

Status Pencemaran Logam Berat pada Sungai Metro di Sekitar Tempat Pembuangan Akhir Sampah (TPAS) Talangagung, Kabupaten Malang

Khoirun Nisa' Ari Yuniarti¹ dan Ferryati Masitoh^{1*}

¹Departemen Geografi, Fakultas Ilmu Sosial, Universitas Negeri Malang, Malang, Indonesia; e-mail: ferryati.masitoh.fis@um.ac.id

ABSTRAK

Peningkatan limbah perkotaan dapat memicu risiko penurunan kualitas air sungai akibat kontaminasi lindi dari Tempat Pemrosesan Akhir (TPA). TPA Talangagung berada di Kabupaten Malang menggunakan sistem *sanitary landfill* yang berpotensi membentuk aliran lindi pada Sungai Metro. TPA Talangagung merupakan TPA yang sering menjadi percontohan (wisata edukasi) mengenai persampahan di Kabupaten Malang. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kadar polusi dan menganalisis status pencemaran logam berat pada Sungai Metro yang mengalir di sekitar TPA Talangagung. Pendekatan penelitian yaitu kuantitatif dengan jenis penelitian *cross-sectional*. Keterbaruan penelitian yaitu digunakannya pendekatan multi-indeks yang komprehensif, serta berusaha menemukan adanya parameter logam berat yang bersifat dominan. Sampel air yang diambil secara *simple purposive sampling* dari titik sebelum, tepat di tepi, dan sesudah TPA sebanyak 6 sampel. Parameter yang diuji meliputi kromium (Cr), tembaga (Cu), seng (Zn), kadmium (Cd), dan timbal (Pb). Hasil analisis laboratorium menunjukkan bahwa konsentrasi seng (Zn) telah melebihi baku mutu Kelas II PP No. 22 Tahun 2021, sedangkan logam lainnya masih di bawah ambang batas. Berdasarkan analisis indeks, nilai *Heavy Metal Pollution Index* (HPI) berkisar antara 2,179 – 2,228 yang termasuk kategori cemar rendah. Namun, nilai *Contamination Index* (CD) menunjukkan angka 6,96 – 10,76 yang mengindikasikan status kontaminasi tinggi, sementara *Indeks Pencemaran* (IP) berada pada rentang 3,36 – 4,22 yang mengategorikan sungai dalam status cemar ringan. Secara spasial, titik setelah TPA menunjukkan nilai pencemaran tertinggi, yang menandakan adanya pengaruh masukan lindi yang menyebar ke arah hilir sungai. Selanjutnya, hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai informasi mengenai pemantauan dampak TPA terhadap aliran sungai yang bersifat spesifik.

Kata kunci: Tempat Pembuangan Akhir, Lindi TPA, Logam berat, Indeks Pencemaran Logam Berat (HPI), Indeks Kontaminasi (CD), Indeks Pencemaran (IP).

ABSTRACT

The recent rise in urban waste may increase the risk of worsening river water quality owing to leachate contamination from the landfill. The sanitary landfill system at Talangagung Landfill in Malang Regency risks leachate discharge into the Metro River. The Talangagung Landfill is often used for waste management educational tourism in Malang Regency. This study analyzes pollution and heavy metal contamination in the Metro River near the Talangagung Landfill. The research methodology is quantitative and utilizes a cross-sectional study design. A rigorous multi-index methodology and the search for prominent heavy metal characteristics made the research unique. Six water samples were collected using simple purposive sampling from locations before, at the boundary, and after the landfill. The evaluated factors are Chromium (Cr), Copper (Cu), Zinc (Zn), Cadmium (Cd), and Lead (Pb). Laboratory analytical results indicate that the Zinc (Zn) concentration has surpassed the Class II quality criteria established by PP No. 22 of 2021, however the levels of other metals remain beneath the threshold. The Heavy Metal Pollution Index (HPI) levels, as per the index study, range from 2.179 to 2.228, categorizing them as low pollution. The Contamination Index (CD) runs from 6.96 to 10.76, signifying a high contamination level, but the Pollution Index (IP) spans from 3.36 to 4.22, classifying the river as exhibiting light pollution status. The location downstream of the landfill exhibits the highest pollution level, signifying the impact of leachate dispersal along the river. This study can provide data for evaluating the landfill's impact on river flow in a specific manner.

Keywords: Landfill, Landfill Leachate, Heavy Metal

Citation: Yuniarti, K. N. A. dan Masitoh, F. (2024). Status Pencemaran Logam Berat pada Sungai Metro di Sekitar Tempat Pembuangan Akhir Sampah (TPAS) Talangagung, Kabupaten Malang. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 23(6), 1667-1680, doi:10.14710/jil.23.6.1667-1680

1. PENDAHULUAN

Air menunjang keberlangsungan hidup semua makhluk hidup, tetapi keberadaan terbatas akibat perbedaan kuantitas dan kualitasnya (Matchett & Fleskes, 2017; Sugrani & Taufiq, 2023; Woldearegay et al., 2023). Air sungai menjadi satu diantara sumber air yang banyak dimanfaatkan dalam pemenuhan kebutuhan individu, seperti irigasi pertanian, bahan baku air minum, PLTA, dan lainnya (Ainna, 2013; Zhao et al., 2020). Sustainable Development Goals ke 6 berkaitan dengan ketersediaan air bersih. Air bersih akan meningkat setiap tahunnya untuk memenuhi kebutuhan air penduduk, populasi, industri. Akan tetapi kondisi air bersih terus mengalami risiko tekanan berupa penurunan kuantitas dan kualitas air terutama di daerah perkotaan (Kulkarni et al., 2021; Tyagi et al., 2013). Dampak lainnya yaitu bahwa urbanisasi dan industrialisasi menimbulkan masalah berupa banyaknya limbah yang dihasilkan (Anand & Palani, 2022a).

Di Indonesia sebagian besar sampah perkotaan dibuang di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) yang menggunakan sistem pengelolaan *sanitary landfill*. Salah satu TPA (Tempat Pemrosesan Akhir) yang masih aktif melakukan pengelolaan adalah TPA Talangagung yang terletak di Kabupaten Malang, Jawa Timur. Dalam proses pengelolaannya, TPA Talangagung telah mengimplementasikan *Waste to Energy* (WTE), yakni TPA memanfaatkan limbah untuk menjadi sumber energi terbarukan (Dewi & Roziqin, 2022). TPA Talangagung merupakan salah satu TPA yang aktif dengan sistem *sanitary landfill* sesuai dengan ketetapan Pemerintah Republik Indonesia (Undang-Undang (UU) Nomor 18 Tahun 2008 Tentang Pengelolaan Sampah, 2008). TPA dengan sistem pembuangan penimbunan (*sanitary landfill*) yang tidak berjalan sebagaimana mestinya, dapat mengkontaminasi lingkungan dengan dampak yang sama dengan TPA *open dumping* (Bashri et al., 2014). Penelitian sebelumnya memiliki potensi kontaminasi tanah (Podlasek et al., 2024), airtanah (Abiriga et al., 2021) dan sungai di sekitarnya (Sulistiyowati et al., 2023).

Aktivitas menghasilkan lindi (Anand & Palani, 2022b; Zamrisha et al., 2023). Pengoperasian TPA terutama dalam pengelolaan lindi sangat penting karena merupakan ancaman bagi daerah perairan sekitar TPA (Abiriga et al., 2021; Salami & Susu, 2019; Tesseme et al., 2022). Pemrosesan yang kurang tepat, memungkinkan adanya lindi yang terinfiltrasi ataupun terbawa air hujan. Faktor yang memengaruhi persebaran lindi, antara lain curah hujan tahunan, limpasan, penguapan, transpirasi, komposisi limbah suhu lingkungan rata-rata, kepadatan limbah, kadar air awal, dan kedalaman TPA (Chelliapan et al., 2020; Gao et al., 2015).

Lindi memiliki karakteristik tinggi kandungan komponen organik, logam, asam, garam terlarut dan mikroorganisme (De Velásquez et al., 2003; Debebe et al., 2023). Berdasarkan perspektif pencemaran, pada lindi TPA (*landfill leachate*) terdapat berbagai

komponen, yakni polutan organik, anorganik, dan senyawa xenobiotik (Ghosh et al., 2017). Polutan anorganik, yang dapat mencemari lingkungan dari lindi TPA adalah logam berat (Bakis & Tuncan, 2011; Sulistiyowati et al., 2023). Dalam air lindi seringkali ditemukan adanya kandungan logam berat seperti kromium (Cr), timbal (Pb), zinc (Zn), nikel (Ni), tembaga (Cu), besi (Fe), hingga raksa (Hg) (Abdelwaheb et al., 2019; Kumar & Alappat, 2005; Teta & Hikwa, 2017). Observasi pra penelitian yang dilakukan pada Mei 2024, menunjukkan pada lokasi timbunan sampah didapati adanya aliran lindi yang hingga memasuki badan air Sungai Metro (Gambar 1 dan Gambar 2).

Logam berat dapat memberikan dampak berbahaya yang kaitannya dengan keberacunan tinggi, mampu bertahan lama dan tidak berubah, serta kecenderungan bio-akumulasi (Zheng et al., 2018). Oleh karenanya, logam berat memiliki bahaya yang signifikan dan berjangka panjang bagi lingkungan dan kesehatan. Logam arsen (As), kadmium (Cd), kobalt (Co), kromium (Cr), tembaga (Cu), raksa (Hg), nikel (Ni), timbal (Pb), timah (Sn), dan seng (Zn) telah didaftarkan sebagai logam berat beracun oleh Nies (1999). Kontaminasi logam berat dapat menimbulkan efek penyakit saraf, onkologi (kanker), penyakit pernafasan, dan gagal ginjal (Chettri et al., 2022; Khan et al., 2013).

Sungai Metro mengalami penurunan kualitas air akibat dari limbah domestik serta alih fungsi lahan (Yetti et al., 2011). Aktivitas manusia yang memanfaatkan aliran Sungai Metro dalam kegiatan sehari-hari menambah kontaminasi pencemaran pada badan air (Setiyawan, 2019). Pada Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan Dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, dijelaskan bahwa pencemaran air merupakan masuknya organisme, unsur, energi, maupun elemen lainnya ke badan air karena aktivitas manusia, dapat melebihi Baku Mutu Air yang sudah ditentukan.



Gambar 1. Lindi di Sekitar Tumpukan Sampah



X: 8° 7'4.82"S
Y: 112°33'50.00"E

Gambar 2. Aliran Lindi yang Masuk ke Badan Sungai

Penelitian sebelumnya di Sungai Cisadane yang dekat dengan TPA menunjukkan bahwa akumulasi logam berat Cd, Cr dan Pb yang melebihi baku mutu (Sulistyowati et al., 2023). Akan tetapi penelitian tersebut tidak menjelaskan logam berat lainnya misalnya Seng (Zn), Nikel (Ni), Tembaga (Cu), Besi (Fe), Arsen (As), Merkuri (Hg), dan Aluminium (Al), serta status kualitas air sungai tersebut. Penelitian logam berat di muara sungai yang melewati Kota Cirebon, hanya menggunakan Cr, Cd, Cu, Pb, dan Zn (Hartiningasih et al., 2024). Penelitian tersebut juga hanya menggunakan Heavy metal Pollution Index (HPI) untuk menilai status pencemaran logam beratnya. Penelitian sebelumnya menggunakan indeks pencemaran (HPI) pada sungai dan airtanah di sekitar lokasi tambang terbengkalai di Klein Aub, Namibia (Ugwanga & Kgabi, 2021). Berdasarkan hal tersebut nampak adanya kesenjangan penelitian yang berkaitan dengan Lokasi dan metode. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kadar polusi logam berat terhadap Sungai Metro di sekitar TPA Talangagung dan menganalisis cemaran logam berat menggunakan Indeks Pencemaran (IP), Indeks Kontaminasi (CD), dan Indeks Polusi Logam Berat (HPI) pada aliran sungai Metro di sekitar TPA Talangagung.

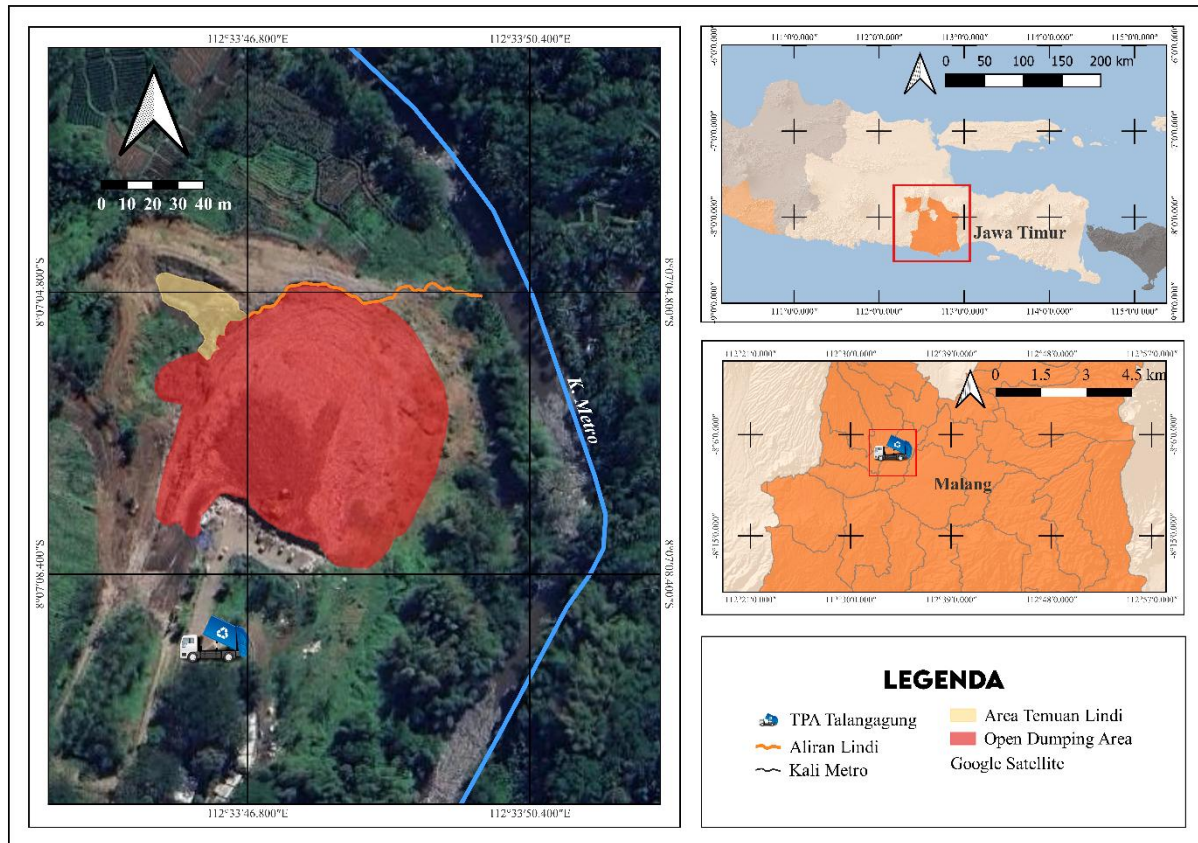
Lokasi TPA Talangagung yang berada pada tanggul yang bertopografi lebih tinggi dari Sungai Metro, sangat memungkinkan lindi terbawa air hujan dan mengontaminasi air sungai (Gambar 2). Aliran lindi yang masuk ke sungai, mengindikasikan adanya pencemaran pada air Sungai Metro di sekitar TPA. Dengan demikian, penelitian ini menjadi penting untuk mengidentifikasi cemaran logam berat dari lindi TPA terhadap Sungai Metro. Penelitian ini menggunakan indeks pencemaran untuk menilai status pencemaran. Indeks pencemaran menunjukkan pengaruh gabungan dari masing-masing logam berat terhadap kualitas air secara keseluruhan (R. D. P. Astuti et al., 2021; Goni et al., 2024; Hartiningasih et al., 2024; Ugwanga & Kgabi, 2021). Penelitian ini menggunakan indeks polusi logam berat (HPI), indeks

kontaminasi (CD), dan indeks pencemar (IP). HPI digunakan untuk mengetahui untuk mengevaluasi kualitas air secara keseluruhan yang berkaitan dengan kontaminasi logam berat di dalam kolom air (R. D. P. Astuti et al., 2021). CD digunakan untuk mengevaluasi kualitas air yang digunakan untuk menentukan tingkat kontaminasi sehingga dianggap beracun (toxic) bagi air (Goni et al., 2024). IP digunakan untuk menentukan derajat pencemaran nisbi terhadap parameter kualitas air yang diizinkan oleh Pemerintah Republik Indonesia melalui Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 27 Tahun 2021 Tentang Indeks Kualitas Lingkungan Hidup. Identifikasi status kualitas air berdasarkan logam berat menggunakan indeks tersebut, dapat menjadi informasi mengenai status kualitas air Sungai Metro, terutama dalam proses pengelolaan TPA dan sungai sekitar TPA.

Penelitian ini memiliki keterbaruan dalam hal pendekatan multi-indeks yang komprehensif, serta berusaha menemukan adanya parameter logam berat yang bersifat dominan. Fokus penelitian ini yaitu lindi dari TPA Talangagung yang masuk ke aliran Sungai Metro. Dengan demikian, maka TPA Talangagung merupakan TPA yang sering menjadi percontohan (wisata edukasi), akan mendapatkan informasi mengenai pemantauan dampak TPA terhadap aliran sungai yang bersifat spesifik. Dampak tersebut mengenai akumulasi logam berat di badan air penerima yaitu Sungai Metro dengan metode indeks gabungan. Informasi akan bermanfaat sebagai kontribusi data terbaru bagi pengelolaan lingkungan terutama TPA Talangagung Kabupaten Malang.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini berlokasi di aliran Sungai Metro sekitar TPA Talangagung, Kecamatan Kepanjen, Kabupaten Malang, Jawa Timur Indonesia. Lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 3. Dalam penelitian ini digunakan metode *cross sectional research* dengan pendekatan kuantitatif memakai indeks polusi logam berat (HPI), indeks kontaminasi (CD), dan indeks pencemar (IP). Dalam masing-masing indeks yang digunakan, terdapat beberapa parameter yang mewakili dari indikator pencemaran air oleh logam berat. Penelitian ini menggunakan metode *cross sectional* untuk mengidentifikasi hubungan dari variabel dengan data yang dikumpulkan pada satu waktu (Abduh et al., 2023). Dengan demikian, analisis kualitas air pada penelitian ini hanya berlaku sesuai dengan waktu pengambilan sampel kualitas airnya. Hal ini karena air sungai memiliki dinamika yang tinggi akibat cuaca (presipitasi dan evaporasi, debit aliran sungai, komposisi limbah dari TPA, suhu lingkungan rata-rata, serta kepadatan limbah TPA pada waktu tertentu (Chelliapan et al., 2020; Gao et al., 2015). Data yang didapatkan kemudian diolah dan divisualkan menggunakan peta dan grafik sebaran pencemaran logam berat. Selanjutnya dilakukan analisis secara deskriptif dari masing-masing indeks.



Gambar 3. Peta Lokasi Kajian

2.1. Pengumpulan Data

Data yang diperlukan dalam penelitian ini meliputi data primer dan data sekunder. Data primer berupa sampel air sungai yang diambil secara langsung di lapangan menggunakan *simple purposive sampling* dan hasil laboratorium dari sampel air. Data sekunder diambil melalui studi literatur yang dilakukan dan didapatkan melalui beberapa lembaga tertentu, maupun melalui situs web. Hasil observasi menunjukkan bahwa Sungai Metro pada lokasi pengambilan sampel memiliki lebar ± 25 meter, kedalaman tepi sungai $\pm 2,5$ meter, dengan kondisi dasar perairan berbatu. Pengambilan sampel dilakukan pada 18 Mei 2024 pada kondisi Hari Cerah awal Musim Kemarau. Sampel air diambil sebanyak 6 sampel yang terbagi menjadi 3 bagian yaitu, 1 sampel sebelum TPA, 4 sampel tepat TPA, dan 1 sampel setelah TPA. Kondisi di lapangan tidak memungkinkan untuk pengambilan sampel di beberapa lokasi lainnya di sekitar TPA. Hal ini karena faktor keamanan lereng sungai yang berupa tanggul sungai dan tumpukan sampah (Gambar 2 dan Gambar 4).

Parameter yang diujikan dari masing-masing sampel terdiri atas timbal (Pb), kromium (Cr), tembaga (Cu), seng (Zn), dan kadmium (Cd) (Hartiningih et al., 2024). 5 parameter tersebut diambil dengan alasan logam berat menjadi kontaminan umum pada lindi yang merupakan hasil dekomposisi bahan organik dalam sampah. Selain itu,

pada hasil publikasi menunjukkan adanya pencemaran logam berat dengan konsentrasi yang cukup tinggi pada badan air yang tercemar lindi (Febrita & Roosmini, 2022; Hartiningih et al., 2024; Siswoyo & Habibi, 2018).

Sampel diambil dengan mempertimbangkan kondisi aliran Sungai Metro. Sebaran pengambilan sampel dapat dilihat pada Gambar 4. Metode pengambilan sampel air dilakukan sesuai SNI 8995:2021 yang menetapkan metode untuk mengambil contoh uji air yang berada di badan air, baik badan air permukaan maupun akuifer untuk pengujian parameter fisika dan kimia. Sampel air akan diambil dan disimpan menggunakan botol dengan jenis HDPE sebanyak 1000ml. Sampel tersebut ditempatkan pada kotak pendingin kemudian dikirimkan ke laboratorium yang telah memiliki register laboratorium lingkungan. untuk pengujian komprehensif. Laboratorium pengujian dalam penelitian ini yaitu Laboratorium Kualitas Air Unit Laboratorium Lingkungan Perum Jasa Tirta I Kota Malang.

2.2. Pengolahan Data

Data yang telah diperoleh dari hasil akuisisi lapangan akan digunakan untuk mendapatkan nilai cemaran logam berat menggunakan *heavy metal pollution indeks* (HPI), *contamination indeks* (CD), dan indeks pencemaran (IP). Setiap indeks dihitung dengan berpatokan pada baku mutu yang telah

ditentukan oleh Pemerintah Indonesia, yakni Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Setelahnya, hasil dari tiap-tiap indeks akan diolah menggunakan perangkat lunak QGIS untuk melihat distribusi spasial pencemaran logam berat di air Sungai Metro sekitar TPA Talangagung.

2.2.1. Heavy Metal Pollution Index (HPI)

Indeks polusi logam berat (HPI) diterapkan dalam menilai kualitas air yang kaitannya dengan logam berat (Uguwanga & Kgabi, 2021). HPI (*Heavy Metal Pollution Index*) adalah sebuah metode indeks kualitas air berkaitan dengan total kualitas air yang dipengaruhi komposit logam berat dengan metode rata-rata aritmatika tertimbang satuan yang mendasari (Hartiningsih et al., 2024; Mahato et al., 2017; Uguwanga & Kgabi, 2021). HPI dihitung menggunakan persamaan 1, 2 dan 3 (Karthikeyan et al., 2021; Palaniappan, 2024; Şener et al., 2023):

$$HPI = \frac{\sum_{i=1}^n W_i Q_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

$$W_i = \frac{K}{S_i} \quad (2)$$

$$Q_i = \sum_{i=1}^n \frac{(M_i(-)I_i)}{(S_i - I_i)} \times 100 \quad (3)$$

Dengan:

Q_i : Sub-indeks dari i^{th} logam berat

W_i : Berat satuan i^{th} logam berat

K : Konstanta = 1

I_i : Nilai ideal dari i^{th} logam berat

S_i : Nilai standar dari i^{th} logam berat

M_i : Konsentrasi i^{th} logam berat

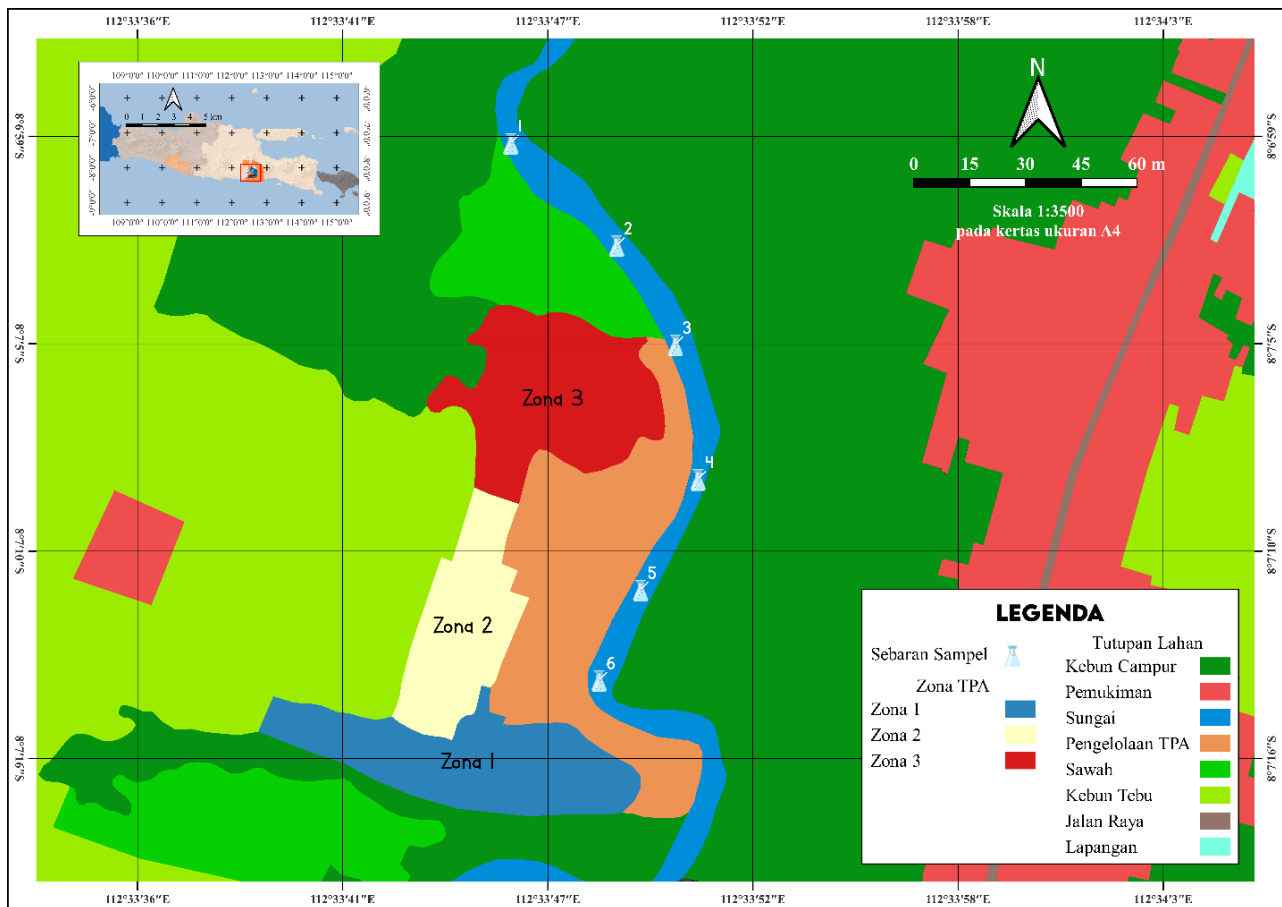
Setelah menghitung HPI menggunakan persamaan 1, 2, dan 3, sungai dikelaskan berdasarkan Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi Pencemaran Berdasarkan Nilai HPI

HPI	Kelas
< 15	Rendah
15 - 30	Sedang
> 30 - 100	Tinggi
> 100	Kritis

Sumber: (Asim & Nageswara Rao, 2021; Chettri et al., 2022)

Dalam menghitung nilai HPI terdapat nilai ideal dan nilai standar, dalam hal ini dapat digunakan baku mutu atau standar konsentrasi rata-rata logam berat yang diizinkan. Standar pedoman yang dapat digunakan diantaranya berdasarkan EPA (*United States Environmental Protection Agency*), WHO (*World Health Organization*), maupun Peraturan Pemerintah nomor 22 Tahun 2021.



Gambar 4. Peta Sebaran Pengambilan Sampel

Tabel 2. Baku Mutu Parameter Logam Berat pada Air

Parameter	EPA		WHO		KLHK	
	MC LG (mg/L)	MLG (mg/L)	Ideal (mg/L)	Standart (mg/L)	Kelas II (mg/L)	Kelas IV (mg/L)
Total Kromium (Cr)	0,1	0,1	0,05	0,5	0,05	1
Timbal (Pb)	0	0,015	0,01	0,1	0,03	0,5
Seng (Zn)	-	-	3	5	0,05	2
Nikel (Ni)	-	-	0,07	0,25	0,05	2
Tembaga (Cu)	1,3	1,3	2,0	3,0	0,02	0,2
Besi (Fe)	-	-	0,2	0,3	-	-
Arsen (As)	0	0,01	0,01	0,5	0,05	0,1
Kadmium (Cd)	0,005	0,005	0,003	0,15	0,01	0,01
Merkuri (Hg)	0,002	0,002	0,006	0,007	0,02	0,005
Aluminium (Al)	-	-	0,2	0,5	-	-

Sumber: (EPA (United Station Environtmental Protection Agency), 2024; Lampiran VI. PP Nomor 22 Tahun 2021, 2021; WHO (World Health Organization), 2021)

2.2.2. Contamination Index (CD)

CD atau *Contamination index* digunakan dalam menentukan tingkat efek merugikan logam berat pada air. Indeks Kontaminasi adalah metode untuk mengevaluasi kualitas air untuk menentukan tingkat kontaminasi (Goni et al., 2024). Pada metode CD, kualitas air dihitung sebagai jumlah faktor kontaminasi dari masing-masing komponen yang melebihi batas baku mutu (Chung et al., 2019). Nilai CD yang diperoleh dari perhitungan nilai seluruh parameter dapat digunakan dalam penentuan status kontaminasi pada badan air, dengan klasifikasi pada Tabel 3. Untuk menentukan indeks kontaminasi (CD), digunakan persamaan 4 dan 5 (Goni et al., 2024)

$$CD = \sum_{i=1}^n Cfi \quad (4)$$

$$Cfi = \frac{CAi}{CNI} \quad (5)$$

dengan:

Cfi : Faktor Kontaminasi untuk komponen ke – i

CAi : Nilai yang diamati untuk komponen ke – i

CNI : Batas aman komponen ke – i

Tabel 3. Klasifikasi Pencemaran Berdasarkan Nilai CD (Indeks Kontaminasi)

CD	Status Kontaminasi
CD < 1	Rendah
1 ≤ CD ≤ 3	Sedang
CD > 3	Tinggi

Sumber: (Abd El- Hamid, 2017; Goni et al., 2024)

2.2.3. Indeks Pencemaran (IP)

Indeks Pencemaran merupakan nilai yang digunakan dalam penentuan derajat pencemaran nisbi terhadap parameter kualitas air yang diizinkan (Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 27 Tahun 2021 Tentang Indeks Kualitas Lingkungan Hidup, 2021). Kalkulasi status mutu air mengacu pada baku mutu air kelas II sesuai lampiran VI PP No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, yang ditunjukkan pada Tabel 2. Penentuan status mutu menggunakan ketentuan seperti pada Tabel 4 dengan perhitungan menggunakan Persamaan 6.

$$IP_j = \sqrt{\frac{(C_i/L_{ij})^2_M + (C_i/L_{ij})^2_R}{2}} \quad (6)$$

dengan:

Lij : Konsentrasi Baku Peruntukan Air (j)

Ci : Konsentrasi sampel parameter kualitas Air (i)

IPj : Pencemaran bagi peruntukan (j)

M : Nilai Maksimum dari Ci/Lij

R : Nilai Rata-rata dari Ci/Lij

Perlu diingat, apabila:

- Ci/Lij hasil pengukuran < 1,0; maka nilai dapat digunakan

- Ci/Lij hasil pengukuran > 1,0 maka digunakan Ci/Lijbaru yang didapatkan dengan rumus:

$$Ci/Lij_{baru} = 1,0 + P \times \log Ci/Lij_{hasilpengukuran} \quad (7)$$

- P merupakan konstanta dengan nilai yang biasa digunakan adalah 5.

Tabel 4. Klasifikasi Pencemaran Berdasarkan Nilai IP (Indeks Pencemar)

IP	Status Mutu
0 ≤ IPj ≤ 1,0	Baik (Memenuhi Baku Mutu)
1.0 ≤ IPj ≤ 5,0	Cemar Ringan
5,0 ≤ IPj ≤ 10,0	Cemar Sedang
IPj ≥ 10,0	Cemar Berat

Sumber: Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 27 Tahun 2021 Tentang Indeks Kualitas Lingkungan Hidup, 2021

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

TPA Talangagung menjadi salah satu tempat pemrosesan sampah yang menggunakan sistem *sanitary landfill*. Sampah yang diterima TPA Talangagung pada tahun 2021 mencapai 36.227.881 Kg. Sampah tersebut bersumber dari berbagai tempat, yang didominasi sampah dari permukiman dengan total 21.639.966Kg (Dewi & Roziqin, 2022). *Sanitary landfill* ialah metode pengolahan sampah yang digunakan untuk membuang dan menambun sampah pada area yang cekung, memadatkannya, lalu menutupnya dengan tanah (Diamanis et al., 2022). Selama proses penimbunan sampah, terdapat produk limbah kimia sintetis yang dikenal dengan lindi TPA (Jegadeesan et al., 2023). Lindi pada *sanitary landfill* merupakan cairan beracun berwarna hitam yang mengandung polutan.

Polutan lindi *sanitary landfill* dikelompokkan menjadi empat kategori, yaitu bahan organik terlarut, makro komponen anorganik, logam berat, dan senyawa organik xenobiotik (Jegadeesan et al., 2023). Komposisi lindi TPA bervariasi sesuai dengan jenis sampah yang ditimbun dan terakumulasi (Nivya & Minimol Pieus, 2016). Oleh karena itu, pemrosesan

pada *sanitary landfill* dan pembuangan lindi TPA yang tepat, diperlukan untuk mencegah bioakumulasi dan kerusakan lingkungan. Aliran lindi dari TPA Talangagung, mengindikasikan adanya polutan yang masuk ke dalam aliran Sungai Metro (Gambar 1 dan 2), dengan komponen polutan berupa logam berat.

Logam dikelompokkan menjadi dua, yaitu logam ringan dan logam berat. Logam berat merupakan komponen alam yang terdapat pada kerak bumi, tidak dapat terdegradasi atau dimusnahkan, serta merupakan zat berbahaya karena dapat terakumulasi secara biologis. Unsur logam dikatakan logam berat, apabila logam memiliki berat 5g/cm^3 atau lebih, sedangkan logam ringan memiliki berat $< 5\text{g/cm}^3$ (Rosihan & Husaini, 2017). Dalam penelitian kali ini, terdapat lima unsur logam berat yang diteliti, yakni Cr, Cu, Zn, Cd, dan Pb. Meskipun menjadi zat berbahaya, beberapa logam berat merupakan unsur penting yang dibutuhkan makhluk hidup (Rohmayani et al., 2021).

Logam berat seng (Zn) dan tembaga (Cu) sebagai logam berat dasar (esensial) yang dalam jumlah tertentu diperlukan untuk menjaga metabolisme manusia (Agustina, 2014; Rosihan & Husaini, 2017). Selain logam berat esensial, dapat dikatakan bahwa logam berat dapat menjadi racun untuk organisme hidup seperti kromium (Cr). Logam berat non esensial, diantaranya adalah timbal (Pb) dan kadmium (Cd) yang tidak mempunyai pengaruh terhadap tubuh manusia, bahkan sangat berbahaya dan dapat menyebabkan toksisitas pada manusia (Sistem Informasi B3 & POPs, 2024).

Logam berat tidak muncul secara alami pada sumber air dan dapat menimbulkan potensi keberacunan pada lingkungan dan manusia (Agarwal et al., 2020). Penelitian ini menggunakan 5 parameter logam berat, yaitu kromium (Cr), tembaga (Cu), seng (Zn), kadmium (Cd), dan timbal (Pb). Hasil laboratorium menunjukkan nilai konsentrasi parameter kromium, tembaga, kadmium, dan timbal yang sangat rendah, kurang dari baku mutu yang berlaku. Tembaga (Cu) menjadi satu diantara logam berat yang dapat dijumpai pada sumber air secara alami (Agarwal et al., 2020; I. S. Astuti et al., 2019; Hartiningsih et al., 2024). Logam timbal (Pb) memiliki kelarutan relatif rendah, sehingga kadar timbal terlarut dan tersuspensi juga akan rendah

(Hartiningsih et al., 2024). Hal ini ditunjukkan dari konsentrasi logam timbal pada tiap sampel yang tidak melebihi baku mutu.

Meskipun tidak melebihi baku mutu yang berlaku, pemantauan dan pengendalian kontaminasi logam berat berkelanjutan tetap penting guna memastikan kualitas air yang berkelanjutan (Hartiningsih et al., 2024). Pada logam berat seng (Zn) memiliki kadar melebihi baku mutu kelas II PP nomor 22 tahun 2021. Sebaran nilai konsentrasi dari tiap titik sampel dapat dilihat pada Tabel 5. Konsentrasi logam berat yang didapatkan pada seluruh titik sampel menunjukkan nilai $\text{Zn} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cd}$.

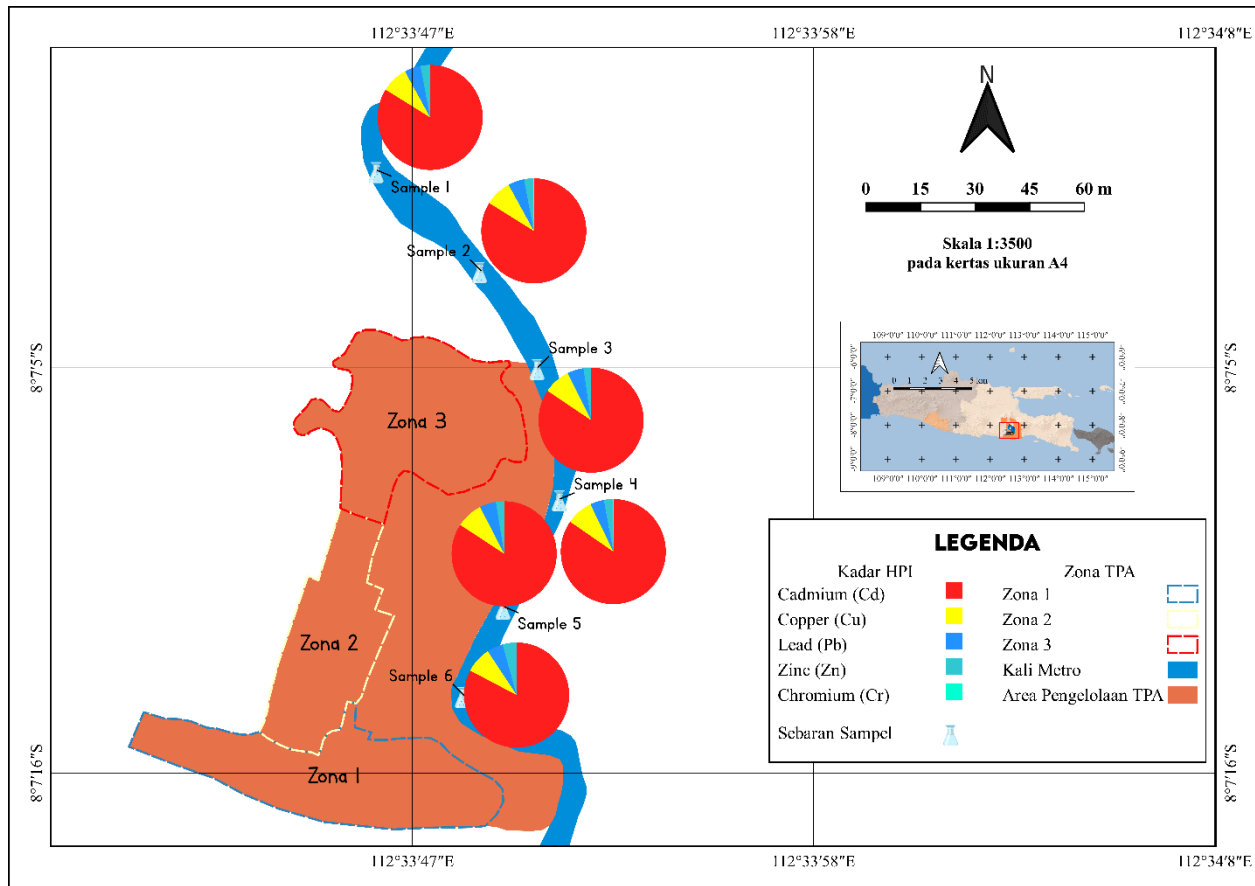
Temuan lindi TPA Talangagung yang masuk ke aliran Sungai Metro berada pada titik sampel 3 dan 4 tepat di tepi TPA. Persebaran konsentrasi logam berat pada aliran Sungai Metro di sekitar TPA dapat dipengaruhi oleh Ukuran dan massa jenis partikel logam berat yang lebih besar dari air sungai. Hal ini menyebabkan logam berat lebih cepat terendap (Ramadhawati et al., 2021). Penelitian sebelumnya juga menyebutkan bahwa badan air dengan kadar logam berat terdapat di aliran sebelum melewati TPA, dan meningkat di sekitar TPA (Sulistiyowati et al., 2023). Kebocoran pada sistem perpipaan juga akan meningkat pada bagian yang dekat dengan sumber (Uugwanga & Kgabi, 2021).

Pada titik sampel 6 terdapat kenaikan konsentrasi cemaran logam berat yang menunjukkan polutan dari lindi menyebar ke hilir sehingga mencemari air pada jarak yang lebih jauh. Dari hasil yang didapatkan pada Tabel 5, masalah pencemaran terkait dengan logam berat pada tempat pemrosesan sampah tidak terlalu signifikan. Hal ini utamanya disebabkan oleh konsentrasi logam berat yang ditemukan pada masukan air lindi ke air Sungai Metro yang rendah dan pengurangan efektif logam berat melalui proses infiltrasi dan sedimentasi (Christensen et al., 2023; Kurniawati & Budi, 2023). Penelitian sebelumnya menyebutkan bahwa di aliran sungai di Klein Aub terdapat akumulasi logam berat pada bagian hilir sungai (Uugwanga & Kgabi, 2021). Penelitian di estuari Sungai Kota Cirebon juga menunjukkan bahwa estuari merupakan hilir sungai menjadi tempat terendapkannya logam berat (Hartiningsih et al., 2024).

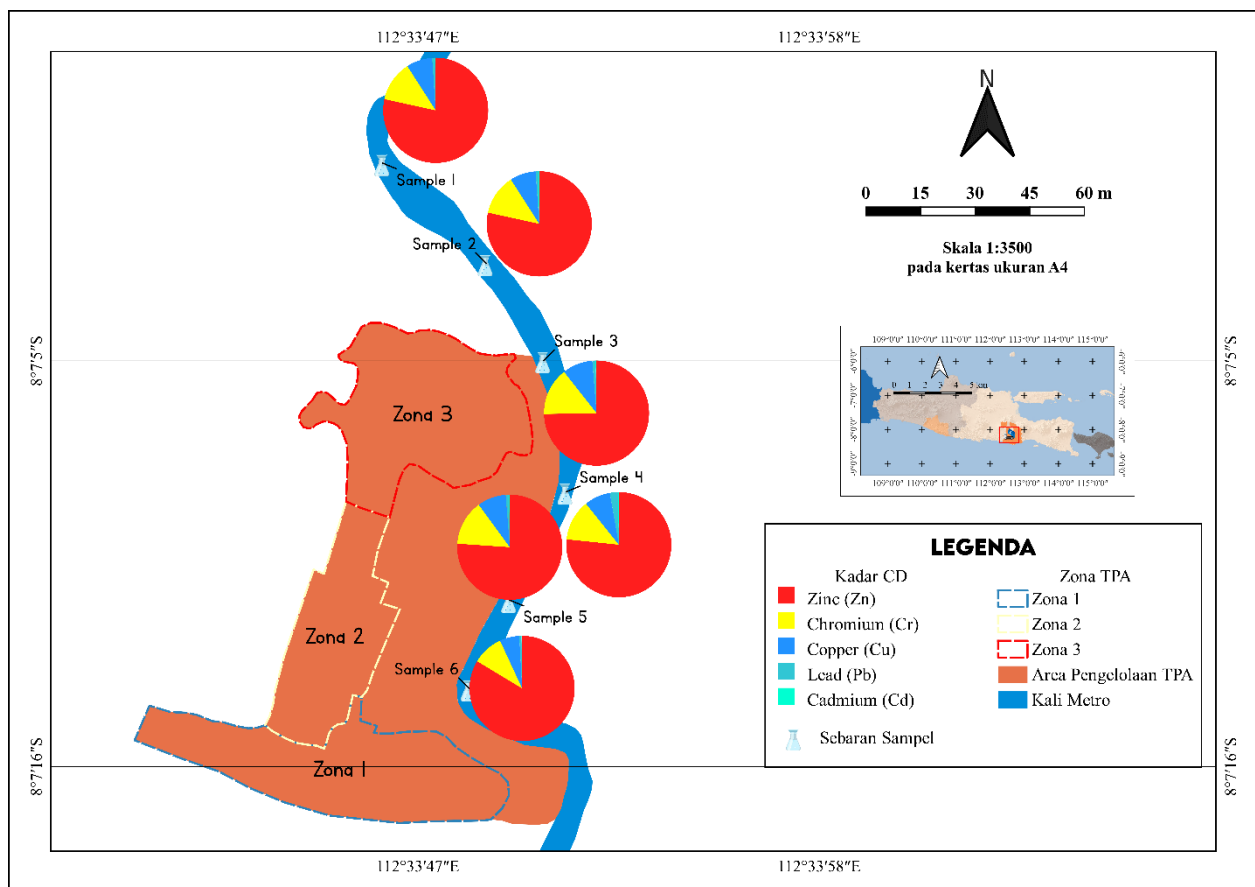
Tabel 5. Konsentrasi Parameter Logam Berat di Sungai Metro Sekitar TPA Talangagung dalam mg/L

Lokasi	Sampel	Kromium (Cr)	Tembaga (Cu)	Seng (Zn)	Kadmium (Cd)	Timbal (Pb)
Sebelum TPA	1	0,051	0,013	0,32	0,0002	0,002
Tepi TPA	2	0,051	0,013	0,32	0,0002	0,002
Tepi TPA	3	0,051	0,013	0,26	0,0002	0,002
Tepi TPA	4	0,051	0,013	0,31	0,0002	0,006
Tepi TPA	5	0,051	0,013	0,28	0,0002	0,002
Sesudah TPA	6	0,051	0,013	0,45	0,0002	0,002
Standard (Baku Mutu)	PP No. 22 Kelas II* WHO ideal**	0,05 0,05	0,02 2	0,05 3	0,01 0,003	0,03 0,01

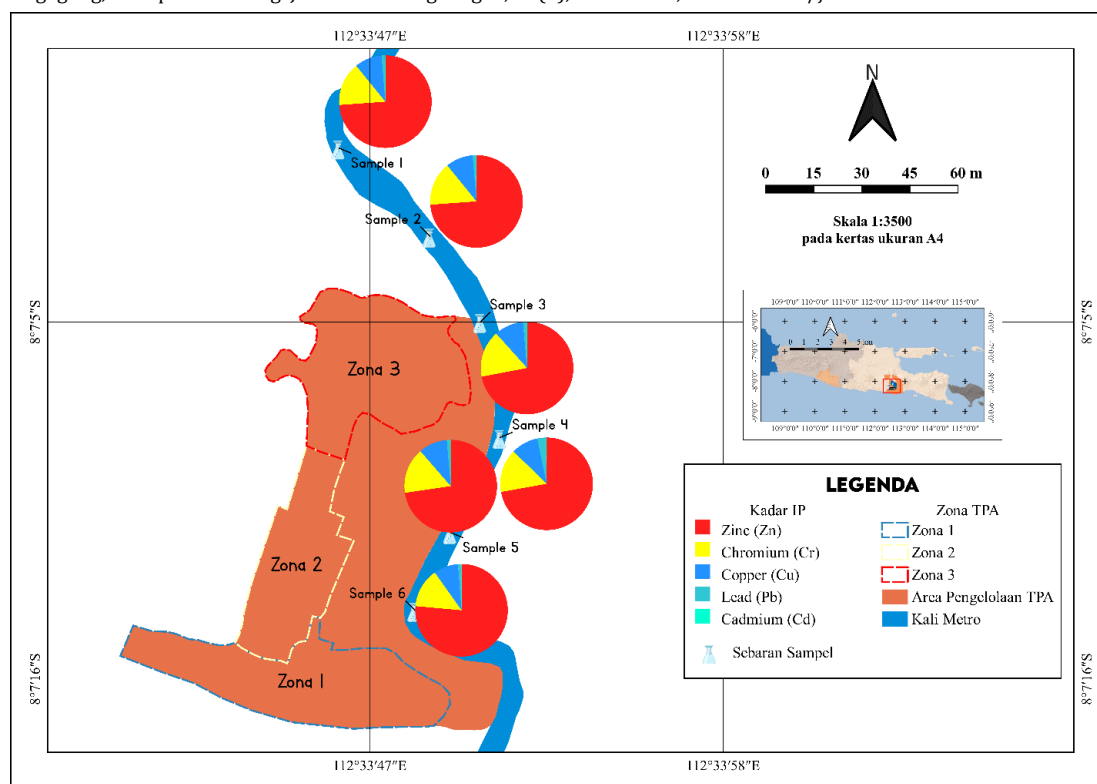
*Lampiran VI. PP Nomor 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan Dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, 2021; **WHO (World Health Organization), 2021



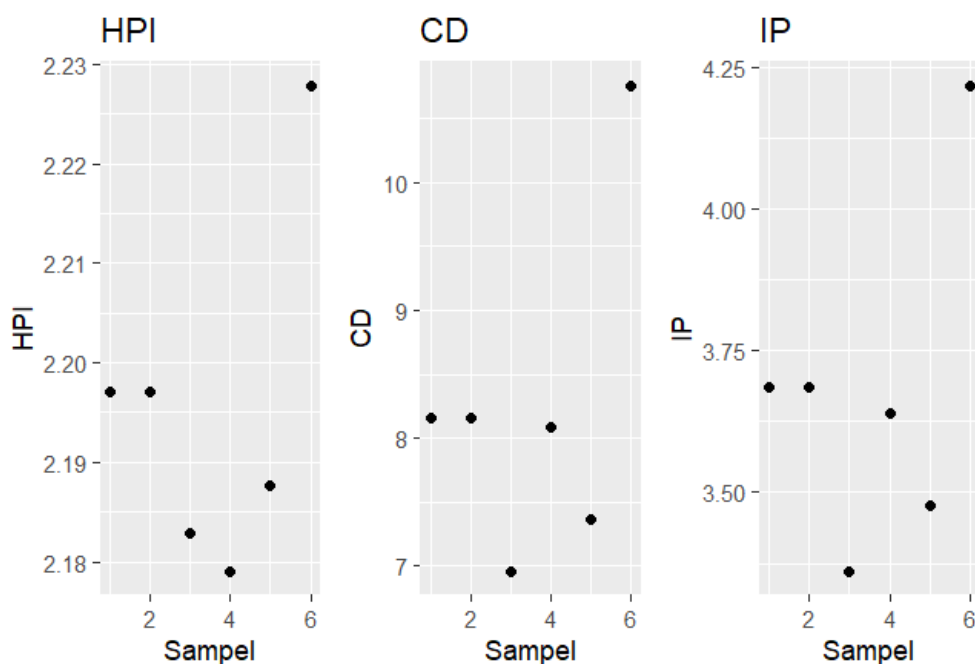
Gambar 5. Peta Sebaran HPI



Gambar 6. Peta Sebaran Indeks Kontaminasi (CD)



Gambar 7. Peta Sebaran Indeks Pencemaran (IP)



Gambar 8. Scatter Plot Kadar Masing-Masing Indeks

3.1. Heavy Metal Pollution Index (HPI)

Indeks pencemaran logam berat (HPI) merupakan metode efektif guna mengevaluasi kualitas air yang kaitannya dengan kontaminasi logam berat (I. S. Astuti et al., 2019). Metode HPI merupakan metode penilaian menyeluruh yang mempertimbangkan dampak spesifik logam berat pada kualitas air keseluruhan. Indeks ini dihitung menggunakan baku mutu air kelas II (baku mutu ideal) dan kelas IV (baku

mutu standar) Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), yang tercantum pada Lampiran VI. PP Nomor 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan Dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Hasil perhitungan HPI ditunjukkan pada Tabel 6. Hasil perhitungan HPI menunjukkan kadar logam berat $Cd > Cu > Pb > Zn > Cr$. Data perhitungan HPI masing-masing titik kemudian divisualisasikan pada Gambar 5.

Pada Gambar 5, menunjukkan HPI didominasi oleh logam berat kadmium (Cd) sebesar 1,843 pada seluruh titik sampel; meskipun konsentrasi kadmium tidak melebihi standar yang berlaku. Konsentrasi terkecil HPI berasal dari logam kromium (Cr) sebesar 0,001 pada seluruh titik sampel. Sedangkan, logam berat seng (Zn) memiliki konsentrasi yang melebihi baku mutu, namun kontribusi pada HPI memiliki nilai yang rendah di antara logam berat lain. Nilai masukan seng pada HPI terendah pada titik 3 sebesar 0,050 dan yang tertinggi pada titik 6 senilai 0,095. Nilai tembaga (Cu) dan timbal (Pb) sebagai penyumbang HPI relatif sama untuk seluruh titik sampel. Nilai tembaga (Cu) sebesar 0,179 dan nilai timbal (Pb) sebesar 0,110 kecuali pada titik 4 yang menurun menjadi 0,094.

Nilai HPI pada seluruh titik tidak lebih dari 3 dan dalam klasifikasi (Chettri et al., 2022), apabila nilai HPI <15 tergolong pada kelas tercemar rendah. Nilai HPI yang didapatkan ada pada sebaran titik 1 (sebelum TPA) dan titik 2 (tepat TPA) memiliki nilai HPI yang sama, kemudian mengalami penurunan pada titik 3 – titik 5 (tepat TPA), dan kemudian naik mencapai nilai tertinggi pada titik 6 (setelah TPA). Faktor yang berkontribusi terhadap perbedaan antara HPI dan konsentrasi sebenarnya atau jumlah logam berat yang ditemukan dalam air. Faktor utama yang mempengaruhi adalah HPI merupakan indeks terkomputasi yang mempertimbangkan berbagai parameter, seperti kadar logam berat yang berbeda untuk mengevaluasi tingkat polusi secara keseluruhan. Perhitungan ini menggabungkan faktor bobot spesifik untuk setiap logam, yang mungkin tidak mencerminkan pengaruh lingkungan sebenarnya secara konsisten (Hartiniingsih et al., 2024).

3.2. Contamination Index (CD)

Indeks Kontaminasi (CD) diperoleh dari kalkulasi nilai logam berat untuk menentukan status kontaminasi berpatokan pada klasifikasi (Abd El-

Hamid, 2017; Goni et al., 2024). Batas aman parameter logam berat yang digunakan dalam kalkulasi adalah Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 baku mutu air Kelas II. Hasil perhitungan indeks kontaminasi menunjukkan nilai pada rentang 6,96 – 10,76 yang tergolong dalam kelas terkontaminasi tinggi. Kontaminasi tertinggi berada pada titik 6 dan terendah pada titik 3. Berdasarkan hasil perhitungan yang ditunjukkan pada Tabel 7, menunjukkan nilai Zn > Cu > Cr > Cd > Pb.

Nilai indeks kontaminasi logam berat seng (Zn) menjadi penyumbang terbesar diantara logam lain dengan nilai terendah sebesar 5,2 pada titik 3 dan tertinggi senilai 9,0 pada titik 6. Hal ini menunjukkan adanya keselarasan dengan konsentrasi seng sebenarnya yang lebih tinggi di antara konsentrasi logam berat lainnya. Nilai indeks kontaminasi logam berat lainnya cenderung stabil pada seluruh titik sampel. Kromium (Cr) memiliki nilai sebesar 1,02; tembaga (Cu) dengan nilai 0,65; dan kadmium sebesar 0,02. Nilai timbal cenderung stabil yakni 0,07 dan terjadi sedikit lonjakan pada titik 4 mencapai 0,20. Hal ini dapat terlihat pada visualisasi yang ditampilkan pada Gambar 6.

Gambar 8 menunjukkan indeks kontaminasi yang bernilai sama pada titik 1 dan 2 sebesar 8,16 yang kemudian turun menjadi 6,96 pada titik 3. Pada titik 4 nilai indeks kontaminasi kembali naik menjadi 8,09. Pada titik 5 penurunan kontaminasi terjadi hingga nilai 7,36 dan terjadi lonjakan yang cukup besar pada titik 6 mencapai nilai kadar 10,76. Nilai indeks yang didapatkan tergolong pada kelas cemaran tinggi karena memiliki nilai > 3 (Abd El- Hamid, 2017; Goni et al., 2024). Nilai indeks kontaminasi ini selaras dengan konsentrasi parameter logam berat dari masing-masing titik. Jumlah parameter yang melebihi konsentrasi kontaminan atau bahan berbahaya yang diizinkan dihitung dalam indeks kontaminasi (CD). Indeks kontaminasi menggabungkan pengaruh seluruh parameter kualitas yang dianggap berbahaya bagi air (Şener et al., 2023).

Tabel 6. Hasil Perhitungan HPI

Sebaran	Lokasi	Kromium	Tembaga	Seng	Kadmium	Timbal	HPI	Interpretasi
1	Sebelum TPA	0,001	0,179	0,064	1,843	0,110	2,197	Cemar Rendah
2	Tepat TPA	0,001	0,179	0,064	1,843	0,110	2,197	Cemar Rendah
3	Tepat TPA	0,001	0,179	0,050	1,843	0,110	2,183	Cemar Rendah
4	Tepat TPA	0,001	0,179	0,061	1,843	0,094	2,179	Cemar Rendah
5	Tepat TPA	0,001	0,179	0,054	1,843	0,110	2,188	Cemar Rendah
6	Setelah TPA	0,001	0,179	0,095	1,843	0,110	2,228	Cemar Rendah

Sumber: Data Primer 2024

Tabel 7. Hasil Perhitungan Indeks Kontaminasi (CD)

Sebaran	Lokasi	Kromium	Tembaga	Seng	Kadmium	Timbal	CD	Interpretasi
1	Sebelum TPA	1,02	0,65	6,4	0,02	0,07	8,16	Kontaminasi Tinggi
2	Tepi TPA	1,02	0,65	6,4	0,02	0,07	8,16	Kontaminasi Tinggi
3	Tepi TPA	1,02	0,65	5,2	0,02	0,07	6,96	Kontaminasi Tinggi
4	Tepi TPA	1,02	0,65	6,2	0,02	0,20	8,09	Kontaminasi Tinggi
5	Tepi TPA	1,02	0,65	5,6	0,02	0,07	7,36	Kontaminasi Tinggi
6	Tepi TPA	1,02	0,65	9	0,02	0,07	10,76	Kontaminasi Tinggi

Sumber: Data Primer, 2024

Tabel 8. Hasil Perhitungan Indeks Pencemaran (IP)

Sebaran	Lokasi	Kromium	Tembaga	Seng	Kadmium	Timbal	IP	Interpretasi
1	Sebelum TPA	1.04	0.65	5.03	0.02	0.07	3,69	Cemar Ringan
2	Tepi TPA	1.04	0.65	5.03	0.02	0.07	3,69	Cemar Ringan
3	Tepi TPA	1.04	0.65	4.58	0.02	0.07	3,36	Cemar Ringan
4	Tepi TPA	1.04	0.65	4.96	0.02	0.20	3,64	Cemar Ringan
5	Tepi TPA	1.04	0.65	4.74	0.02	0.07	3,48	Cemar Ringan
6	Setelah TPA	1.04	0.65	5.77	0.02	0.07	4,22	Cemar Ringan

Sumber: Data Primer, 2024

3.3. Indeks Pencemaran (IP)

Indeks Pencemaran merupakan perhitungan status kualitas air yang berpatokan pada Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, 2021. Perhitungan indeks pencemaran pada air Sungai Metro dilakukan menggunakan baku mutu kelas dua (II) dengan peruntukan sarana rekreasi air, budidaya ikan air tawar, peternakan, mengairi tanaman, dan atau penggunaan air yang sama. IP ditetapkan untuk satu peruntukan, dan selanjutnya dapat diperluas untuk berbagai penggunaan untuk semua bagian badan air atau sebagian dari badan air (Harahap et al., 2020). Dalam penelitian ini Indeks Pencemaran digunakan pada sebagian badan air Sungai Metro di sekitar TPA Talangagung.

Nilai indeks pencemaran (IP) yang didapatkan ada pada rentang 3,36 – 4,22. Dengan nilai tertinggi ada pada titik sampel ke 6 yang terletak setelah TPA. Rentang nilai indeks pencemaran yang diperoleh, secara keseluruhan tergolong dalam kelas cemar ringan. Kelas kontaminasi tersebut didasarkan pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 27 Tahun 2021 Tentang Indeks Kualitas Lingkungan Hidup, yakni pada rentang $1 \leq IP_j \leq 5$ yang masuk dalam klasifikasi status mutu cemar ringan.

Pada Tabel 8, indeks pencemaran dari masing-masing titik dapat dinyatakan dengan titik 6 > titik 1 > titik 2 > titik 4 > titik 5 > titik 3. Aktivitas manusia pada daerah aliran Sungai Metro sebelum TPA Talangagung dapat mempengaruhi kualitas air sungai, adanya indikasi masukan lindi ke badan air memperburuk status mutu air, yang dapat ditunjukkan pada titik 6. Dalam melakukan perhitungan IP, tidak ada sistem penilaian atau evaluasi subjektif untuk setiap parameter. Sebaliknya, parameter terpenting ditentukan berdasarkan rasio konsentrasi (Ci) terhadap standar (Lij) (Purnamasari, 2017). Hasil dari perbandingan konsentrasi dan nilai standar dapat dilihat pada Tabel 8 dengan visualisasi pada Gambar 7. Dapat diketahui bahwa urutan parameter sebagai penyumbang terbesar pada indeks pencemaran yaitu $Zn > Cr > Cu > Pb > Cd$.

Metode IP menghitung rasio konsentrasi maksimum suatu parameter terhadap baku mutunya (Ci/Lij) dan rasio rata-rata beberapa parameter kualitas air, semuanya dari satu pengumpulan sampel kualitas air. Oleh karena itu, data yang diperoleh dari pengambilan sampel tunggal mewakili kondisi kualitas air sesaat. Berdasarkan Gambar 8, titik

sebaran (*scatter plot*) IP menunjukkan adanya variasi persebaran nilai yang sama dengan indeks kontaminasi dan konsentrasi sebenarnya pada masing-masing titik.

Keterbatasan atau limitasi dalam penelitian ini terletak pada pengambilan sampel yang dilakukan secara single sampling atau pengumpulan sampel tunggal. Hal ini menyebabkan sifat data yang diperoleh hanya merepresentasikan kondisi kualitas air sesaat dan tidak dapat menggambarkan fluktuasi polutan secara temporal, seperti perbedaan konsentrasi antara musim kemarau dan musim penghujan. Selain itu, penelitian ini hanya berfokus pada lima jenis logam berat (Cr, Cu, Zn, Cd, dan Pb) di badan air sungai, tanpa menganalisis kandungan logam berat pada sedimen sungai atau jaringan biota air yang sebenarnya berpotensi menjadi tempat akumulasi jangka panjang. Ruang lingkup penelitian yang terbatas pada area sekitar TPA Talangagung juga menyebabkan hasil temuan ini tidak dapat digeneralisasi untuk seluruh aliran Sungai Metro tanpa mempertimbangkan sumber pencemaran lain dari aktivitas domestik maupun industri di sepanjang aliran sungai tersebut.

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivitas pembuangan sampah di TPA Talangagung Kabupaten Malang memberikan kontribusi nyata terhadap penurunan kualitas air Sungai Metro akibat lindi. Aliran lindi TPA yang mengalir ke Sungai Metro menyebabkan terjadinya peningkatan konsentrasi logam berat. Uji laboratorium memberikan simpulan bahwa logam Seng (Zn) menjadi parameter yang paling kritis karena konsentrasinya telah melampaui ambang batas baku mutu Kelas II menurut PP No. 22 Tahun 2021. Hal ini dipertegas oleh nilai Contamination Index (CD) yang berada pada rentang 6,96 hingga 10,76, yang mengindikasikan bahwa sungai berada dalam status kontaminasi tinggi. Meskipun nilai Heavy Metal Pollution Index (HPI) masih tergolong rendah, perbedaan hasil antar indeks ini menunjukkan bahwa meski beban polusi logam berat secara akumulatif belum mencapai level berbahaya bagi kesehatan manusia secara langsung, namun tingkat penyimpangan konsentrasi individu logam tertentu terhadap standar lingkungan sudah cukup signifikan.

Secara spasial, analisis status mutu air menggunakan metode Indeks Pencemaran (IP) menunjukkan bahwa Sungai Metro secara konsisten berada dalam kategori cemar ringan pada seluruh

titik pengamatan. Namun, peningkatan nilai indeks yang signifikan pada titik hilir (setelah lokasi TPA) dibandingkan dengan titik hulu, yang membuktikan adanya penyebaran logam berat dari area TPA ke badan air sungai. Urutan kontribusi parameter pencemar dari yang terbesar hingga terkecil adalah $Zn > Cr > Cu > Pb > Cd$. Temuan ini memberi indikasi kuat perlunya optimalisasi sistem pengolahan limbah dan pemantauan berkala terhadap kualitas air sungai, untuk mencegah akumulasi logam berat yang lebih luas yang dapat merusak ekosistem akuatik serta membahayakan masyarakat yang memanfaatkan aliran Sungai Metro. Penelitian selanjutnya perlu dilakukan dengan metode pemantauan berkala (*time-series*) atau temporal. Pemantauan berkala dapat mencakup musim kemarau dan penghujan guna memahami dinamika fluktuasi konsentrasi logam berat secara lebih akurat. Selain itu, analisis dapat diperluas melalui penelitian sedimen sungai dan jaringan biota air. Maka penelitian lanjutan dapat digunakan untuk mengevaluasi dampak bioakumulasi logam berat dalam rantai makanan yang dapat berisiko langsung terhadap kesehatan masyarakat di aliran Sungai Metro.

DAFTAR PUSTAKA

- Abd El- Hamid, H. T. (2017). Evaluation of Water Quality Pollution Indices for Groundwater Resources of New Damietta, Egypt. *MOJ Ecology & Environmental Sciences*, 2(6). <https://doi.org/10.15406/mojes.2017.02.00045>
- Abdelwaheb, M., Jebali, K., Dhaouadi, H., & Dridi-Dhaouadi, S. (2019). Adsorption of nitrate, phosphate, nickel and lead on soils: Risk of groundwater contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 179, 182–187. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.04.040>
- Abduh, M., Alawiyah, T., Apriansyah, G., Sirodj, R. A., & Afgani, M. W. (2023). Survey Design: Cross Sectional dalam Penelitian Kualitatif. *Jurnal Pendidikan Sains Dan Komputer*, 3(01), 31–39.
- Abiriga, D., Jenkins, A., Vestgarden, L. S., & Harald, K. (2021). A nature-based solution to a landfill-leachate contamination of a confined aquifer. *Scientific Reports (Nature Publisher Group)*, 11(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-021-94041-7>
- Agarwal, S., Pramanick, P., & Mitra, A. (2020). Alteration of dissolved Zinc concentration during COVID-19 lockdown phase in coastal West Bengal. *NUJS J. Regul. Stud.*, 5, 58.
- Agustina, T. (2014). *Kontaminasi Logam Berat Pada Makanan dan Dampaknya Pada Kesehatan* (Vol. 1, Number 1).
- Ainna, R. N. (2013). Analisis Kadar Logam Berat Timbal (Pb) Dalam Air Sungai Kelay Kabupaten Berau Kalimantan Timur Dengan Metode Spektrofotometri Serapan Atom (SSA). In *Makassar. Universitas Islam Negeri Alauddin. Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar*.
- Anand, N., & Palani, S. G. (2022a). A comprehensive investigation of toxicity and pollution potential of municipal solid waste landfill leachate. *Science of the Total Environment*, 838, 155891. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155891>
- Anand, N., & Palani, S. G. (2022b). A comprehensive investigation of toxicity and pollution potential of municipal solid waste landfill leachate. *Science of the Total Environment*, 838, 155891. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155891>
- Asim, M., & Nageswara Rao, K. (2021). Assessment of heavy metal pollution in Yamuna River, Delhi-NCR, using heavy metal pollution index and GIS. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(2). <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08886-6>
- Astuti, I. S., Sahoo, K., Milewski, A., & Mishra, D. R. (2019). Impact of Land Use Land Cover (LULC) Change on Surface Runoff in an Increasingly Urbanized Tropical Watershed. *Water Resources Management*, 33(12), 4087–4103. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11269-019-02320-w>
- Astuti, R. D. P., Mallongi, A., Amiruddin, R., Hatta, M., & Rauf, A. U. (2021). Risk identification of heavy metals in well water surrounds watershed area of Pangkajene, Indonesia. *Gaceta Sanitaria*, 35, S33–S37. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2020.12.010>
- Bakis, R., & Tuncan, A. (2011). An investigation of heavy metal and migration through groundwater from the landfill area of Eskisehir in Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 176(1–4), 87–98. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10661-010-1568-3>
- Bashri, A., Utami, B., & Primandiri, P. R. (2014). Pertumbuhan bibit trembesi (Samanea saman) dengan inokulasi cendawan mikoriza arbuskula pada media bekas tempat pembuangan akhir (tpa) Klotok Kediri. *Proceeding Biology Education Conference: Biology, Science, Environmental, and Learning*, 11(1), 165–169.
- Chelliapan, S., Arumugam, N., Md. Din, Mohd. F., Kamyab, H., & Ebrahimi, S. S. (2020). Anaerobic treatment of municipal solid waste landfill leachate. In *Bioreactors* (pp. 175–193). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821264-6.00011-5>
- Chettri, U., Chakrabarty, T. K., & Joshi, S. R. (2022). Pollution index assessment of surface water and sediment quality with reference to heavy metals in Teesta River in Eastern Himalayan range, India. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100742>
- Christensen, S. C. B., Lopato, L., Quinzanos, S., & Hedegaard, M. J. (2023). Does Methane Contribute to Growth of Invertebrate Communities in Drinking Water? *Water*, 15(6), 1044. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w15061044>
- Chung, S. Y., Rajesh, R., & Venkatramanan, S. (2019). Evaluation of heavy-metal contamination in groundwater using hydrogeochemical and multivariate statistical analyses. In *GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science* (pp. 331–346). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815413-7.00024-9>
- De Velásquez, M. T. O., Cruz-Rivera, R., Rojas-Valencia, N., Monje-Ramírez, I., & Sánchez-Gómez, J. (2003). Serial water balance method for predicting leachate generation in landfills. *Waste Management & Research*, 21(2), 127–136.
- Debebe, Y., Alemayehu, E., Worku, Z., Bae, W., & Lennartz, B. (2023). Sorption of 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid from Agricultural Leachate Using Termite Mound Soil: Optimization Using Response Surface Methodology. *Water*, 15(2), 327. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w15020327>
- Dewi, R. P., & Roziqin, A. (2022). Waste Governance Through the “Waste to Energy” Program at the Final Processing Site of Talangagung Education Tourism in Malang Regency. *JPPUMA Jurnal Ilmu Pemerintahan Dan Sosial*

Yuniarti, K. N. A. dan Masitoh, F. (2024). Status Pencemaran Logam Berat pada Sungai Metro di Sekitar Tempat Pembuangan Akhir Sampah (TPAS) Talangagung, Kabupaten Malang. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 23(6), 1667-1680, doi:10.14710/jil.23.6.1667-1680

- Politik Universitas Medan Area*, 10(1), 71–87. <https://doi.org/10.31289/jppuma.v10i1.6790>
- Diamanis, P. B., Mangangka, I. R., & Supit, C. J. (2022). Perencanaan TPA Sanitary Landfill Di Kecamatan Esang Kabupaten Kepulauan Talaud Sulawesi Utara. *TEKNO*, 20(82), 867–873. <https://ejournal.unsrat.ac.id/v3/index.php/teknologi/article/view/44184>
- EPA (United States Environmental Protection Agency). (2024, January 2). *National Primary Drinking Water Regulations*. <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations#two>
- Febrita, J., & Roosmini, D. (2022). Analisis Beban Pencemar Logam Berat Industri terhadap Kualitas Sungai Citarum Hulu. *Jurnal Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 7(1), 77–88. <https://doi.org/10.29244/jsil.7.1.77-88>
- Gao, J. L., Oloibiri, V., Chys, M., De Wandel, S., Decostere, B., Audenaert, W., He, Y. L., & Van Hulle, S. W. H. (2015). Integration of autotrophic nitrogen removal, ozonation and activated carbon filtration for treatment of landfill leachate. *Chemical Engineering Journal*, 275, 281–287. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.04.012>
- Ghosh, P., Thakur, I. S., & Kaushik, A. (2017). Bioassays for toxicological risk assessment of landfill leachate: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 141, 259–270. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.03.023>
- Goni, M. A., Abdullah-Al-Mamun, M., Shamim Khan, A., Hosen, L., Sathi Khatun, M., Rahman, M., Shahidul Islam, M., & Siddiquee, T. (2024). Heavy metal distribution and ecological pollution assessments in water bodies and sediments in rural areas of Bangladesh. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2024.100937>
- Harahap, M. K. A., Rudiyaniti, S., & Widyorini, N. (2020). Analisis Kualitas Perairan Berdasarkan Konsentrasi Logam Berat dan Indeks Pencemaran di Sungai Banjir Kanal Timur Semarang. *Jurnal Pasir Laut*, 4, 108.
- Hartiningsih, D., Diana, S., MS, Y., Ismail, M. R., & Sari, Q. W. (2024). Water quality pollution indices to assess the heavy metal contamination: A case study of the estuarine waters in Cirebon City (West Java, Indonesia) Pre- and post- CARE COVID-19. *Environmental and Sustainability Indicators*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100318>
- Jegadeesan, C., Somanathan, A., & Jeyakumar, R. B. (2023). Sanitary landfill leachate treatment by aerated electrochemical Fenton process. *Journal of Environmental Management*, 337, 117698. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117698>
- Karthikeyan, S., Arumugam, S., Muthumanickam, J., Kulandaisamy, P., Subramanian, M., Annadurai, R., Senapathi, V., & Sekar, S. (2021). Causes of heavy metal contamination in groundwater of Tuticorin industrial block, Tamil Nadu, India. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(15), 18651–18666. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11704-0>
- Khan, K., Lu, Y., Khan, H., Ishtiaq, M., Khan, S., Waqas, M., Wei, L., & Wang, T. (2013). Heavy metals in agricultural soils and crops and their health risks in Swat District, northern Pakistan. *Food and Chemical Toxicology*, 58, 449–458. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2013.05.014>
- Kulkarni, T., Gassmann, M., Kulkarni, C. M., Khed, V., & Buerkert, A. (2021). Deep drilling for groundwater in bengaluru, india: A case study on the city's over-exploited hard-rock aquifer system. *Sustainability (Switzerland)*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/su132112149>
- Kumar, D., & Alappat, B. J. (2005). Analysis of leachate pollution index and formulation of sub-leachate pollution indices. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 23(3), 230–239. <https://doi.org/10.1177/0734242X05054875>
- Kurniawati, D., & Budi, D. S. (2023). Examination of Heavy Metals Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Fishery Products at the Quarantine Center, Quality Control and Safety of Fishery Products, Denpasar, Bali. *Journal of Marine and Coastal Science*, 12(3), 115–120. <https://doi.org/10.20473/jmcs.v12i3.37376>
- Lampiran VI. PP Nomor 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan Dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, Pub. L. 22 (2021). <https://ppkl.menlhk.go.id/website/index.php?q=633&s=43b4d1d4656278e0d1055d505443f404f81ab422>
- Mahato, M. K., Singh, G., Singh, P. K., Singh, A. K., & Tiwari, A. K. (2017). Assessment of Mine Water Quality Using Heavy Metal Pollution Index in a Coal Mining Area of Damodar River Basin, India. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 99(1), 54–61. <https://doi.org/10.1007/s00128-017-2097-3>
- Matchett, E. L., & Fleskes, J. P. (2017). Projected Impacts of Climate, Urbanization, Water Management, and Wetland Restoration on Waterbird Habitat in California's Central Valley. *PLoS One*, 12(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169780>
- Nies, D. H. (1999). Microbial heavy-metal resistance. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 51, 730–750.
- Nivya, T. K., & Minimol Pieus, T. (2016). Comparison of Photo ElectroFenton Process(PEF) and combination of PEF Process and Membrane Bioreactor in the treatment of Landfill Leachate. *Procedia Technology*, 24, 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.05.030>
- Palaniappan, M. (2024). Investigating the influence of thermal evaporation method on the heavy metal pollution index (HPI) of groundwater. *Groundwater for Sustainable Development*, 25, 101136. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101136>
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 27 Tahun 2021 Tentang Indeks Kualitas Lingkungan Hidup (2021).
- Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan Dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, Pemerintah Pusat (2021). <https://peraturan.bpk.go.id/Details/161852/pp-no-22-tahun-2021>
- Podlasek, A., Vavrková, M. D., Jakimiuk, A., & Koda, E. (2024). Potentially toxic elements (PTEs) and ecological risk at waste disposal sites: An analysis of sanitary landfills. *PLoS ONE*, 19(5 May). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0303272>
- Purnamasari, D. E. (2017). *Penentuan Status Mutu Air Kali Wonokromo dengan Metode Storet dan Indeks Pencemar*. <https://repository.its.ac.id/43890/1/3313100004-Undergraduate-Theses.pdf>
- Ramadhawati, D., Wahyono, H. D., & Santoso, A. D. (2021). Pemantauan kualitas air sungai cisadane secara online dan analisa status mutu menggunakan metode storet. *Jurnal Sains & Teknologi Lingkungan*, 13(2), 76–91.
- Rohmayani, V., Wahyuni, H. I., Sherley, A., & Lilik, M. (2021). *Isolasi Dan Identifikasi Bakteri Indigenous Yang Berpotensi Sebagai Agen Bioremediasi Logam Berat (Cu Dan Hg) Pada Lahan Mangrove Di Desa Buduran Sidoarjo*.
- Rosihan, A., & Husaini, H. (2017). *Logam berat sekitar manusia*. Pustaka Buana. <http://eprints.ulm.ac.id/2238/1/Buku%20Logam%20Berat%20Sekitar%20Manusia%20final%2026feb2018.pdf>
- Salami, L., & Susu, A. A. (2019). A comprehensive study of leachate characteristics from three soluos dumpsites

- in Igando Area of Lagos State, Nigeria. *Greener Journal of Environmental Management and Public Safety*, 8(1), 1–14.
- Şener, E., Şener, Ş., & Bulut, C. (2023). Assessment of heavy metal pollution and quality in lake water and sediment by various index methods and GIS: A case study in Beyşehir Lake, Turkey. *Marine Pollution Bulletin*, 192, 115101. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115101>
- Setiyawan, A. (2019). *Strategi Perlakuan Terhadap Kualitas Air Sungai Metro di Ruas Pakisaji-Kepanjen di Kecamatan Pakisaji-Kepanjen Kabupaten Malang*. <http://ejurnal.malangkab.go.id/index.php/kr>
- Sistem Informasi B3 & POPs. (2024). *Mengenal Logam Berat*. Kementerian Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Direktorat Pengelolaan B3. <https://sib3pop.menlhk.go.id/index.php/articles/view?slug=mengenal-logam-berat>
- Siswoyo, E., & Habibi, G. F. (2018). Sebaran Logam Berat Cadmium (Cd) dan Timbal (Pb) Pada Air Sungai dan Sumur di Daerah Sekitar Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Wukirsari Gunung Kidul, Yogyakarta. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan (Journal of Natural Resources and Environmental Management)*, 8(1), 1–6. <https://doi.org/10.29244/jpsl.8.1.1-6>
- SNI 8995:2021 Metode Pengambilan Contoh Uji Air Untuk Pengujian Fisika Dan Kimia, BSN (2021).
- Sugrani, A., & Taufiq, N. (2023). Uji Kualitas Air Minum dan Air Sanitasi yang ada pada UPT SPF SDN Komplek IKIP. *Jurnal Ilmiah Pengabdian Kepada Masyarakat JIPAM*, 2(2), 61–120. <https://doi.org/10.55883/jipam.v2i2>
- Sulistiyowati, L., Nurhasanah, N., Riani, E., & Cordova, M. (2023). Heavy metals concentration in the sediment of the aquatic environment caused by the leachate discharge from a landfill. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 34, 323–336. <https://doi.org/DOI:10.22034/gjesm.2023.02.11>
- Tesseme, A. T., Vinti, G., & Vaccari, M. (2022). Pollution potential of dumping sites on surface water quality in Ethiopia using leachate and comprehensive pollution indices. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(8). <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10661-022-10217-2>
- Teta, C., & Hikwa, T. (2017). Heavy Metal Contamination of Groundwater from an Unlined Landfill in Bulawayo, Zimbabwe. *Journal of Health & Pollution*, 7(15), 18–27.
- Tyagi, S., Sharma, B., Singh, P., & Dobhal, R. (2013). Water quality assessment in terms of water quality index. *American Journal of Water Resources*, 1(3), 34–38.
- Undang-Undang (UU) Nomor 18 Tahun 2008 Tentang Pengelolaan Sampah, JDIH BPK (2008). <https://peraturan.bpk.go.id/Details/39067/uu-no-18-tahun-2008>
- Uugwanga, M. N., & Kgabi, N. A. (2021). Heavy metal pollution index of surface and groundwater from around an abandoned mine site, Klein Aub. *Physics and Chemistry of the Earth*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2021.103067>
- WHO (World Health Organization). (2021). *A global overview of national regulations and standards for drinking-water quality Second edition* (Second Edition). World Health Organization.
- Woldearegay, K., Grum, B., Hessel, R., van Steenberg, F., Fleskens, L., Yazew, E., Tamene, L., Mekonnen, K., Reda, T., & Haftu, M. (2023). Watershed management, groundwater recharge and drought resilience: An integrated approach to adapt to rainfall variability in northern Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.08.009>
- Yetti, E., Soedharma, D., Haryadi, S., Kelautan, D. T., Perikanan, F., Kelautan, D., & Bogor, P. (2011). *Evaluasi Kualitas Air Sungai-Sungai di Kawasan Das Brantas Hulu Malang Dalam Kaitannya Dengan Tata Guna Lahan dan Aktivitas Masyarakat di Sekitarnya* (Number 1).
- Zamrisha, N. A. F., Wahab, A. M. A., Zainal, A., Karadag, D., Bhutada, D., Suhartini, S., Musa, M. A., & Idrus, S. (2023). State of the Art in Anaerobic Treatment of Landfill Leachate: A Review on Integrated System, Additive Substances, and Machine Learning Application. *Water*, 15(7), 1303. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w15071303>
- Zhao, Y., Yang, Q., & Yuan, P. (2020). Study on the Influence of Land Use on Water Environment Quality in Riverside Zone Based on GIS. *Applied Sciences*, 10(4), 1262. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app10041262>
- Zheng, B., Lu, S., Wu, J., Guo, X., Wu, F., Li, X., He, Q., Fu, Z., & Xu, L. (2018). Heavy metal distribution in Tiaoxi River's sediment. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 2603–2613.