen sudah tinggi. Oleh karena itu, akibat dampak dari penggalan area yang menyebabkan tersingkapnya batuan yang menyebabkan meningkatnya pelapukan pada batuan dapat menyebabkan semakin cepatnya kandungan Arsen terlepas ke air tanah. Dengan demikian, semakin meningkatnya intensitas proses penambangan, maka dapat diperkirakan juga terdapat potensi meningkatnya kandungan Arsen pada air tanah yang ada di area penelitian. Hal ini diperkuat oleh hasil dari beberapa penelitian terdahulu yang menyebutkan bahwa terdapat korelasi antara

kandungan Arsen (As) dengan tingkat pelarutan mineral saat kontak antara batuan dengan air tanah (Tabelin et al., 2018). Selain itu, kondisi pH dan suhu larutan yang kontak dengan batuan juga memengaruhi tingkat pelarutan Arsen (Kato et al., 2023). Penelitian oleh Kato et al. (2021) juga menyebutkan bahwa konsentrasi Arsen terlarut berkorelasi dengan kandungan oksigen terlarut (DO, *Dissolved Oxygen*), dimana pada kondisi oksigen terlarut yang lebih sedikit maka kandungan Arsen yang larut juga lebih sedikit. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa tingkat pelapukan batuan memiliki korelasi positif terhadap kandungan Arsen pada air tanah (semakin kuat pelapukan maka semakin tinggi kandungan Arsen), namun hubungan antara tingkat pelapukan batuan dengan kandungan tembaga pada air tanah cenderung tidak menunjukkan pola korelatif. Artinya, diperlukan penelitian lebih mendalam untuk mengetahui hubungan antara konsentrasi tembaga pada air tanah dengan berbagai parameter lainnya pada batuan yang dapat saling memengaruhi. Sementara, dari penelitian ini diketahui bahwa jenis alterasi cukup menjadi kontrol dalam kaitannya dengan tingkat konsentrasi tembaga pada air tanah.



Gambar 7. Diagram perbandingan kandungan Arsen pada tiap tingkat pelapukan batuan di area penelitian Kalurahan Kalirejo, Kokap, Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta

Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2024



Gambar 8. Peta tingkat pelapukan batuan dengan sebaran kandungan nilai Arsen (A) dan Tembaga (B) pada batuan di area penelitian

Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2024

Kesimpulan dan Saran

Air tanah dangkal di Kalirejo memiliki nilai pH berada pada rentang sedikit asam dan 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. Tipe kimia air tanah di daerah Kalirejo,

baik pada air tanah dangkal maupun air tambang sebagian besar merupakan Kalsium-Hidrogenkarbonat. Pada beberapa wilayah dengan kontrol struktur geologi dan alterasi yang intensif, terdapat pengaruh sulfat yang cukup dominan sehingga masuk ke dalam kelompok kalsium-hidrogenkarbonat-sulfat hingga kelompok kalsium-sulfat. Peningkatan kandungan kimia pada air tanah berbanding lurus dengan kandungan TDS.

Kandungan logam berat Cu pada air tanah dangkal dan air tambang masih di bawah ambang batas aman menurut Permenkes No. 2 Tahun 2023 dengan rentang 0,0027-0,94 mg/L. Sedangkan, kandungan arsenik pada air tanah dangkal dan air rembesan lubang tambang telah melebihi ambang batas aman dengan rentang 0,0623-0,1287 mg/L. Nilai pH Kalirejo yang relatif netral menjadi pengontrol utama kelarutan logam-logam berat sehingga As(V) mudah larut pada air tanah, sedangkan Cu relatif sulit larut.

Proses yang terjadi di Kalirejo berupa oksidasi, hidrolisis, dan pelapukan batuan. Nilai pH relatif netral disebabkan karena adanya reaksi yang seimbang antara oksidasi, hidrolisis, dan pelarutan mineral. Meskipun tidak ada perbedaan signifikan antara kandungan logam berat pada sumur gali dan lubang tambang, tetapi secara alamiah, kandungan arsenik terlarut pada air tanah dangkal sudah melebihi ambang batas sehingga apabila penambangan lebih masif, kualitas air tanah dangkal akan semakin turun karena arsenik terlarut yang semakin tinggi.

Kedepannya, penelitian lebih mendalam terkait hubungan antara konsentrasi tembaga pada air tanah dengan parameter geologis lainnya, serta jenis alterasi dengan kandungan Arsen pada air tanah perlu dilakukan dengan sampel yang lebih banyak agar lebih representatif. Selain itu, perlu juga dilakukan pemantauan kandungan logam berat yang menerus dan pada kondisi berbeda musim, yakni pada musim hujan dan musim kemarau, sehingga fluktuasi kandungan logam berat dapat diketahui dan hubungannya dengan kondisi geologi dapat dipahami dengan lebih baik.

Kaitannya dengan manajemen sumber air tanah yang berkelanjutan, Ullah et al. (2022) menyebutkan bahwa perlu adanya peningkatan kapasitas sumber daya manusia (berupa peningkatan kesadaran masyarakat akan pentingnya isu kualitas air tanah) dan teknologi berupa pemantauan air tanah oleh pemerintah setempat yang bekerja sama dengan otoritas manajemen air tanah yang ada.

Dalam konteks pengembangan wilayah dan manajemen lingkungan, beberapa upaya yang dapat dilakukan untuk meminimalisasi risiko pencemaran diantaranya adalah sebagai berikut: (1) Pemerintah sebagai pembuat kebijakan diharapkan dapat menindak tegas berbagai kegiatan pertambangan ilegal (2) Pada kegiatan pertambangan rakyat berizin, perlu ditaatinya pembatasan aktivitas tambang pada wilayah sempadan sungai dan mata air sesuai peraturan yang berlaku; (3) Perlu pemantauan kualitas air sungai, mata air dan air tanah secara rutin dan periodik; (4) Tidak melakukan pemanfaatan air tanah pada area yang tercemar maupun berpotensi tercemar Arsen berdasarkan penelitian ini; (5) Pemanfaatan air tanah untuk keperluan konsumsi, higiene dan sanitasi dapat memaksimalkan pada sumur bor ataupun sumur gali yang tidak tercemar atau tidak berada pada wilayah yang berpotensi tercemar logam berat berdasarkan penelitian ini. Harapannya, dengan adanya penelitian ini rencana pengembangan wilayah di Kalurahan Kalirejo dapat mempertimbangkan kondisi hidrogeologis yang dihasilkan dari penelitian ini.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Departemen Teknik Geologi Universitas Gadjah Mada karena telah membiayai sebagian penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Adeloju, S. B., Khan, S., & Patti, A. F. (2021). Arsenic contamination of groundwater and its implications for drinking water quality and human health in under-developed countries and remote communities—a review. *Applied Sciences*, 11(4), 1926. <https://doi.org/10.3390/app11041926>
- 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/>
- Canteiro, M., Arellano-Aguilar, O., Bravo, J. E. B., & Zambrano, L. (2023). Urban green spaces and their relationship with groundwater quality: the case of a shallow aquifer in the south of Mexico City. *Sustainable water resources management*, 9(5), 156. <https://doi.org/10.1007/s40899-023-00935-x>
- Clark, I. (2015). *Geochemical Evolution*: Florida, CRC Press, 231–264 p., doi:10.1201/b18347-9.
- Devy, R.A., dan Lakshmi, G. (2020). Study of heavy metal contamination of water bodies collected from flood affected area - Mammukku, Ranni, Pathanamthitta District, Kerala, India, *AIP Conference Proceedings, Online, American Institute of Physics Inc.*, v. 2287, p. 020027(1–6), doi:10.1063/5.0029897.
- Faria, M. C. D. S., Hott, R. D. C., Santos, M. J. D., Santos, M. S., Andrade, T. G., Bomfeti, C. A., ... & Rodrigues, J. L. (2023). Arsenic in mining areas: Environmental contamination routes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(5), 4291. <https://doi.org/10.3390/ijerph20054291>
- 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.
- Herath, I., Vithanage, M., Bundschuh, J., Maity, J. P., & Bhattacharya, P. (2016). Natural arsenic in global groundwaters: distribution and geochemical triggers for mobilization. *Current Pollution Reports*, 2(1), 68–89. <https://doi.org/10.1007/s40726-016-0028-2>
- Kanel, S. R., Das, T. K., Varma, R. S., Kurwadkar, S., Chakraborty, S., Joshi, T. P., ... & Nadagouda, M. N. (2023). Arsenic contamination in groundwater: Geochemical basis of treatment technologies. *ACS Environmental Au*, 3(3), 135–152. <https://doi.org/10.1021/acsenvironau.2c00053>
- Kato, T., Masaki, Y., Gathuka, L.W., Takai, A. and Katsumi, T. (2021). Anaerobic batch leaching tests of shale rock grains. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 9(7), pp.374–379. <https://doi.org/10.3208/jgssp.v09.cpeg153>
- Kato, T., Takai, A., Iwata, Y., Gathuka, L.W. and Katsumi, T. (2023). Evaluating temperature effects on leaching behavior of geogenic arsenic and boron from crushed excavated rocks using shaking and nonshaking batch tests. *Soils and Foundations*, 63(1), p.101274. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2023.101274>
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, (2023), *Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 Tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 Tentang Kesehatan Lingkungan*: Indonesia, p. 175, <https://peraturan.bpk.go.id/Download/301587/Permenkes Nomor 2 Tahun 2023.pdf>.
- Li, Y., Ji, L., Mi, W., Xie, S., dan Bi, Y. (2021). Health risks from groundwater arsenic on residents in northern China coal-rich region. *Science of the Total Environment*, 773, 145003. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145003>
- Listiyastuti, R., Simamora, L. S., Ilham, M., Warmada, I. W., & Putra, D. P. E. (2025). Hidrogeologi Dan Hidrokimia Air Tanah Pada Area Penambangan Emas Tradisional Di Wilayah Kalirejo, Kokap, Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. *Jurnal Geosaintek*, 11(1), 1–15. <https://doi.org/10.12962/j25023659.v11i1.2352>
- Mukherjee, A., Coomar, P., Sarkar, S., Johannesson, K. H., Fryar, A. E., Schreiber, M. E., ... & Vengosh, A. (2024). Arsenic and other geogenic contaminants in global groundwater. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5(4), 312–328. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00519-z>
- Nisaa, F.A. (2017) *Konsentrasi dan sumber arsenik pada air tanah di daerah Jendi, Kecamatan Selogiri, Kabupaten Wonogiri, Jawa Tengah* [Skripsi, Tidak dipublikasikan]: Universitas Gadjah Mada, 171 p.
- Nivetha, A., Sakthivel, C., Prabha, I. (2021). Heavy Metal Contamination in Groundwater and Impact on Plant and Human. In: Shit, P.K., Adhikary, P.P., Sengupta, D. (eds) *Spatial Modeling and Assessment of Environmental Contaminants. Environmental Challenges and Solutions*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63422-3_14

- Podgorski, J., & Berg, M. (2020). Global threat of arsenic in groundwater. *Science*, 368(6493), 845-850. DOI: 10.1126/science.aba151
- Pramumijoyo, P. (2017). Geologi, geokimia, dan karakteristik fluida hidrotermal pada endapan epitermal sulfidasi rendah di daerah Sangon, Kokap, Daerah Istimewa Yogyakarta [Tesis, Tidak dipublikasikan]: Universitas Gadjah Mada, 329 p.
- 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.
- Punia, A., & Siva Siddaiah, N. (2017). Assessment of heavy metal contamination in groundwater of Khetri copper mine region, India and health risk assessment. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 14(4), 9-19. <https://doi.org/10.3233/AJW-170032>
- Radutu, A., Luca, O., & Gogu, C. R. (2022). Groundwater and urban planning perspective. *Water*, 14(10), 1627. <https://doi.org/10.3390/w14101627>
- Sarkar, A., & Paul, B. (2016). The global menace of arsenic and its conventional remediation-A critical review. *Chemosphere*, 158, 37-49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.05.043>
- Setiabudi, B.T. (2005). Penyebaran Merkuri Akibat Usaha Pertambangan Emas di Daerah Sangon, Kabupaten Kulon Progo, D.I. Yogyakarta, Subdit Konservasi, Kolokium Hasil Lapangan-DIM, Pusat Sumber DayaGeologi, Bandung, hal 61-6.
- 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.
- Tabelin, C.B., Igarashi, T., Villacorte-Tabelin, M., Park, I., Opiso, E.M., Ito, M. and Hiroyoshi, N. (2018). Arsenic, selenium, boron, lead, cadmium, copper, and zinc in naturally contaminated rocks: A review of their sources, modes of enrichment, mechanisms of release, and mitigation strategies. *Science of the Total Environment*, 645, pp.1522-1553. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.103>
- Tiwari, A. K., Singh, P. K., Singh, A. K., & De Maio, M. (2016). Estimation of heavy metal contamination in groundwater and development of a heavy metal pollution index by using GIS technique. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 96, 508-515. <https://doi.org/10.1007/s00128-016-1750-6>
- Ullah, Z., Rashid, A., Ghani, J., Nawab, J., Zeng, X. C., Shah, M., ... & Iqbal, J. (2022). Groundwater contamination through potentially harmful metals and its implications in groundwater management. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1021596. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1021596>
- Widagdo, A., Pramumijoyo, S., dan Harijoko, A. (2018). Tectonostratigraphy-volcanic of Gajah-Ijo-Menoreh Tertiary volcanic formations in Kulon Progo mountain area, Yogyakarta-Indonesia, in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 212, p. 1–12, doi:10.1088/1755-1315/212/1/012052.