

Analisis konsentrasi dan distribusi spasial logam berat dalam air tanah di sub DAS Galeh-torong, Jawa Tengah, Indonesia

Dhandhun Wacano ¹, Nedhia Febrianti ², Lutfia Isna Ardhayanti ¹

¹Jurusan Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, Indonesia

²Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Belitung, Kepulauan Bangka Belitung, Indonesia

Correspondent Author: Dhandhun Wacano (email: dhandhunwacano@uui.ac.id)

ABSTRACT

Groundwater is the most desired natural resource to fulfill daily needs of humans in the world. The lake of Rawa Pening has undergone a decline in water quality due to both external and internal activities that pose a risk of pollution. Environmental pollution in the surrounding lake of Rawa Pening is not only indicated by the proliferation and expansion of water hyacinth plants but also from heavy metals. This study examined the concentration and spatial distribution of Cd, Cu, Pb, and Fe in the groundwater of Sub DAS Galeh-Torong, the western part of Rawa Pening, to better understand the threats in the Rawa Pening Lake circumstance. A total of 18 groundwater samples were collected and analyzed using atomic absorption spectrophotometry (AAS). Inverse distance weighted (IDW) was applied to reveal the spatial distribution combined with the standard threshold classification pattern. The result showed that the concentration of Cd, Pb, and Fe was exceeding the Indonesian standard for drinking water, while Cu did not. Further, the spatial distribution pattern revealed that the eastern part of the study area was consistently in high concentration for all of the metals. The location is flat in morphology and is associated with intensive human activities such as settlement areas, agriculture areas, and tourism areas. The impact of heavy metal exposure through drinking water should become a highlighted issue in the study area since the toxicity of heavy metals can have a lethal impact. The information of concentration and spatial distribution is crucial to the better management of water resource security and sustainability.

This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Article History

Received 2024-12-17

Revised 2025-01-24

Accepted 2025-01-30

Keywords

Heavy metals
Groundwater
Analysis spasial
Rawa Pening

Pendahuluan

Air tanah merupakan salah satu sumber utama air bersih yang dimanfaatkan jutaan manusia untuk memenuhi kebutuhan hidup mereka sehari-hari. Dalam hal ini, tidak hanya faktor kuantitas yang harus dipenuhi, namun juga aspek kualitas air tanahnya. Sehingga, kualitas air tanah merupakan kunci penting untuk mengetahui tingkat keberlanjutan penggunaannya [1]. Namun sangat disayangkan, kualitas air tanah di seluruh dunia saat ini sedang mengalami penurunan karena berbagai faktor [2]. Penurunan kualitas air tanah dapat terjadi karena masuknya logam berat ke dalam sistem akuifer. Sebagai contoh, logam berat seperti halnya As, Cd, Cu, Cr, Co, Fe, Mn, Ni, Pb dan Zn dapat masuk dan mencemari air tanah [3][4][5].

Pemanfaatan air tanah yang telah tercemar logam berat dapat berdampak buruk pada kesehatan lingkungan melalui proses bioakumulasi [6][7]. Dampak buruk tersebut dapat terjadi karena sifat toksisitas logam berat yang dapat secara langsung dan tidak langsung mengganggu kesehatan. Gangguan kesehatan pada sistem saraf, gangguan fungsi organ dalam, gangguan sistem kekebalan tubuh, serta unsur pemicu kanker merupakan dampak buruk dari paparan logam berat terhadap tubuh manusia [8].

Daerah aliran sungai (DAS) Galeh dan Torong merupakan wilayah tangkapan air terbesar pada sisi barat Danau Rawa Pening. Danau Rawa Pening sendiri terletak pada cekungan yang dikelilingi Gunung Ungaran, Gunung Telomoyo dan Gunung Merbabu. Hasil kajian status mutu air Danau Rawa Pening menunjukkan bahwa kondisi air dananya sudah tercemar oleh logam berat. Hal ini diperkuat dengan hasil penelitian [9] yang menunjukkan tingginya konsentrasi logam Cu. Selain itu, logam berat seperti halnya As, Se, Cd, Pb, Cu, Mn juga telah mencemari perairan Danau Rawa Pening, sehingga tidak dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan air bersih dan air minum [10].

Sumber logam berat yang terdapat pada air danau dapat berasal dari aktivitas di sekitar danau yang masuk melalui sistem hidrologi, misalnya sistem daerah aliran sungai. Studi [11] menunjukkan bahwa distribusi mineral dan penggunaan lahan menjadi faktor utama pengontrol mekanisme transpor logam berat dari zona hulu ke hilir pada sistem DAS. Masuknya logam berat ke dalam sistem sungai dapat terjadi melalui berbagai proses, antara lain aliran permukaan, erosi tanah, dan aliran air tanah [12]. Pada proses aliran air permukaan dan erosi, logam berat yang terlarut dalam air sungai dapat terbawa dan berikatan dengan partikel halus terlarut dan di transpor oleh aliran air menuju zona hilir sungai [13]. Melalui mekanisme tersebut, Danau Rawa Pening, yang merupakan muara dari berbagai sungai di sekitarnya, menjadi tempat akumulasi logam berat. Hal ini tentunya menjadikan Rawa Pening sebagai lokasi yang berisiko tinggi terhadap pencemaran logam berat.

Lebih lanjut, hasil kajian logam berat pada penelitian sebelumnya berfokus pada air permukaan, sedangkan indikasi terkait mekanisme sumber pencemar dapat kita analisis menggunakan pendekatan karakteristik logam pada air tanahnya. Konsentrasi logam pada air tanah sangat di pengaruhi oleh kondisi mineral dan batuanya. Selain itu, aktivitas manusia juga dapat mempengaruhi keberadaan logam dalam air tanah melalui proses infiltrasi dan perkolasi. Karakteristik logam berat pada air tanah akan menjadi kunci apakah proses yang menyebabkan pencemaran ini berasal dari faktor alami atau dari faktor manusia [14].

Analisis kualitas air tanah merupakan bagian penting dari pengembangan strategi pengelolaan dan perlindungan secara optimal untuk menjamin keberlanjutan sumber daya air [15]. Meskipun berbagai kajian parameter logam berat pada air permukaan di Danau Rawa Pening sudah pernah dilakukan, namun demikian analisis parameter logam berat untuk air tanahnya masih sedikit sekali di lakukan. Penelitian ini penting karena air tanah masih menjadi sumber utama air bersih dan air minum di sekitar Danau Rawa Pening. Selain itu, keberadaan dan konsentrasi logam berat pada air tanah juga dapat menjadi indikator status pencemaran sistem sungai yang nantinya menjadi penyumbang utama akumulasi logam berat di Danau Rawa Pening. Oleh karena itu, dampak buruk logam berat terhadap kesehatan lingkungan, serta upaya remediasinya yang sulit, membuat upaya pencegahan dan deteksi dini lebih utama untuk dilakukan. sehingga, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis konsentrasi dan distribusi spasial logam berat Cu, Cd, Pb dan Fe yang terdapat dalam air tanah di Sub DAS Galeh-Torong, sebagai bagian penting dari upaya pemanfaatan air tanah yang aman dan berkelanjutan.

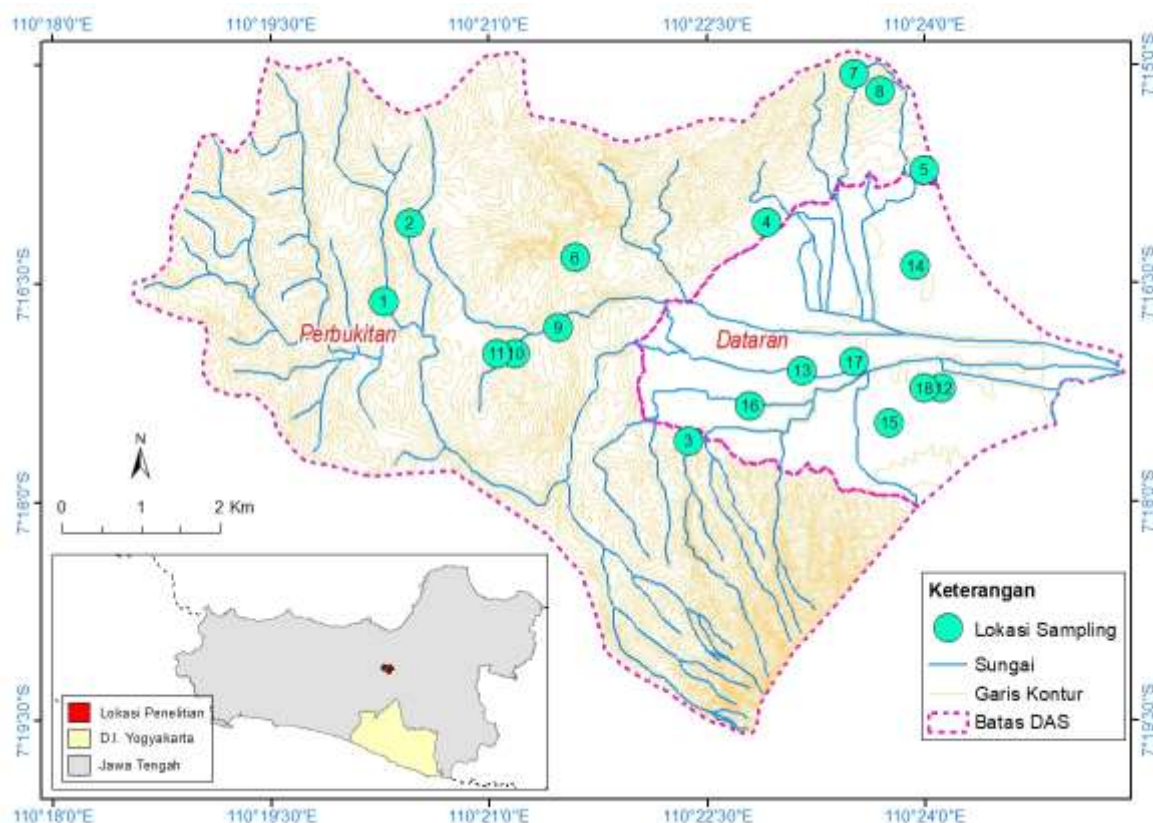
Metode

Sampling dan analisis konsentrasi

Lokasi penelitian dan lokasi sampling merupakan dua Sub-DAS terluas di sebelah barat Danau Rawa Pening, yaitu Sub-DAS Galeh dan Sub DAS Torong (**Gambar 1**). Secara topografi, kedua Sub-DAS ini dibagi menjadi dua zona utama, yaitu zona perbukitan dengan ciri kerapatan garis kontur yang tinggi dan zona dataran dengan ciri kerapatan garis kontur rendah. Zona perbukitan masih didominasi oleh vegetasi yang lebat sedangkan zona dataran didominasi oleh aktivitas pertanian dan permukiman. Sebanyak 18 sampel air tanah diambil untuk mengetahui konsentrasi logam berat Cd, Cu, Pb dan Fe menggunakan teknik purposive sampling berdasarkan pembagian zona topografi perbukitan dan dataran. Sebanyak 11 sampel air tanah di ambil pada topografi perbukitan, sedangkan 8 sampel sisanya diambil pada

topografi dataran. Proporsi jumlah sampel ini menyesuaikan cakupan topografi perbukitan yang lebih luas jika dibandingkan dengan topografi dataran. Sampel air tanah diambil dari sumur gali penduduk yang biasa digunakan untuk pemenuhan kebutuhan sehari-hari menggunakan acuan [16] SNI 6989 58 2008 tentang cara pengambilan sampel air tanah. Sampel air dimasukkan kedalam botol HDPE dan ditambah larutan asam hingga $\text{pH} < 2$ untuk menjaga kestabilan logam terlarut yang ada dalam air sampel. Sampel kemudian dimasukkan kedalam kotak pendingin dengan suhu 2-4 °C untuk selanjutnya dilakukan analisis kadar logam berat. Analisis konsentrasi logam berat dilakukan di Laboratorium Kualitas Air Jurusan Teknik Lingkungan Universtias Islam Indonesia. Pengukuran parameter fisik TSS (*total suspended solid*) menjadi tambahan data untuk pendukung analisis dilakukan di lokasi menggunakan TSS meter.

Analisis kuantitatif unsur-unsur logam dilakukan menggunakan prinsip kerja *Atomic Adsorption Spectroscopi* atau AAS. Prinsip kerja alat ini didasarkan pada penyerapan absorbansi radiasi oleh atom bebas pada fase gas. Metode pengujian logam mendasarkan pada SNI-06-6989-6: 2004 [17] untuk pengujian tembaga (Cu), SNI-06-6989-8: 2004 [18] pengujian timbal (Pb), SNI-06-6989-16: 2004 [19] pengujian kadmium (Cd) dan SNI-06-6989-4: 2004 [20] untuk pengujian besi (Fe). Uji sampel dilakukan sebanyak dua kali untuk meningkatkan akurasi hasil analisis kadar logam berat. Nilai kadar logam berat akhir yang digunakan adalah nilai rata-rata dari dua hasil pengujian sampel dengan selisih kadar yang kecil.



Gambar 1. Lokasi penelitian dan sampling air tanah

Analisis Spasial dan Potensi Dampak Kesehatan Lingkungan

Informasi spasial berupa data dasar spasial diambil dan diakses melalui website Ina-Geoportal pada skala 1:25.000. Analisis spasial dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak ArcGIS Pro Versi 3.2. Analisis distribusi spasial dilakukan dengan visualisasi nilai konsentrasi logam yang telah diklasifikasikan menjadi 2 kelas berdasarkan standar baku mutu setiap logam dan disajikan dengan sistem gradasi warna dari level berasosiasi rendah ke

tinggi. Selain itu, metode interpolasi menggunakan teknik IDW (*Inverse Distance Weighting*) juga dilakukan untuk mempermudah identifikasi pola sebaran konsentrasi logam berat di lokasi penelitian. IDW merupakan teknik interpolasi yang dipilih berdasarkan pertimbangan jumlah dan sebaran lokasi sampling, sehingga dengan mengasumsikan bahwa semakin dekat jarak suatu titik terhadap titik yang tidak diketahui nilainya menjadi semakin besar pengaruhnya dapat terpenuhi dalam tujuan penelitian ini. Analisis potensi dampak kesehatan lingkungan dilakukan dengan membandingkan konsentrasi pada setiap titik sampling dengan standar baku mutu (BM) mengacu pada Peraturan Menteri Kesehatan No. 2 Tahun 2023 [21]. Kadar maksimum yang diperbolehkan diambil pada bagian Parameter Wajib Air Minum untuk logam Cu sebesar 2 mg/L, Cd sebesar 0,003 mg/L, Pb sebesar 0,01 mg/L dan Fe sebesar 0,2 mg/L. Selain itu, Peraturan Pemerintah No. 82 Tahun 2001 [22] tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air Kategori Kelas I digunakan untuk TSS, yaitu sebesar 50 mg/L. Potensi dampak kronik dalam penelitian ini dibahas menggunakan analisis diskriptif berdasarkan hasil perbandingan dengan nilai baku mutu yang telah ditentukan.

Hasil dan Pembahasan

Karakteristik logam berat dalam air tanah disajikan pada **Tabel 1**. Parameter fisik kualitas air berupa TSS digunakan sebagai indikator proses yang mungkin mempengaruhi parameter logam berat pada setiap titik sampel. Nilai TSS berkisar antara 8,00-45,00 mg/L dengan persentase 100 % sampel di bawah baku mutu TSS sebesar 50 mg/L. Logam non esensial dalam penelitian ini adalah Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd), sedangkan Tembaga (Cu) dan Besi (Fe) merupakan logam esensial. Cu dan Fe merupakan logam berat esensial, artinya pada kadar tertentu memang dibutuhkan oleh makhluk hidup, sedangkan jika berlebihan dapat bersifat toksik. Berbeda dengan Cu dan Fe, Pb dan Cd merupakan logam berat non esensial, artinya dua logam tersebut sangat toksik bagi makhluk hidup. Konsentrasi logam berat Pb berkisar antara 0,0152-0,0395 mg/L dengan 55,56 % melebihi nilai baku mutu sebesar 0,01 mg/L. Konsentrasi logam Cd berkisar antara 0,0066-0,0085 mg/L dengan 100 % konsentrasinya melebihi baku mutu sebesar 0,003 mg/L. Berbeda dengan kedua logam non esensial Pb dan Cd, logam esensial Cu memiliki rentang konsentrasi antara 0,0983-0,3592 mg/L dengan 100% konsentrasinya dibawah baku mutu sebesar 2 mg/L. Besi sebagai logam esensial memiliki rentang konsentrasi antara 0,1387-2,5898 mg/L dengan 72,22 % konsentrasinya melebihi baku mutu sebesar 0,2 mg/L.

Tabel 1. Ringkasan statistik data hasil analisis konsentrasi logam berat

No	Parameter	Min.	Mak.	Rerata	Baku Mutu	% < BM	% = BM	% > BM
1	TSS	8,00	45,00	21,33	50*	100,00	0,00	0,00
2	Pb	0,0152	0,0395	0,0232	0,01**	0,00	44,44	55,56
3	Fe	0,1387	2,5898	0,5028	0,2**	5,56	22,22	72,22
4	Cd	0,0066	0,0085	0,0074	0,003**	0,00	0,00	100,00
5	Cu	0,0983	0,3592	0,1569	2**	100,00	0,00	0,00

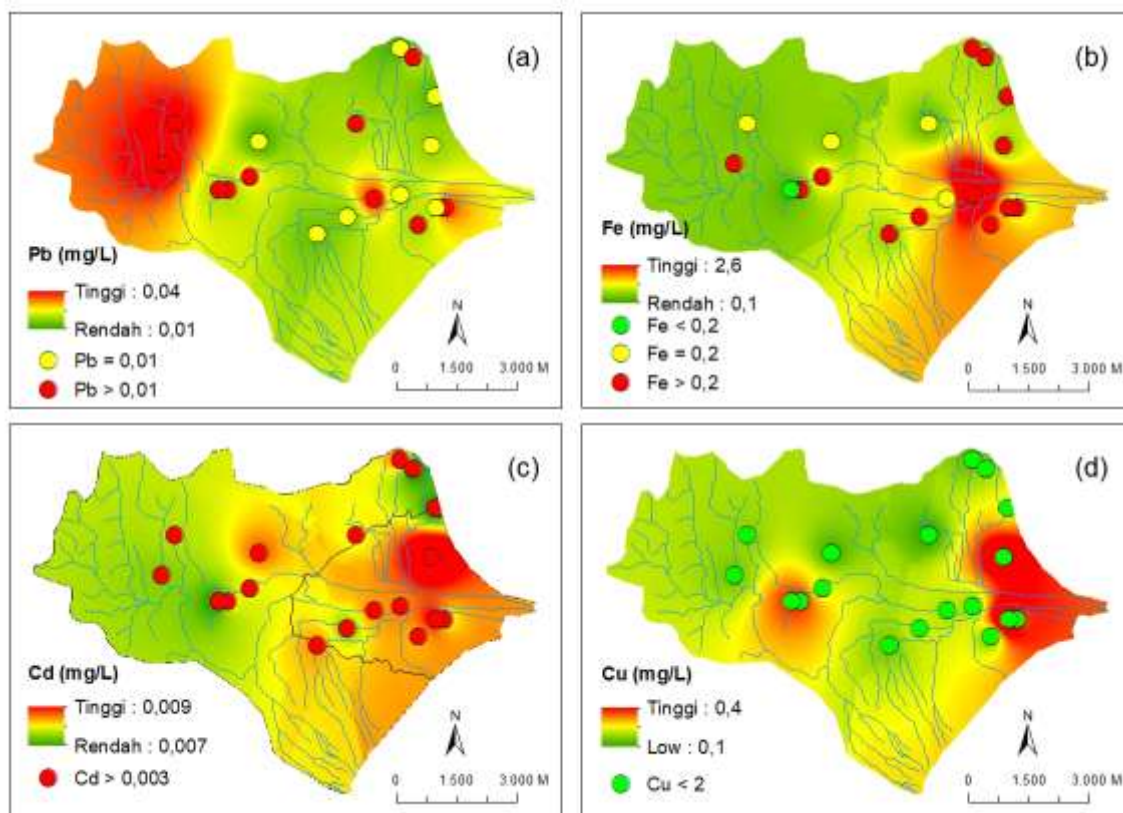
*Catatan tambahan: satuan semua parameter dan baku mutu dalam mg/L; * berdasarkan PP No. 82 Tahun 2001; ** berdasarkan Permenkes No. 2 Tahun 2023*

Hasil analisis logam berat di lokasi penelitian menunjukkan bahwa rerata konsentrasi secara berturut-turut adalah Cd < Pb < Cu < Fe. Meskipun Cd dan Pb memiliki rerata konsentrasi yang paling kecil, namun nilai konsentrasi semua lokasi sampel melebihi baku mutu untuk logam Cd dan separuh lebih lokasi sampel melebihi baku mutu untuk logam Pb. Hal ini perlu menjadi perhatian yang serius karena Cd dan Pb merupakan logam berat non esensial yang bersifat toksik dan dapat berdampak buruk bagi kesehatan lingkungan termasuk juga kesehatan manusia. Berbagai studi menunjukkan bahwa logam Cd dan Pb dapat

menyebabkan gangguan sistem saraf, fungsi organ dalam, sistem kekebalan tubuh, serta bersifat karsinogenik [8].

Sementara untuk logam Fe, lebih dari 70% sampel dapat dikategorikan tercemar logam besi. Pada saat survei di lokasi penelitian, kondisi air tanah di sekitar Rawa Pening berbau anyir, berwarna kuning dan membuat besi mudah berkarat. Hal tersebut merupakan salah satu indikasi bahwa kandungan besi dalam air tanah sangat tinggi dan dikonfirmasi dari hasil penelitian ini. Logam Cu yang dilaporkan pada penelitian sebelumnya [9] memiliki konsentrasi tinggi pada air permukaan danau ternyata justru kecil konsentrasinya pada semua sampel air tanah.

Pola distribusi spasial konsentrasi logam berat Pb, Cd, Cu dan Fe disajikan pada **Gambar 2a-d**. Selain itu, **Tabel 2** terkait dengan korelasi antar parameter juga digunakan dalam penelitian ini untuk membantu dalam menganalisis kemungkinan hubungan antar parameter yang menyebabkan pola spasial dapat terbentuk. **Gambar 2a** merupakan pola distribusi spasial untuk logam Pb, dimana secara spasial, pola sebaran dengan kategori Pb = BM dan Pb > BM sama-sama tersebar secara acak, sedangkan secara interpolasi bagian barat zona perbukitan memiliki konsentrasi paling tinggi. Jika kita lihat pada **Tabel 2**, Pb merupakan satu-satunya logam yang berkorelasi negatif dengan TSS. Hal ini dapat menjadi indikasi bahwa aktivitas permukaan kemungkinan tidak menjadi sumber logam Pb. Sehingga, faktor batuan dan mineral seperti PbS kemungkinan besar menjadi penyebab logam Pb dalam air tanah.



Gambar 2. Distribusi spasial konsentrasi logam berat

Gambar 2b merupakan pola distribusi spasial untuk logam Fe, dimana secara spasial, pola sebaran dengan kategori Fe < BM dan Fe = BM berada di zona perbukitan, sementara kategori Fe > BM tersebar secara acak, namun cenderung tinggi pada bagian utara zona perbukitan dan bagian timur pada zona dataran. Secara interpolasi bagian timur zona dataran memiliki konsentrasi paling tinggi. Jika kita melihat pada **Tabel 2**, Fe berkorelasi positif dengan TSS. Meskipun koefisien korelasinya kecil, namun hal ini dapat menjadi indikasi bahwa aktivitas

permukaan kemungkinan besar juga berkontribusi terhadap keberadaan logam Fe dalam air tanah. Tingginya Fe pada zona dataran dapat terjadi karena infiltrasi air permukaan, mengingat muka air tanah di dataran lebih dangkal jika dibandingkan dengan air tanah pada zona perbukitan. Selain itu, topografi datar membuat air menggenang, sehingga proses reduksi oksidasi unsur Fe dalam air menjadi lebih intensif.

Tabel 2. Korelasi Pearson TSS Dengan Logam Berat

	TSS	Pb	Fe	Cd	Cu
TSS	1				
Pb	-0,213	1			
Fe	0,056	-0,171	1		
Cd	0,194	-0,235	0,142	1	
Cu	0,492	-0,161	-0,073	0,441	1

Gambar 2c merupakan pola distribusi spasial untuk logam Cd, dimana secara spasial, pola sebaran dengan kategori Cd > BM terdapat pada semua titik sampel, sedangkan secara interpolasi bagian timur zona dataran memiliki konsentrasi yang paling tinggi. Jika kita lihat pada **Tabel 2**, Cd memiliki korelasi positif dengan TSS. Hal ini dapat menjadi indikasi bahwa aktivitas permukaan seperti halnya pertanian dan permukiman, kemungkinan besar juga menjadi sumber logam Pb dalam air tanah [23]. Tingginya kadar Cd pada semua sampel di **Tabel 1** juga menjadi indikasi kuat bahwa faktor batuan dan aktivitas manusia sama-sama memberikan kontribusi yang besar terhadap keberadaan logam Cd di lokasi penelitian. Tingginya kategori logam Cd pada zona perbukitan dapat terjadi karena faktor mineral batuan semisal CdS atau Cadmium Sulfida. Terlebih lagi, lokasi penelitian merupakan material vulkanik yang dimungkinkan memiliki kandungan mineral yang mengandung unsur logam berat Cd yang tinggi. Tingginya konsentrasi logam berat Cd bagian timur zona dataran juga menjadi indikasi kuat bahwa aktivitas manusia seperti halnya permukiman dan pertanian menjadi sumber utama logam Cd di zona dataran. Logam Cd juga dapat berasal dari pupuk yang digunakan dalam pertanian, hal ini karena air pupuk yang mengandung fosfat terbukti menjadi salah satu sumber unsur Cd dalam tanah dan air [24].

Gambar 2d merupakan pola distribusi spasial untuk logam Cu, dimana secara spasial, pola sebaran dengan kategori Cu < BM terdapat pada semua titik sampel, sedangkan secara interpolasi bagian timur zona dataran memiliki konsentrasi yang paling tinggi. Jika kita lihat pada **Tabel 2**, Cu memiliki korelasi positif yang kuat dengan TSS. Hal ini dapat menjadi indikasi bahwa aktivitas permukaan merupakan sumber logam Cu dalam air tanah. Aktivitas pertanian dan permukiman di zona dataran dapat berkontribusi terhadap keberadaan logam Cu dalam air tanah di lokasi penelitian.

Penggunaan air tanah untuk memenuhi kebutuhan domestik rumah tangga akan meningkatkan risiko zat pencemar masuk melalui air minum yang dikonsumsi sehari-hari. Konsentrasi logam berat yang ada dalam air minum dapat meningkatkan risiko penyakit kronis jangka panjang seperti halnya kanker karena logam berat bersifat karsinogenik [8]. Dalam kaitannya dengan dampak terhadap kesehatan manusia, tingginya konsentrasi logam Cd, Pb dan Fe di lokasi penelitian dapat berdampak buruk bagi kesehatan manusia [25]. Tingginya konsentrasi Cd, Pb dan Fe di zona perbukitan akan menjadi masalah serius, karena masyarakat di perbukitan cenderung memanfaatkan air tanah dan mata air sebagai sumber utama air bersih dan air minum. Disisi lain, dengan karakteristik muka air tanah yang dangkal dan material permukaan yang bersifat porus pada zona dataran di sebelah timur lokasi penelitian, tentunya akan mempercepat proses masuknya logam berat Pb, Cd, Cu dan Fe dari permukaan menuju ke air tanah baik dari limbah domestik, limbah pertanian, maupun limbah aktivitas pariwisata di sekitar Danau Rawa Pening. Aktivitas pertanian juga dilaporkan menjadi kemungkinan terbesar sumber utama logam Pb dan Cd di daerah pertanian [26].

Dalam upaya mengurangi dampak buruk kesehatan lingkungan yang mungkin ditimbulkan karena keberadaan logam berat pada lingkungan di sekitar Danau Rawa Pening, pencegahan dan pengelolaan sumber-sumber logam berat potensial menjadi keharusan. Berbagai strategi pencegahan dapat dilakukan, antara lain pengelolaan air limbah domestik, pariwisata, ataupun limbah industri menggunakan instalasi pengolahan air limbah, serta penggunaan pupuk organik atau pupuk kandang sebagai alternatif pengganti pupuk kimia. Monitoring dan pengujian kualitas air secara berkala juga menjadi prioritas yang dapat dilakukan oleh pemerintah. Tidak kalah pentingnya adalah sosialisasi dan peningkatan pengetahuan masyarakat tentang bahaya pencemaran logam berat pada sumber air yang selalu mereka gunakan. Analisis sumber dan faktor pencemaran yang masih bersifat kualitatif menjadi keterbatasan dalam penelitian ini, sehingga analisis yang bersifat kuantitatif dapat dilakukan pada penelitian selanjutnya. Sebagai contoh analisis ion terlarut dalam air tanah juga menjadi kajian penting, karena ion terlarut menjadi indikator kuantitatif karakteristik air tanah yang dapat menjadi dasar dalam mengidentifikasi faktor pencemaran secara lebih akurat.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data, penelitian ini menyimpulkan bahwa konsentrasi logam berat di DAS Galeh-Torong, bagian sisi timur Danau Rawa Pening, masuk dalam kategori tinggi dan melebihi baku mutu air minum untuk parameter logam berat non esensial Pb dan Cd, serta logam esensial Fe. Pola sebaran konsentrasi logam berat cenderung tinggi pada bagian timur zona dataran yang berasosiasi dengan aktivitas pertanian, permukiman dan pariwisata. Tingginya konsentrasi logam berbahaya di zona timur lokasi penelitian akan meningkatkan dampak kesehatan lingkungan yang signifikan karena tingginya faktor kepadatan penduduk di zona dataran ini. Informasi konsentrasi logam berat dan pola sebaran spasial ini dapat menjadi informasi penting dalam pengelolaan lingkungan dari aspek pencemaran kualitas air tanah. Selain itu, hasil penelitian ini juga dapat menjadi pertimbangan dalam perencanaan pengolahan air bersih dan perencanaan distribusi air bersih di lokasi Rawa Pening dan sekitarnya.

Referensi

- [1] M. Ebrahimi *et al.*, "Assessment of groundwater quantity and quality and saltwater intrusion in the Damghan basin, Iran". *Geochemistry*, vol. 76: no. 2, pp. 227-241, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.003>
- [2] N.T. Giao *et al.*, "Groundwater quality assessment for drinking purposes: a case study in the Mekong Delta, Vietnam". *Scientific Reports*, vol. 13: 4380, 2023, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31621-9>
- [3] M. Luo *et al.*, "Pollution assessment and sources of dissolved heavy metals in coastal water of a highly urbanized coastal area: The role of groundwater discharge". *Science of The Total Environment*. vol. 807: 3, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151070>
- [4] F. Deeba *et al.*, "Heavy Metals Distribution and Contamination in Groundwater of the South Eastern Coastal Area of Bangladesh". vol. 19: no. 5, pp. 267-282, 2021, <https://doi.org/10.2965/jwet.20-169>
- [5] B. Rochaddi *et al.*, "The Heavy Metal Contamination in Shallow Groundwater at Coastal Areas of Surabaya East Java Indonesia". *Jurnal Kelautan Tropis*, vol. 22: no. 1, Pp. 69-72, 2019, <https://doi.org/10.14710/jkt.v22i1.4464>
- [6] M.A. Noman *et al.*, "Bioaccumulation and potential human health risks of metals in commercially important fishes and shellfishes from Hangzhou Bay, China". *Scientific Report Nature portfolio*. 12:4634, 2022, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08471-y>
- [7] N.D. Nnaji *et al.*, "Bioaccumulation for heavy metal removal: a review". *SN Applied Sciences*, vol. 5: no. 125, 2023, <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05351-6>

- [8] S. Mitra *et al.*, "Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity". *Journal of King Saud University – Science*, vol. 34, pp. 1018-3647, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101865>
- [9] A.D. Rosahada *et al.*, "Biokonsentrasi Logam Berat Tembaga (Cu) dan Pola Konsumsi Ikan Mujair di Wilayah Danau Rawapening". *Jurnal Kesehatan Masyarakat*, vol. 6: no. 6, 2018, <http://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jkm>
- [10] A. Piranti *et al.*, "The possibility of using Lake Rawa Pening as a source of drinking water". *Journal of Water and Land Development*, no. 4, pp 111-119, 2019, <https://doi.org/10.2478/jwld-2019-0034>.
- [11] X. Hao *et al.*, "Accelerated export and transportation of heavy metals in watersheds under high geological backgrounds". *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 465, 133514, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133514>
- [12] L. Zhou *et al.*, "Modeling transport and fate of heavy metals at the watershed scale: State-of-the-art and future directions". *Science of The Total Environment*, vol. 878, 163087, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163087>
- [13] E. Rochyatun *et al.*, "Distribusi logam berat dalam air dan sedimen di Perairan Muara Sungai Cisadane". *Makara Journal of Science*, vol 10: no. 1, pp. 35-40, 2006
- [14] V. Akshitha *et al.*, "Evaluation of heavy metal contamination and human health risk using geo-statistical techniques in selected shallow hard rock aquifers of southwest India". *Groundwater for Sustainable Development*, vol 19: 100812, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100812>
- [15] S. Karthikeyan *et al.*, "Groundwater Contamination in Coastal Aquifers: Assessment and Management Chapter 2 Issues of coastal groundwater contamination, pp. 9-18., 2022, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824387-9.00019-0>
- [16] SNI 6989-58-2008, Air dan air limbah-Bagian 58: "Metode pengambilan contoh air tanah". Badan Standarisasi Nasional, 2008.
- [17] SNI-06-6989-6-(2004), "Metode Pengujian Tembaga (Cu)". Badan Standarisasi Nasional, 2004.
- [18] SNI-06-6989-8-(2004), "Metode Pengujian Timbal (Pb)". Badan Standarisasi Nasional, 2004.
- [19] SNI-06-6989-16-(2004), "Metode Pengujian Kadmium (Cd)". Badan Standarisasi Nasional, 2004.
- [20] SNI-06-6989-4-(2004), "Metode Pengujian Besi (Fe)". Badan Standarisasi Nasional, 2004
- [21] Kementerian Kesehatan, "Peraturan Menteri Kesehatan No. 2 Tahun 2023 Tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah No. 66 Tahun 2014 Tentang Kesehatan Lingkungan". 2023.
- [22] Pemerintah Republik Indonesia, "Peraturan Nomor 82 Tahun 2001 Tentang Pengelolaan Kualitas Air Dan Pengendalian Pencemaran Air". 2001.
- [23] S. Balakrishnan *et al.*, "Investigating the impact of long-term agricultural practices on selected peri-urban aquifers in tropical Southwest India". *Urban Climate*, vol. 47: 101356, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101356>
- [24] N.A. Suci *et al.*, "Cd content in phosphate fertilizer: Which potential risk for the environment and human health?". *Current Opinion in Environmental Science & Health*. vol. 30, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100392>
- [25] M. Ebrahimi *et al.*, "Effects of lead and cadmium on the immune system and cancer progression". *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, vol. 18, pp 335-343, 2020, <https://doi.org/10.1007/s40201-020-00455-2>
- [26] Z. Atafar *et al.*, "Effect of fertilizer application on soil heavy metal concentration". vol. 160, pp 83-89, 2010, <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0659-x>