

Analisis Konsentrasi, Distribusi, dan Potensi Sumber Logam Berat pada Air Permukaan dan Air Tanah di Pesisir Parangtritis Yogyakarta

Dhandhun Wacano^{1*}, Rizky Tomi Rezhandi¹, Abror Waskito Hadi¹, Lutfia Isna Ardhayanti¹, Puji Lestari¹, dan Nastiti Rachma Desfitiany²

¹Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, Indonesia; e-mail: dhandhunwacano@uii.ac.id

²Balai Geospasial Pesisir dan Gumuk Pasir (BGP GP), Badan Informasi Geospasial, Depok, Parangtritis, Kretek, Bantul, Yogyakarta, Indonesia

ABSTRAK

Air tanah merupakan sumber utama air bersih di seluruh pesisir dunia termasuk Pesisir Parangtritis di Yogyakarta. Meskipun kuantitas air tanah di Parangtritis masih aman, permasalahan kualitas air tanah karena pencemaran logam berat menjadi isu penting yang belum dikaji. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis konsentrasi, distribusi, dan potensi sumber logam berat di Parangtritis. Sebanyak 34 sampel dengan masing-masing 17 sampel pada air permukaan dan air tanah dianalisis menggunakan Spektrofotometri Serapan Atom untuk menentukan konsentrasi logam Pb, Cd, Cr, dan Cu. Analisis distribusi spasial menggunakan perangkat lunak ArcGIS Pro Versi 3.2 dilakukan untuk mengidentifikasi keterkaitan pola sebaran konsentrasi logam pada air permukaan dan air tanah pada berbagai penggunaan lahan. Wawancara terhadap 34 responden juga dilakukan untuk identifikasi awal dampak terhadap kesehatan lingkungan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa logam Pb dan Cd secara signifikan melebihi baku mutu air minum Indonesia pada hampir semua sampel, sedangkan Cr dan Cu menunjukkan konsentrasi dibawah baku mutu. Analisis pola sebaran mengindikasikan penggunaan lahan pertanian pada bagian utara-tengah berasosiasi dengan tingginya konsentrasi Pb dan Cd, sehingga aktivitas pertanian menjadi salah satu sumber potensial pencemaran. Hasil wawancara juga menunjukkan bahwa pengetahuan masyarakat terhadap masalah pencemaran logam berat masih sangat rendah. Lebih lanjut, perlu adanya kajian terkait mekanisme pencemaran Pb dan Cd pada aktivitas pertanian maupun non pertanian di Parangtritis. Hal ini akan mempermudah kombinasi tindakan preventif dan remediasi seperti pengurangan pupuk kimia, fitoremediasi serta pengelolaan limbah sebagai upaya awal pengurangan risiko lingkungan dari pencemaran logam berat di Parangtritis maupun di lokasi lain dengan karakteristik kepesisiran yang sama.

Kata kunci: Air tanah, Logam berat, Cd, Pb, Parangtritis

ABSTRACT

Groundwater serves as the principal supply of potable water along the world's coastlines, including the Parangtritis coastal area in Yogyakarta. While the volume of groundwater in Parangtritis is enough, the quality of groundwater presents a significant concern that requires attention. Therefore, the aim of this research is to examine the concentration, distribution patterns, and potential sources of heavy metals in the Parangtritis area. A total of 34 samples, comprising 17 surface water samples and 17 groundwater samples, were tested using Atomic Absorption Spectrophotometry to ascertain the concentrations of Pb, Cd, Cr, and Cu metals. Spatial analysis using ArcGIS Pro Version 3.2 software was carried out to identify the relationship between distribution patterns of metal concentrations in surface water and groundwater in various land uses. Additionally, 34 respondents were interviewed in order to determine the initial influence on environmental health. The study's findings demonstrated that while Cr and Cu had amounts below the quality limits, Pb and Cd metals substantially surpassed the Indonesian drinking water quality standards. According to the analysis of distribution patterns, agricultural activities in the north-central region are linked to elevated Pb and Cd concentrations and have been suggested as a source of pollution. Furthermore, a study is required to investigate the mechanisms of Pb and Cd pollution in agricultural and non-agricultural activities in Parangtritis. This will enable the integration of preventive and remedial strategies as a preliminary initiative to mitigate environmental risks associated with heavy metal contamination in Parangtritis and other areas with similar coastal characteristics.

Keywords: Groundwater, Heavy metals, Cd, Pb, Parangtritis

Citation: Wacano, D., Rezhandi, R. T., Hadi, A. W., Ardhayanti, L. I., Lestari, P., Desfitiany, N. R. (2025). Analisis Konsentrasi, Distribusi, dan Potensi Sumber Logam Berat pada Air Permukaan dan Air Tanah di Pesisir Parangtritis Yogyakarta. Jurnal Ilmu Lingkungan, 23(6), 1592-1601, doi:10.14710/jil.23.6.1592-1601

1. PENDAHULUAN

Air tanah merupakan salah satu sumber utama air bersih yang dimanfaatkan jutaan manusia di seluruh wilayah pesisir secara global (Costall et al., 2020). Faktor kuantitas dan kualitas air tanah menjadi kunci penting yang selalu dikaji untuk mengetahui tingkat keberlanjutan penggunaannya (Ebrahimi et al., 2016). Sayangnya, saat ini kuantitas dan kualitas air tanah di seluruh dunia mengalami penurunan baik karena faktor alami maupun aktivitas manusia (Giao, et al., 2023). Intrusi air laut merupakan contoh masalah umum wilayah kepesisiran yang melibatkan faktor kuantitas maupun kualitas. Aktivitas pengambilan air tanah secara berlebihan dapat memicu masuknya air laut ke dalam sistem akuifer pesisir dan menurunkan kualitas air tanahnya (Ayari et al., 2023). Berdasarkan fakta tersebut, kuantitas air tanah yang berlimpah akan berubah statusnya menjadi langka ketika tidak di dukung dengan kualitas yang baik.

Kelangkaan air bersih karena faktor kualitas juga dapat terjadi akibat masuknya logam berat ke dalam sistem akuifer di wilayah pesisir. Logam berat yang berasal dari faktor geogenik dan antropogenik seperti halnya As, Cd, Cu, Cr, Co, Fe, Mn, Ni, Pb dan Zn dapat masuk ke dalam air tanah dan mencemarnya (Luo et al., 2022; Deeba, et al., 2021; Rochaddi et al., 2019). Melalui proses bioakumulasi, pemanfaatan air tanah yang terkontaminasi logam berat tersebut dapat berdampak pada kesehatan lingkungan (Noman et al., 2022; Nnaji et al., 2023). Berbagai macam gangguan kesehatan karena toksisitas logam berat pada sistem saraf, kekebalan tubuh, organ hati dan jantung, pembuluh darah, kulit, fertilitas, fungsi ginjal, kanker, dan genetik dapat terjadi karena paparan logam berat terhadap tubuh manusia (Mitra et al., 2022).

Parangtritis merupakan salah satu wilayah pesisir di Yogyakarta yang mendapat banyak perhatian para akademisi melalui berbagai kajian terkait dengan kuantitas dan kualitas air tanahnya. Hal ini wajar karena pantai Parangtritis memiliki nilai strategis yang sangat tinggi sebagai salah satu ikon utama pariwisata di Daerah Istimewa Yogyakarta. Nilai strategis ini mencakup aspek ekonomi, sosial-budaya, letak geografis serta kekayaan ekologis yang menjadikannya destinasi wajib bagi wisatawan domestik maupun mancanegara.

Pada aspek kuantitas, volume cadangan air tanah di Pesisir Parangtritis saat ini masih aman untuk memenuhi berbagai kebutuhan dan aktivitas masyarakat di sana (Isa et al. 2022). Isu permasalahan intrusi air laut pernah muncul karena pengambilan air tanah yang berlebihan, akan tetapi, Wilopo et al., (2021) telah menganalisis kondisi fisik dan kimia air tanah terhadap parameter tinggi muka air tanah, suhu, pH, DHL, TDS, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} dan menyimpulkan bahwa wilayah Pesisir Parangtritis belum pernah mengalami proses intrusi.

Pada aspek kualitas fisik dan kimia yang meliputi DHL, pH, warna, rasa, bau, kekeruhan, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , dan CO_3^{2-} , Murtianto et al., (2017)

menyebutkan bahwa secara umum kualitas air tanah di Pesisir Parangtritis masih dalam keadaan baik untuk keperluan air bersih dan air minum bagi masyarakat. Namun, Antika et al., (2024) telah menganalisis parameter fisik, kimia dan biologi seperti bau, warna, NO_3^- , NO_2^- , dan *E. coli* dengan hasil menunjukkan bahwa kualitas fisik yang bagus tidak selalu memiliki kualitas kimia dan biologi yang sama bagusnya, sehingga kualitas air tanah antara satu lokasi dengan lokasi yang lain dapat di klasifikasikan menggunakan pendekatan faktor pembatas parameter tertentu.

Kondisi air tanah di Pesisir Parangtritis saat ini berpotensi menimbulkan tantangan pengelolaan terutama pada aspek kualitas air tanahnya. Meningkatnya aktivitas masyarakat pada sektor pariwisata, pertanian, perikanan dan peternakan di Pesisir Parangtritis (Antika et al., 2024), yang juga sepenuhnya masih memanfaatkan air tanah sebagai sumber air utama (Wilopo et al., 2021), dapat mempercepat penurunan kualitas lingkungan dan memperparah dampak negatif pada kesehatan lingkungan.

Analisis awal kondisi kuantitas dan kualitas merupakan bagian dari pengembangan strategi pengelolaan dan perlindungan secara optimal untuk menjamin keberlanjutan sumber daya air tanah di wilayah pesisir (Karthikeyan et al., 2022). Meskipun berbagai kajian parameter aspek kuantitas dan kualitas sudah pernah dilakukan, namun demikian analisis parameter logam berat masih minim dan belum pernah di lakukan di Pesisir Parangtritis. Sehingga kajian ini merupakan pionir dan akan melengkapi celah penelitian yang selama ini belum di bahas dalam penelitian sebelumnya terkait keberadaan logam berat di pesisir Parangtritis. Berbagai pendekatan yang dilakukan dalam penelitian ini termasuk analisis konsentrasi, sebaran spasial dan sumber potensial merupakan informasi awal yang sangat penting dalam hal manajemen sumber daya air di wilayah pesisir.

Dampak logam berat yang signifikan terhadap kesehatan manusia, serta upaya remediasinya yang juga sulit untuk dilakukan membuat upaya pencegahan dan deteksi dini lebih utama untuk dilakukan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis konsentrasi, distribusi spasial dan potensi sumber logam berat yang terdapat dalam air tanah di wilayah Pesisir Parangtritis, sebagai bagian penting dari pemanfaatan air tanah yang aman dan berkelanjutan. Masing-masing dua logam berat esensial Cu dan Cr serta non esensial Pb dan Cd dikaji dalam penelitian ini.

2. METODE PENELITIAN

Secara garis besar, penelitian ini dibagi menjadi dua tahapan utama, yaitu kerja lapangan dan analisis laboratorium. Kerja lapangan dilakukan dengan mengumpulkan sampel air permukaan (kode sampel P), air tanah (kode sampel T) dan wawancara

terhadap responden (kode sampel Q). Kegiatan laboratorium dilakukan untuk menganalisis kadar logam Pb, Cu, Cr, dan Cd. Semua kegiatan di lapangan dan analisis laboratorium dilakukan di musim kemarau pada bulan Juli Tahun 2019.

2.1. Diskripsi Lokasi Penelitian dan Sampling

Lokasi penelitian berada di Desa Parangtritis, Kabupaten Bantul Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta sebagaimana tersaji pada Gambar 1. Dari pengamatan selama kegiatan lapangan, lokasi penelitian secara umum memiliki bentang morfologi perbukitan di sebelah utara, gumuk pasir di bagian tengah, gisik pantai di sebelah selatan, dan dataran alluvial di sebelah barat. Pasir dari endapan vulkanik dan perbukitan karbonat mendominasi kondisi material permukaan lokasi penelitian. Kondisi morfologi dan material permukaan ini sangat berpengaruh terhadap ketersediaan air tanah dangkal di lokasi penelitian. Imbuhan akuifer lokal juga sangat tergantung dari keberadaan kompleks gumuk pasir di sebelah Tengah-Selatan dan Sungai Opak di sebelah Barat Pesisir Parangtritis.

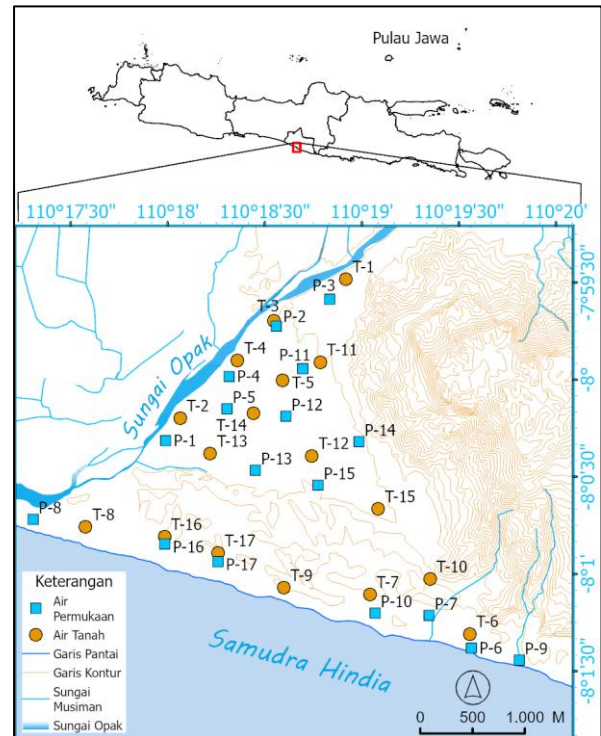
Pengambilan sampel air dilakukan secara bersamaan antara lokasi sampel air permukaan dan sampel air tanah dengan distribusi pengambilan sampel sesuai dengan Gambar 1. Sebanyak total 34 sampel dengan rincian 17 sampel air permukaan dan 17 air tanah diambil untuk mengetahui konsentrasi logam berat Pb, Cd, Cr dan Cu. Sampel air permukaan diambil dari lokasi sungai, genangan di area persawahan, serta parit-parit kecil yang berada di sekitar permukiman penduduk. Sedangkan sampel air tanah diambil dari sumur gali penduduk dan sumur pantek yang ada di area persawahan dan tambak.

Sumur pantek merupakan sumur pompa dengan ukuran diameter pipa relatif kecil 2–4-inch dengan kedalaman 3-5 meter. Sampel air dimasukkan kedalam botol HDPE dan ditambah larutan asam hingga pH < 1 untuk menjaga kestabilan logam terlarut yang ada dalam sampel air. Sampel kemudian dimasukkan kedalam kotak pendingin dengan suhu kurang lebih 4 °C dan dikirim ke laboratorium untuk analisis kadar logam berat. Analisis konsentrasi dilakukan di Laboratorium Kualitas Air Jurusan Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia. Pengukuran parameter fisik yang sangat dinamis seperti halnya suhu dan pH dilakukan di lapangan dengan alat termometer dan pH meter.

2.2. Analisis Konsentrasi Logam Berat

Analisis kuantitatif unsur-unsur logam dan metalloid dapat dilakukan menggunakan prinsip kerja AAS (*Atomic Adsorption Spectroscopy*) atau disebut juga SSA (Spektrofotometri Serapan Atom). Prinsip kerja alat ini didasarkan pada penyerapan absorbansi radiasi oleh atom bebas pada fase gas. Metode pengujian logam berdasarkan pada SNI-06-6989-6: 2004 untuk pengujian tembaga (Cu) SSA nyala, SNI-06-6989-8: 2004 pengujian timbal (Pb) SSA nyala, SNI-06-6989-16: 2004 pengujian kadmium (Cd) SSA nyala dan SNI-06-6989-17: 2004 pengujian kromium (Cr) SSA nyala. Uji sampel dilakukan sebanyak dua kali (*duplo*) 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.

nyala dan SNI-06-6989-17: 2004 pengujian kromium (Cr) SSA nyala. Uji sampel dilakukan sebanyak dua kali (*duplo*) 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 Permukaan dan Air Tanah

2.3. Analisis Spasial dan Potensi Sumber Logam

Data dasar spasial diambil melalui website Ina-Geoportal pada skala 1:25.000. Analisis spasial dilakukan untuk mengidentifikasi sebaran konsentrasi logam berat di lokasi penelitian. Analisis spasial dilakukan dengan visualisasi nilai konsentrasi logam yang telah diklasifikasikan menjadi 3 kelas berdasarkan standar baku mutu setiap logam dan disajikan dengan sistem gradasi warna dari level berasosiasi rendah ke tinggi. Penyajian sebaran konsentrasi ini merupakan teknik yang digunakan untuk mengidentifikasi lokasi yang memiliki konsentrasi signifikan secara korelasi spasial sehingga dapat diidentifikasi pola dan keterkaitannya. Analisis spasial dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak ArcGIS Pro Versi 3.2. Hasil identifikasi pola konsentrasi yang signifikan kemudian digunakan sebagai pendukung analisis potensi sumber logam berat.

Analisis sumber kontaminan adalah kunci awal dari berbagai teknik lanjutan seperti hal nya mitigasi dan remediasi. Pencemaran air tanah sebagai sumber air bersih dapat menyebabkan terganggunya ekosistem yang menghasilkan keamanan pangan dan risiko kesehatan manusia. Analisis sumber potensial logam berat dilakukan dengan mengkombinasikan beberapa teknik antara lain scatter plot sebagai

gambaran umum karakteristik logam berat, analisis distribusi spasial dan observasi lapangan pada aspek penggunaan lahan lokasi sampling.

Lebih lanjut, hasil dari penelitian ini juga didukung oleh kegiatan wawancara terhadap 34 responden. Teknik wawancara dilakukan dengan pembagian kuesioner untuk memperluas analisis dampak dengan mengetahui perspektif masyarakat terhadap sumber daya air tanah yang mereka manfaatkan. Selain itu, penggalan informasi dari masyarakat ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi kemungkinan potensi dampak penggunaan air tanah sebagai sumber air bersih dan air minum di lokasi penelitian. Hal ini penting dilakukan karena pemanfaatan air tanah untuk keperluan domestik baik secara langsung maupun tidak langsung dapat mempengaruhi kesehatan lingkungan masyarakat di lokasi penelitian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Konsentrasi Logam Berat

Karakteristik air tanah dan air permukaan dalam hal ini meliputi parameter fisik dan parameter kimia. Karakteristik air permukaan dan air tanah dapat memberikan gambaran tentang kualitas air secara umum di lokasi penelitian. Baku mutu air dalam penelitian ini dibandingkan dengan Peraturan Menteri Kesehatan terbaru No. 2 Tahun 2023 tentang Kesehatan Lingkungan yang menggantikan peraturan sebelumnya No. 32 Tahun 2017 tentang Higiene Sanitasi. Parameter fisik kualitas air permukaan dan air tanah meliputi pH dan suhu, sedangkan parameter kimia berupa logam Timbal (Pb), Tembaga (Cu), Kromium (Cr) dan Kadmium (Cd). Cu dan Cr merupakan logam berat esensial, artinya pada kadar tertentu memang dibutuhkan oleh makhluk hidup, sedangkan jika berlebihan dapat bersifat toksik. Berbeda dengan Cu dan Cr, Pb dan Cd merupakan logam berat non esensial, artinya dua logam tersebut sangat toksik bagi makhluk hidup.

Baku mutu suhu adalah kondisi udara ambien ± 3 °C, sedangkan baku mutu pH berkisar antara 6,5 – 8,5. Parameter pH air permukaan dan air tanah tidak terdapat perbedaan signifikan dan cenderung memiliki karakteristik yang sama di rentang rerata 6,65 untuk air permukaan dan 6,57 untuk air tanah. pH tersebut termasuk dalam pH netral namun cenderung condong ke pH asam. Suhu air permukaan lebih tinggi dengan rerata 32,82 °C jika dibandingkan dengan suhu air tanah dengan rerata 30,44 °C. Hal ini sangat wajar dikarenakan tingginya suhu pada air permukaan sangat dipengaruhi oleh penyinaran matahari secara langsung, sedangkan suhu di dalam air tanah relatif lebih rendah dan cenderung stabil.

Baku mutu logam Cu adalah 2 mg/L, sedangkan baku mutu untuk logam Cr yaitu 0,05 mg/L. Kadar rerata logam Cu dan Cr pada air permukaan berturut-turut adalah sebesar 0,151 mg/L dan 0,011 mg/L dapat dilihat pada Tabel 1. Sebagai logam essential, kadar logam Cu dan Pb dalam air permukaan di lokasi penelitian tidak berbahaya terhadap kesehatan

lingkungan karena konsentrasi semua sampel di bawah baku mutu.

Tabel 1. Konsentrasi Logam Berat Dalam Air Permukaan

Parameter	Min.	Maks.	Rerata	StD	BM
Suhu (°C)	30,00	38,00	32,82	1,98	Udara ± 3
pH	5,00	8,00	6,65	0,84	6,5 – 8,5
Pb (mg/L)	0,016	0,086	0,036	0,020	0,01
Cu (mg/L)	0,001	1,075	0,151	0,306	2
Cr (mg/L)	0,002	0,020	0,011	0,009	0,05
Cd (mg/L)	0,001	0,090	0,016	0,022	0,003

Sumber: analisis sampel air permukaan tahun 2019; StD = standar deviasi; BM = baku mutu PMK No. 2 Tahun 2023

Tabel 2. Konsentrasi Logam Berat Dalam Air Tanah

Parameter	Min.	Maks.	Rerata	StD	BM
T (°C)	28,00	34,00	30,44	1,73	Udara ± 3
pH	6,00	8,00	6,57	0,58	6,5 – 8,5
Pb (mg/L)	0,023	0,053	0,030	0,007	0,01
Cu (mg/L)	0,007	1,686	0,234	0,489	2
Cr (mg/L)	0,001	0,001	0,001	0,000	0,05
Cd (mg/L)	0,002	0,011	0,006	0,002	0,003

Sumber: analisis sampel air permukaan tahun 2019; StD = standar deviasi; BM = baku mutu PMK No. 2 Tahun 2023

Konsentrasi rerata logam Cu dan Cr pada air tanah berturut-turut adalah sebesar 0,234 mg/L dan 0,001 mg/L dapat dilihat pada Tabel 2. Baik logam Cu dan logam Cr dalam air tanah tidak ada yang melebihi baku mutu. Namun, nilai rerata konsentrasi logam Cu dan Cr dalam air tanah lebih tinggi jika dibandingkan dengan air permukaan mengindikasikan mekanisme peningkatan konsentrasi dalam air tanah dipengaruhi oleh faktor lainya seperti pengayaan (*enrichment*) atau akumulasi dari input sumber permukaan (Alkan et al., 2015).

Logam non esensial Pb memiliki nilai baku mutu 0,01 mg/L sedangkan untuk logam non esensial Cd memiliki baku mutu 0,003 mg/L. Kadar rerata logam Pb dan Cd air permukaan berturut-turut adalah 0,036 mg/L dan 0,016 mg/L. Dalam hal ini, logam Pb menjadi hal yang perlu perhatian serius karena reratanya melebihi baku mutu Pb 0,01 mg/L. Hasil yang serupa juga ditemukan pada logam Cd air permukaan yang melebihi rerata baku mutu Cd 0,003 mg/L.

Rerata konsentrasi logam Pb dan Cd dalam air tanah berturut-turut adalah 0,030 mg/L dan 0,006 mg/L. Meskipun nilai rerata konsentrasi kedua logam non esensial ini lebih kecil jika dibandingkan dengan rerata pada air permukaan, namun nilai rerata konsentrasinya tetap melebihi baku mutu logam Pb dan Cd menurut Permenkes No. 2 Tahun 2023. Sehingga hasil analisis konsentrasi logam berat pada penelitian ini menunjukkan bahwa logam Pb dan Cd memiliki nilai konsentrasi yang melebihi baku mutu. Tingginya konsentrasi Pb dan Cd ini perlu menjadi perhatian karena sifatnya yang toksik dan dapat berdampak langsung terhadap kesehatan manusia (Ebrahimi, et al., 2020).

Hasil analisis konsentrasi logam berat di Parangtritis ini penting karena dapat menjadi baseline atau data dasar pencemaran di pesisir

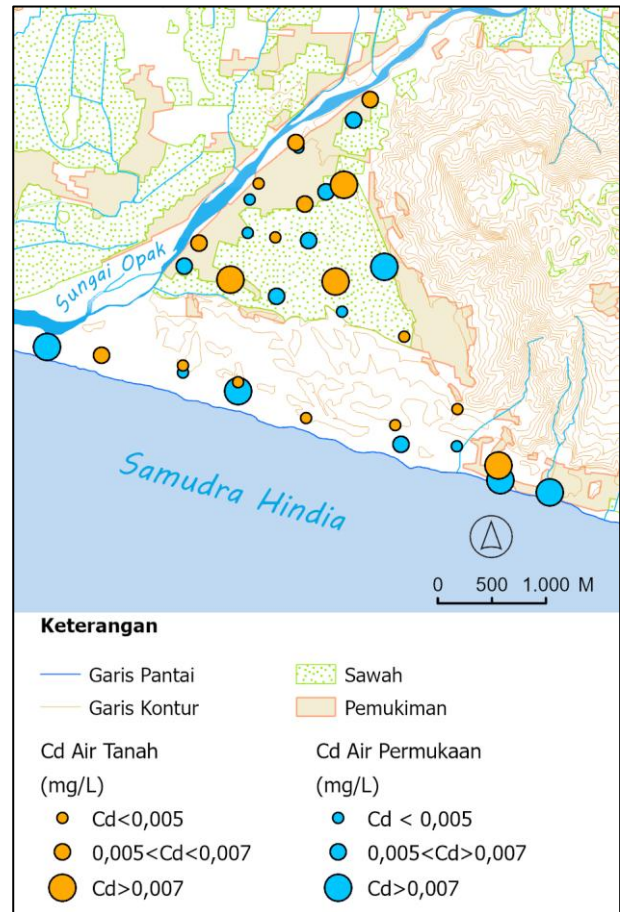
selatan Jawa. Lebih lanjut, informasi ini dapat memberikan kontribusi krusial bagi pengelolaan lingkungan dan kesehatan masyarakat kawasan pesisir yang notabene identik dengan aktivitas perikanan, pariwisata serta potensi tambang dan industri.

3.2. Distribusi Spasial Logam Berat

Analisis distribusi spasial dalam penelitian ini menunjukkan pola sebaran dari hasil analisis konsentrasi logam berat untuk logam Pb, Cd dan Cu pada air permukaan dan juga air tanah. Logam Cr tidak termasuk dalam analisis ini karena nilai konsentrasinya yang hampir semuanya berkisar pada nilai $\text{Cr} \leq 0,001 \text{ mg/L}$. Secara spasial, keseluruhan sebaran konsentrasi logam Cd dapat dilihat pada Gambar 2. Nilai konsentrasi Cd $> 0,007 \text{ mg/L}$ pada air permukaan banyak terdapat pada bagian selatan lokasi penelitian yang berasosiasi dengan bentuklahan gisik dengan penggunaan lahan utama adalah tambak udang dan pariwisata.

Nilai konsentrasi Cd $> 0,007 \text{ mg/L}$ pada air tanah banyak terdapat pada bagian utara lokasi penelitian yang berasosiasi dengan dataran alluvial dengan penggunaan lahan utama adalah sawah. Bagian utara penelitian dengan penggunaan lahan sawah dan permukiman juga menunjukkan tingginya konsentrasi Cd pada rentang antara $0,005\text{-}0,007 \text{ mg/L}$ baik untuk air permukaan maupun air tanah. Kemungkinan konsentrasi Cd pada air permukaan dan air tanah yang sangat tinggi menjadi indikator kuat bahwa aktivitas pertanian seperti halnya pemupukan menjadi salah satu sumber logam Cd. Air pupuk yang mengandung fosfat terbukti menjadi salah satu sumber unsur Cd dalam tanah dan air (Suci et al., 2022).

Sebaran konsentrasi logam Pb dapat dilihat pada Gambar 3. Nilai konsentrasi Pb $> 0,035 \text{ mg/L}$ pada air permukaan banyak terdapat pada bagian selatan dengan aktivitas tambak udang dan ujung selatan lokasi penelitian yang berasosiasi dengan penggunaan lahan utama adalah pariwisata. Sedangkan nilai Pb $> 0,035 \text{ mg/L}$ pada air tanah terdapat di sebelah utara dengan penggunaan lahan sawah dan permukiman. Selain itu, bagian utara lokasi penelitian juga menunjukkan tingginya konsentrasi Pb dengan rentang nilai antara $0,025\text{-}0,035 \text{ mg/L}$ baik untuk air tanah maupun air permukaan. Aktivitas pertanian menjadi kemungkinan sumber utama logam Pb dan Cd (Atafar et al., 2010).

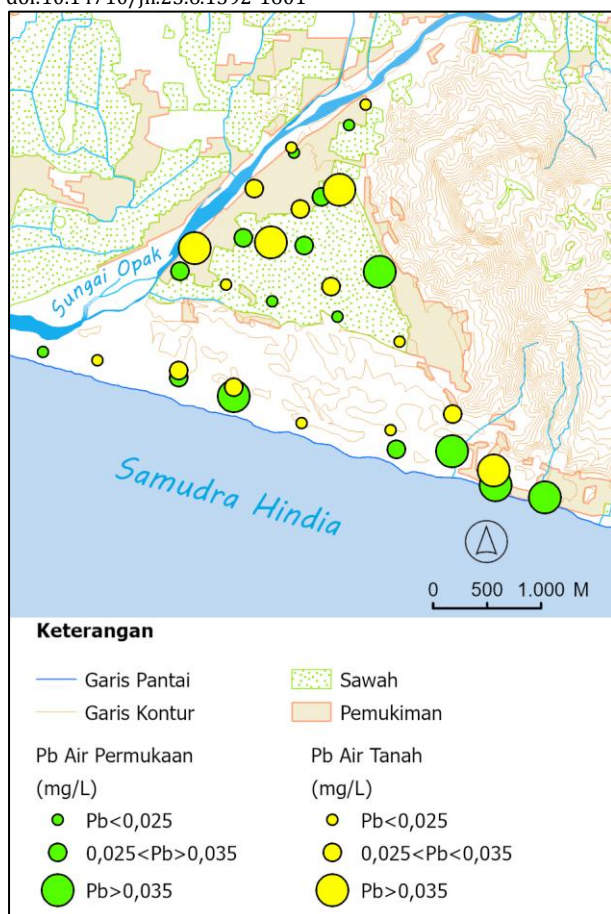


Gambar 2. Sebaran Konsentrasi Logam Cd

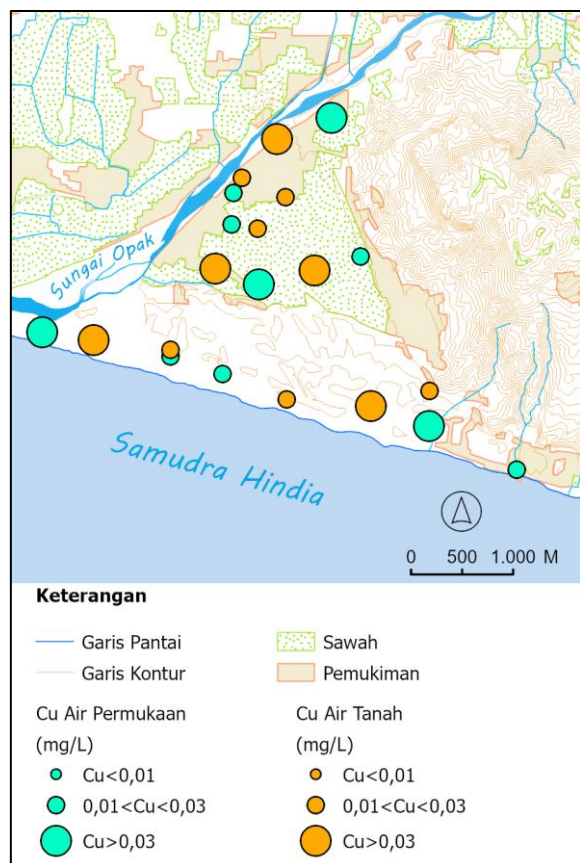
Cu merupakan logam esensial yang dapat bersifat toksik ketika melebihi baku mutu yang telah ditetapkan sebesar 2 mg/L . Secara spasial, keseluruhan sebaran konsentrasi logam Cu dapat dilihat pada Gambar 4. Nilai konsentrasi Cu yang melebihi baku mutu tidak terdapat pada lokasi penelitian baik untuk air permukaan maupun air tanah. Nilai konsentrasi Cu $> 0,03 \text{ mg/L}$ tersebar secara acak pada air permukaan. Pada air tanah, bagian utara lokasi penelitian menjadi lokasi dimana nilai konsentrasi Cu relatif tinggi jika dibandingkan dengan lokasi sampel yang lainnya.

3.3. Potensi Sumber Logam Berat

Kondisi konsentrasi air permukaan untuk parameter logam menjadi indikator penentu sumber utama logam yang terdapat dalam air tanah pada lokasi penelitian. Hal ini juga dapat diamati dari konsentrasi pada air permukaan yang menunjukkan pola yang sama dengan air tanah dalam hal tinggi rendahnya konsentrasi. Jika pola nya sama dan mengelompok antara air permukaan dan air tanah, dapat dipastikan bahwa sumber logam pada air tanah terkait erat dengan air permukaan.

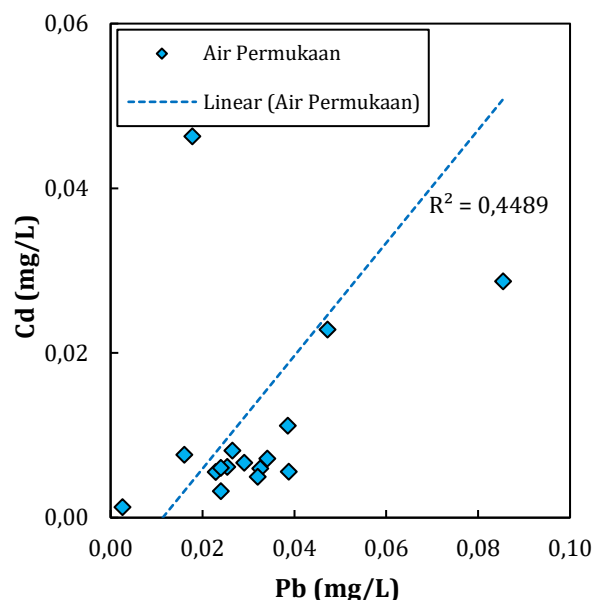


Gambar 3. Sebaran Konsentrasi Logam Pb



Gambar 4. Sebaran Konsentrasi Logam Cu

Analisis kaitan dan potensi sumber logam dilakukan khusus pada logam Cd dan Pb. Hal ini karena dua logam ini sebagai logam non esensial dengan hasil analisis konsentrasi yang sangat berbahaya di lokasi penelitian. Diagram pencar (*scatter plot*) digunakan dalam penelitian ini sebagai tahap awal dalam mengidentifikasi kemungkinan sumber pencemar logam berat air tanah dari aktivitas di permukaan. Gambar 5 menunjukkan hubungan antara konsentrasi logam Pb dan Cd pada air permukaan, sedangkan untuk air tanah ditunjukkan pada Gambar 6. Hasil plot menunjukkan bahwa nilai koefisien $R^2 = 0,4489$ pada air permukaan sama positifnya dengan koefisien pada air tanah $R^2 = 0,4038$. Hasil ini menunjukkan indikasi awal bahwa Pb dan Cd dalam air permukaan dan air tanah memiliki hubungan positif dan mempunyai kemungkinan berasal dari sumber dan mekanisme yang sama.

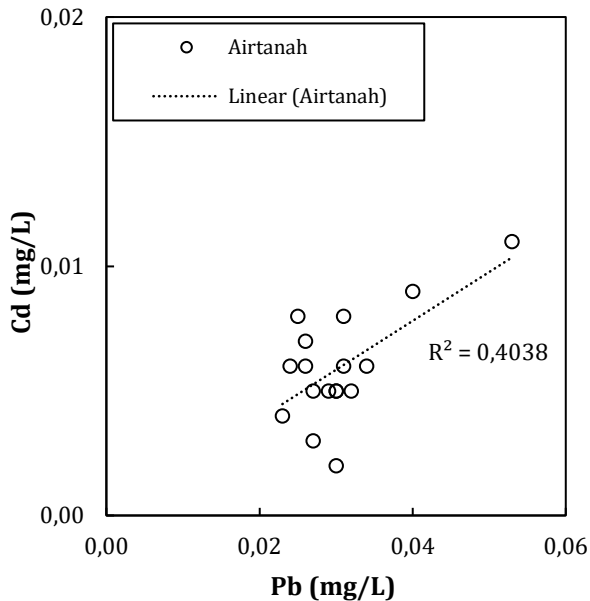


Gambar 5. Diagram Pencar Logam Pb dan Cd Air Permukaan

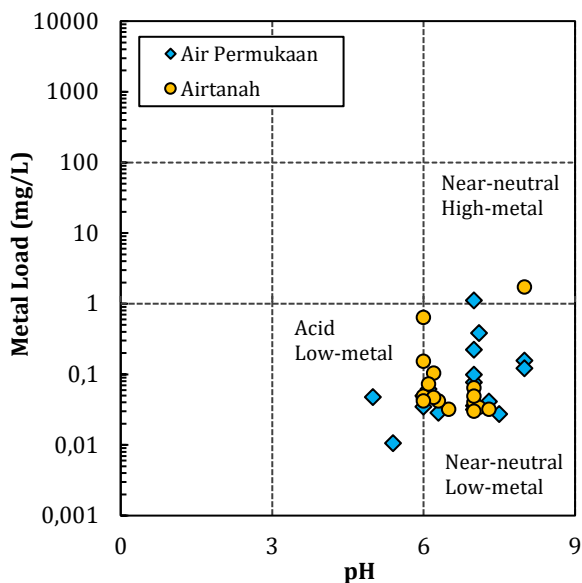
Pola antara konsentrasi logam Pb dan Cd pada air permukaan dan air tanah juga dapat diamati cenderung mengelompok pada rentang konsentrasi 0,02 – 0,06 mg/L. Meskipun beberapa sampel pada air tanah menunjukkan konsentrasi diluar pola mengelompok, namun rentang konsentrasi pada kelompok yang sama dapat menjadi indikasi sumber pencemar yang sama.

Pola yang sama juga dapat diamati pada Gambar 7 yang menunjukkan muatan logam menurut distribusi pH, dimana air permukaan lebih menyebar dari rentang kategori *acid low metal*, *near-neutral low metal* dan *near-neutral high-metal*. Meskipun ada satu sampel yang masuk dalam kategori *near-neutral high-metal*, mayoritas sampel air tanah berada pada kelompok muatan logam *near-neutral low-metal*. Hal ini menunjukkan bahwa sumber logam berat air tanah di lokasi penelitian cenderung seragam dan perlu

analisis lebih lanjut mengenai faktor yang berpotensi menjadi sumber pencemaran logam berat terutama Pb dan Cd yang didapati sangat tinggi dan berpotensi mencemari air tanah di lokasi penelitian.



Gambar 6. Diagram Pencar Logam Pb dan Cd Air Tanah



Gambar 7. Muatan Logam Menurut Distribusi pH

Lebih lanjut, Cd adalah salah satu unsur logam paling beracun dan paling mudah bergerak dan berpindah-pindah. Namun berbeda dengan Cd, Pb memiliki mobilitas yang rendah di tanah, sehingga sering terakumulasi pada tanah permukaan (Romero-Freire et al., 2015). Identifikasi sumber dan memahami mekanisme keberadaan logam Cd dalam air tanah merupakan kunci penting dalam mitigasi bahaya kesehatan lingkungan karena air tanah di Indonesia masih digunakan dalam memenuhi kebutuhan air minum oleh masyarakat Indonesia. Berbagai sumber logam Cd karena aktivitas manusia dalam air tanah dapat berasal dari aktivitas pupuk

fosfat, TPA, industri metal, lalu lintas transportasi, dan pertambangan (Kubier and Pichler, 2019; Yeboah et al., 2019). Selain faktor aktivitas manusia, logam Cd dalam air tanah juga dapat berasal dari sumber alami (*geogenic*) seperti halnya tanah, sedimen, mineral dan batuan (Kubier and Pichler, 2019).

Proses yang mengontrol Cd dalam air tanah dapat berupa pelarutan Cd-bearing mineral seperti sulfida, penyerapan dan pelepasan ion karena perubahan pH, transport adveksi, dan formasi kompleks Cd dalam larutan (Kubier and Pichler, 2019). Jika dibandingkan dengan unsur logam lainnya, Cd memiliki afinitas penyerapan yang rendah terhadap permukaan mineral. Pada daerah pertanian, ada dua kemungkinan utama yang menyebabkan konsentrasi Cd mengalami peningkatan dalam air tanah. Kemungkinan faktor yang pertama adalah penggunaan pupuk fosfat yang mengandung Cd, sedangkan kemungkinan yang kedua adalah faktor geogenik lepasnya unsur Cd ke dalam air tanah karena dipicu oleh pupuk pertanian yang mengandung fosfat (Suciu et al., 2022). Jika melihat lokasi sampling air tanah dan air permukaan yang berasosiasi dengan penggunaan lahan pertanian sawah, konsentrasi Pb dan Cd cenderung tinggi pada penggunaan lahan ini.

Setidaknya ada tiga kemungkinan sumber Cd dalam air tanah dilokasi penelitian, yaitu sumber alami dari pelepasan mineral batuan, aktivitas manusia yang memicu dan mempercepat pelepasan Cd secara alami, kemudian yang kedua murni karena sumber aktivitas manusia seperti halnya pupuk pertanian. Dalam konteks sumber pencemar adalah faktor alami, baik pelepasan dari mineral batuan dan aktivitas manusia yang memicu pelepasan tersebut, Cd dapat berasal dari penyerapan dan pengendapan mineral sulfida, karbonat dan fosfat (Kubier and Pichler, 2019). Berbeda dengan Cd, logam Pb meskipun juga terdapat pada unsur batuan dan mineral seperti contohnya timbal (II) sulfida (PbS), karena sifatnya yang tidak terlalu reaktif di kerak bumi, bioavailabilitas sumber utama pencemaran logam Pb pada air permukaan dan air tanah justru berasal dari aktivitas manusia daripada aktivitas geogenik atau proses alami (Joimel et al., 2018).

Berbeda dengan faktor alami, sumber Cd dan Pb karena aktivitas manusia dapat berasal dari penggunaan pupuk fosfat pada lahan pertanian (Yeboah et al., 2019; Suciu et al., 2022). Mekanisme terjadinya melalui pelepasan langsung unsur Cd dan Pb yang ada dalam pupuk fosfat maupun proses pelarutan sebagai contohnya fluoroapatit yang bertemu dengan tanah dalam kondisi asam (Lin et al., 2018; Yan et al., 2020). Dalam penelitian ini, penggunaan pupuk merupakan faktor yang memiliki kemungkinan besar pada keberadaan Cd dan Pb yang tinggi dalam air tanah.

Penggunaan pupuk secara intensif pada lahan pertanian di lokasi penelitian juga perlu mendapatkan perhatian yang serius. Meskipun lahan pertanian di lokasi penelitian mencakup lebih dari 60% dari total luas lokasi penelitian dan merupakan penggunaan

lahan dominan, namun demikian perlu identifikasi dan analisis lebih lanjut tentang berbagai kemungkinan jenis-jenis pupuk yang digunakan oleh para petani di lokasi penelitian. Analisis potensi sumber ini juga masih bersifat kualitatif, sehingga kajian kuantitatif yang lebih mendalam terkait dengan sumber kontaminasi Cd dan Pb dalam air tanah di Pesisir Parangtritis perlu dilakukan. Lebih lanjut, hasil dari sumber dan mekanisme pencemaran Cd dan Pb pada aspek pertanian dapat digunakan sebagai dasar teknik mitigasi dan remediasi pencemaran.

3.4. Implikasi Dampak pada Lingkungan

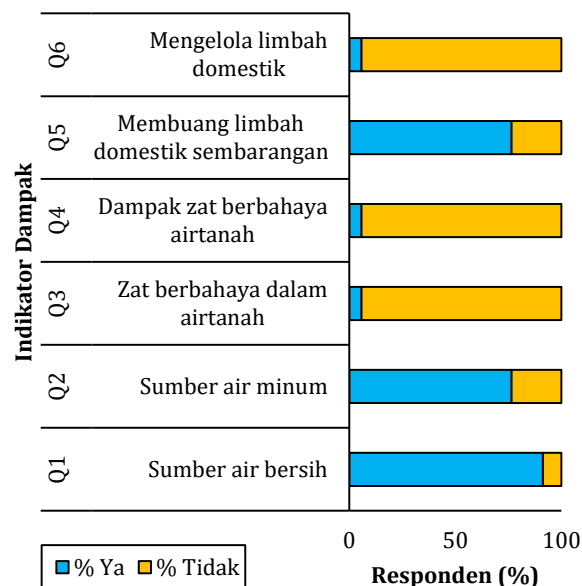
Pesisir merupakan wilayah transisi antara daratan dan lautan yang kaya akan sumberdaya alam. Wilayah pesisir juga menjadi kunci penting berbagai pengembangan aktivitas sosial dan ekonomi seperti halnya kegiatan wisata pesisir. Pesisir Pantai Parangtritis merupakan salah satu objek wisata di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta yang terkenal dengan keberadaan gumuk pasirnya. Kondisi pada saat pariwisata ini mulai berkembang setidaknya sejak tahun 1976 kondisinya masih sangat alami. Hingga pembangunan Jembatan Kretek 1 pada tahun 1989 menjadi titik awal peningkatan migrasi penduduk masuk dan bermukim ke Desa Parangtritis termasuk juga di sekitar Gumuk Pasir Parangtritis. Selain itu, pembangunan Jembatan Kretek 2 Tahun 2023 juga menjadi tonggak baru perkembangan wilayah di sekitar Pesisir Parangtritis.

Dampak pada lingkungan dalam penelitian ini diawali dengan identifikasi kriteria dampak melalui wawancara terhadap 34 responden di lokasi penelitian. Enam pertanyaan diajukan untuk mengetahui Q1: sumber air bersih penduduk, (Q2): sumber air minum penduduk, (Q3): pengetahuan masyarakat terhadap bahan pencemar berbahaya, (Q4): dampak zat berbahaya terhadap kesehatan, serta (Q5 dan Q5) terkait perilaku masyarakat terhadap limbah domestik yang mereka hasilkan.

Terkait dengan penggunaan air tanah, berturut-turut sebanyak 91,18 % dan 76,47 % responden di Pesisir Parangtritis masih memanfaatkan air tanah sebagai air bersih dan air minum. Hal ini menunjukkan bahwa ketergantungan masyarakat dalam menggunakan air tanah untuk mendukung aktivitas kehidupan mereka sehari-hari masih sangat tinggi. Tingginya tingkat penggunaan air tanah akan meningkatkan risiko zat pencemar masuk melalui air minum yang dikonsumsi sehari-hari. Kadar logam berat yang ada dalam air minum dapat meningkatkan risiko penyakit kronis jangka panjang seperti halnya kanker karena logam berat bersifat karsinogenik (Mitra et al., 2022).

Dalam hal dampak terhadap kesehatan manusia, pertanyaan Q3 dan Q4 digunakan untuk mengidentifikasi pengetahuan masyarakat terhadap zat berbahaya yang terdapat dalam sumber air bersih dan terutama air minum yang mereka konsumsi sehari-hari. Sebanyak 94,12 % responden tidak

mengetahui adanya zat berbahaya dalam air tanah yang mereka konsumsi, demikian juga dengan dampak zat berbahaya tersebut terhadap kesehatan manusia. Hal ini tentu saja memberikan gambaran nyata bahwa pengetahuan masyarakat terhadap masalah pencemaran dan kesehatan lingkungan masih sangat rendah. Sehingga peningkatan pengetahuan masyarakat terhadap pencemaran dan kesehatan lingkungan sangat perlu dilakukan di lokasi penelitian.



Gambar 8. Hasil Kuesioner Indikator Dampak Lingkungan

Masih rendahnya pengetahuan masyarakat tersebut sayangnya juga disertai dengan rendahnya kesadaran masyarakat terhadap limbah domestik yang mereka hasilkan. Hal ini ditunjukkan melalui pertanyaan Q5 dan Q6 tentang perilaku membuang limbah dan pengelolaan limbah oleh masyarakat. Sebanyak 76,47 % responden masih membuang limbah domestik mereka secara langsung di atas permukaan tanah di sekitar rumah mereka. Selain itu sebanyak 94,12 % responden juga tidak melakukan pengelolaan terhadap limbah yang mereka hasilkan. Dengan karakteristik muka air tanah yang dangkal dan material permukaan yang bersifat porus tentunya akan mempercepat masuknya zat pencemar dari permukaan menuju ke air tanah baik dari limbah domestik, limbah pertanian, maupun limbah aktivitas pariwisata.

4. KESIMPULAN

Hasil kajian logam berat Cd, Cu, Cr dan Pb di Kawasan Pesisir Parangtritis menyimpulkan bahwa logam Cd dan Pb memiliki konsentrasi yang tinggi dengan nilai reratanya melebihi baku mutu Permenkes No. 2 Tahun 2023 baik pada air permukaan dan air tanah. Pada aspek distribusi spasial, logam Cd dan Pb berasosiasi dengan penggunaan lahan sawah dan lahan pertanian pada

bagian barat-tengah lokasi penelitian, sehingga aktivitas pertanian ini menjadi indikator sumber potensial utama tingginya logam berat di kawasan Pesisir Parangtritis. Temuan hasil penelitian ini dapat memberikan gambaran kondisi pencemaran logam berat yang berasosiasi dengan aktivitas pariwisata dan pertanian dalam satu ekosistem yang sama, sehingga dapat memberikan dasar rekomendasi dan pengelolaan terintegrasi secara konkret. Lebih lanjut, perlu adanya kajian terkait mekanisme pencemaran Cd dan Pb pada aktivitas pertanian maupun non pertanian di lokasi penelitian. Kejelasan mekanisme pencemaran ini akan mempermudah kombinasi tindakan preventif hingga remediasi yang akan dilakukan di Pesisir Parangtritis maupun di lokasi lain dengan karakteristik kepesisiran yang sama seperti halnya pengurangan dan penggantian pupuk kimia, fitoremediasi serta pengolahan limbah aktivitas pariwisata.

DAFTAR PUSTAKA

- Alkan, N., Alkan, A., Akbaş, U., Fisher, A. 2015. Metal Pollution Assessment in Sediments of the Southeastern Black Sea Coast of Turkey. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*. Vol. 24: 3. Pages 290-305. <https://doi.org/10.1080/15320383.2015.950723>
- Antika, S.P., Sejati, S.P., Ibrahim, M.H. 2024. Groundwater quality in coastal area: A case study in Parangtritis village, Bantul, Yogyakarta, Indonesia. *Jurnal Pendidikan Geografi*. Vol. 29:1. Page 28-42. <https://doi.org/10.17977/um017v29i12024p28-42>
- Atafar, Z., Mesdaghinia, A., Nouri, J., Homaee, M., Yunesian, M., Ahmadimoghaddam, M., Mahvi, A.H. 2010. Effect of fertilizer application on soil heavy metal concentration. Vol. 160. Pages 83-89. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0659-x>
- Ayari, J., Ouelhazi, H., Charef, A., Barhoumi, A. 2023. Delineation of seawater intrusion and groundwater quality assessment in coastal aquifers: The Korba coastal aquifer (Northeastern Tunisia). *Marine Pollution Bulletin*. Vol. 188. 114643. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114643>
- Costall, A.R., Harris, B.D., Teo, B., Schaa, R., Wagner, F.M., Pigois, J.P. 2020. Groundwater Throughflow and Seawater intrusion in High Quality coastal Aquifers. *Scientific Research Nature Research*. 10: 9866. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66516-6>
- Deeba, F., Rahman, S.H., Kabir, M.Z., Dina, N.T., Das, S.C., Sultana, S., Ahmed, F.T. 2021. Heavy Metals Distribution and Contamination in Groundwater of the South Eastern Coastal Area of Bangladesh. Vol. 19: 5. Page 267-282. <https://doi.org/10.2965/jwet.20-169>
- Ebrahimi, M., Kazemi, H., Ehtashemi, M., Rockaway, T.D. 2016. Assessment of groundwater quantity and quality and saltwater intrusion in the Damghan basin, Iran. *Geochemistry*. Vol. 76: 2. Pages 227-241. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.003>
- Ebrahimi, M., Khalili, N., Razi, S., Keshavarz-Fathi, M., Khalili, N., Rezaei, N. 2020. Effects of lead and cadmium on the immune system and cancer progression. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. Vol. 18. Pages 335-343. <https://doi.org/10.1007/s40201-020-00455-2>
- Giao, N.T., Nhien, H.T.H., Anh, P.K., & Thuptimrang, P. 2023. Groundwater quality assessment for drinking purposes: a case study in the Mekong Delta, Vietnam. *Scientific Reports*. Vol. 13: 4380. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31621-9>
- Isa, L.O.S., Adji, T.N., Purnama, I.L.S. 2022. Analysis of Groundwater Potential in the Coastal Area of Parangtritis using Geoelectrical VES Method. *Media Komunikasi Geografi*. Vol. 23: 2. Page 188-197. <https://doi.org/10.23887/mkg.v23i2.51539>
- Joimel, S., Capiaux, H., Schwartz, C., Hedde, M., Lebeau, T., Le Guern, C., Nahmani, J., Pernin, C., Salmon, S., Santorufo, L., Béchet, B., Cortet, J. 2018. Effect of Geogenic Lead on Fungal and Collembolan Communities in Garden Topsoil. *Pedosphere*. Vol. 28: 2. Pages 215-226. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60022-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60022-0)
- Karthikeyan, S., Kulandaisamy, P., Senapathi, V., Thangaraj, K., Arumugam, M., Sekar, S., Ranganathan, P.C. 2022. Groundwater Contamination in Coastal Aquifers: Assessment and Management Chapter 2 - Issues of coastal groundwater contamination. Page 9-18. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824387-9.00019-0>
- Kementerian Kesehatan. 2023. Peraturan Menteri Kesehatan No. 2 Tahun 2023 Tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah No. 66 Tahun 2014 Tentang Kesehatan Lingkungan.
- Kementerian Kesehatan. 2017. Peraturan Menteri Kesehatan No. 32 Tahun 2017 Tentang Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan Dan Persyaratan Kesehatan Air Untuk Keperluan Higiene Sanitasi, Kolam Renang, Solus Per Aqua, Dan Pemandian Umum
- Kubier, A. and Pichler, T. 2019. Cadmium in groundwater-A synopsis based on a large hydrogeochemical data set. *Science of the Total Environment*. Vol. 689. Pages 831-842. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.499>
- Lin, J., Zhu, Z., Zhu, Y., Liu, H., Zhang, L., Jiang, Z. 2018. Dissolution and Solubility Product of Cd-Fluorapatite [Cd₅(PO₄)₃F] at pH of 2-9 and 25-45°C. *Journal of Chemistry*. Vol. 2018. Pages 1-9. <https://doi.org/10.1155/2018/3109047>
- Luo, M., Zhang, Y., Li, H., Hu, W., Xiao, K., Yu, S., Zheng, C., Wang, X. 2022. 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151070>
- Murtianto, H., Lin, S.W., Chen, Z. 2017. The study of water quality for developing tourism in Parangtritis coastal area, Indonesia. *Journal of agriculture and research*. Vol. 3: 5. Page 27-34. <https://doi.org/10.53555/ar.v3i5.48>
- Mitra, S., Chakraborty, A.J., Tareq, A.M., Bin Emran, T., Nainu, F., Khuro, A., Idris, A.M., Khandaker, M.U., Osman, H., Alhumaydhi, F.A., Simal-Gandara, J. 2022. Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity. *Journal of King Saud University - Science*. 34. Page 1018-3647. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101865>

- Wacano, D., Rezhandi, R. T., Hadi, A. W., Ardhayanti, L. I., Lestari, P., Desfitiany, N. R. (2025). Analisis Konsentrasi, Distribusi, dan Potensi Sumber Logam Berat pada Air Permukaan dan Air Tanah di Pesisir Parangtritis Yogyakarta. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 23(6), 1592-1601, doi:10.14710/jil.23.6.1592-1601
- Nnaji, N.D., Onyeaka, H., Miri, T., Ugwa, C. 2023. Bioaccumulation for heavy metal removal: a review. *SN Applied Sciences*. 5:125. <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05351-6>
- Noman, M.A., Feng, W., Zhu, G., Hossain, M.B., Chen, Y., Zhang, H., Sun, J. 2022. Bioaccumulation and potential human health risks of metals in commercially important fishes and shellfishes from Hangzhou Bay, China. *Scientific Report Nature portfolio*. 12:4634. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08471-y>
- Rochaddi, B., Atmodjo, W., Satriadi, A., Suryono, C.A., Irwani, I., Widada, S. 2019. The Heavy Metal Contamination in Shallow Groundwater at Coastal Areas of Surabaya East Java Indonesia. Vol. 22:1. Page 69-72. <https://doi.org/10.14710/jkt.v22i1.4464>
- Romero-Freire, A., Peninado, F.J.M., van Gestel, C.A.M. 2015. Effect of soil properties on the toxicity of Pb: Assessment of the appropriateness of guideline values. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 289. Pages 46-53. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.02.034>
- Rupabumi Digital Indonesia. Lembar Parangtritis Skala 1:25.000. Ina-geoportal. Diakses pada Tanggal 18 Juni 2024. <https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/>
- SNI-06-6989-6-(2004). 2004. Metode Pengujian Tembaga (Cu) SSA Nyala. Badan Standarisasi Nasional.
- SNI-06-6989-8-(2004). 2004. Metode Pengujian Timbal (Pb) SSA Nyala. Badan Standarisasi Nasional.
- SNI-06-6989-16-(2004). 2004. Metode Pengujian Kadmium (Cd) SSA Nyala. Badan Standarisasi Nasional.
- SNI-06-6989-17-(2004). 2004. Metode Pengujian Kromium (Cr) SSA Nyala. Badan Standarisasi Nasional.
- Suciu, N.A., De Vivo, R., Rizzati, N., Capri, E. 2022. Cd content in phosphate fertilizer: Which potential risk for the environment and human health?. *Current Opinion in Environmental Science & Health*. Vol. 30. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100392>
- Wilopo, W., Risanti, Susatio, R., Putra, D.P.E. 2021. Seawater intrusion assessment and prediction of sea-freshwater interface in Parangtritis coastal aquifer, South of Yogyakarta Special Province, Indonesia. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*. Vol. 8:3. Page 2709-2718. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2021.083.2709>
- Yan, Q., Zhu, Y., Feng, G., Zhu, Z., Zhang, L., Liu, J., He, H. 2020. Characterization, dissolution and solubility of lead fluorapatite at 25-45 °C. *Applied Geochemistry*. Vol. 120: 104659. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104659>
- Yeboah, I.B., Tuffour, H.O., Abubakari, A., Melenya, C., Bonsu, M., Quansah, C., Adjei-Gyapong, T. 2019. Mobility and transport behavior of lead in agricultural soils. *Scientific African*. 5. Page 2468-2276. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00117>