

JURNAL METAMORFOSA
Journal of Biological Sciences
eISSN: 2655-8122
<https://ejournal3.unud.ac.id/index.php/metamorfosa/>

Distribusi Logam Berat Arsenik, Timbal, dan Kadmium di Sekitar Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Sampah Suwung Denpasar, Bali

Distribution of Heavy Metals Arsenic, Lead, and Cadmium Around the Suwung Final Waste Processing Site (TPA) in Denpasar, Bali

Arniwati¹, I Made Sara Wijana^{2*}, I Ketut Muksin³

^{1,2,3} Program Studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Udayana, Bali

*Email: sarawijana@unud.ac.id

INTISARI

Kontaminasi logam berat di sekitar Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) merupakan masalah lingkungan serius yang memerlukan perhatian, terutama di Indonesia. Peningkatan jumlah penduduk dan aktivitas konsumsi masyarakat meningkatkan risiko pencemaran logam berat seperti arsenik (As), timbal (Pb), dan kadmium (Cd). Penelitian ini bertujuan menganalisis distribusi vertikal dan horizontal logam berat di sekitar TPA Suwung. Metode yang digunakan adalah purposive random sampling, dengan pengambilan sampel tanah pada empat titik pengamatan berdasarkan jarak dari pusat TPA (25 m, 50 m, dan 100 m). Pada tiap titik, sampel diambil pada tiga kedalaman (0–20 cm, 20–40 cm, dan 40–60 cm). Data dianalisis secara deskriptif. Hasil menunjukkan kadar tertinggi As sebesar 196,132 mg/kg (Titik 2, 25 m, 20 cm), Pb sebesar 1.267,95 mg/kg (Titik 3, 25 m, 20 cm), dan Cd sebesar 5,27 mg/kg (Titik 3, 25 m, 60 cm). Secara vertikal, konsentrasi tinggi banyak ditemukan pada lapisan 0–20 cm, tetapi Pb dan Cd pada Titik 3 meningkat kembali pada kedalaman 60 cm. Secara horizontal, konsentrasi cenderung lebih tinggi pada jarak 25 m, meskipun pola sebaran tidak selalu menurun seiring bertambahnya jarak. Nilai Contamination Factor (Cf) dan Pollution Index (PI) menunjukkan tingkat kontaminasi yang bervariasi antar titik dan kedalaman.

Kata kunci: kontaminasi, pencemaran tanah, sedimen tanah, TPA

ABSTRACT

This study evaluated the vertical and horizontal distribution of heavy metal contamination—specifically arsenic (As), lead (Pb), and cadmium (Cd)—in soil surrounding the Suwung landfill in Denpasar. A total of 36 soil samples were collected using purposive random sampling across four observation points at distances of 25, 50, and 100 meters from the landfill center, taking depth profiles of 0–20 cm, 20–40 cm, and 40–60 cm for descriptive analysis at Udayana University. Peak concentrations recorded were 196.132 mg/kg for As (Point 2, 25 m distance, 20 cm depth), 1267.95 mg/kg for Pb (Point 3, 25 m distance, 20 cm depth), and 5.27 mg/kg for Cd (Point 3, 25 m distance, 60 cm depth). Vertically, heavy metals accumulated predominantly in the topsoil (0–20 cm), though Pb and Cd levels at Point 3 unexpectedly spiked again at the 60 cm depth. Horizontally, while contamination was generally higher closer to the landfill center (25 m), concentrations did not decrease consistently with increasing distance, resulting in varying Contamination Factor (Cf) and Pollution Index (PI) values across sampling locations and depths.

Keywords: contamination, soil pollution, soil sediment, landfill

PENDAHULUAN

Kontaminasi logam berat di sekitar Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) merupakan isu serius di Indonesia karena berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan maupun kesehatan manusia. TPA Suwung di Denpasar, Bali, yang merupakan TPA terbesar di pulau Bali, beroperasi sejak tahun 1980 dengan luas ± 40 hektar dan menampung sekitar 1.500 ton sampah per hari, mayoritas berupa sampah rumah tangga (Setiawan *et al.*, 2023; Angriyasa *et al.*, 2018). Meskipun TPA dirancang untuk meminimalisasi dampak lingkungan, kenyataannya banyak TPA masih belum memenuhi standar pengelolaan, terutama dalam mencegah kontaminasi lingkungan (Muyassar & Budianta, 2021).

Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) merupakan sisa suatu usaha dan/atau kegiatan yang memiliki risiko tinggi terhadap kelestarian lingkungan. Berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021, limbah B3 didefinisikan sebagai residu yang secara langsung maupun tidak langsung—baik dari sifat, konsentrasi, maupun jumlahnya—berpotensi mencemari dan merusak lingkungan hidup, serta mengancam kesehatan manusia dan makhluk hidup lainnya. Salah satu polutan utama yang menjadi perhatian serius dalam limbah B3 adalah keberadaan logam berat toksik, seperti timbal (Pb), arsenik (As), dan kadmium (Cd), yang sering terakumulasi akibat aktivitas industri.

Faktor penting yang mempengaruhi distribusi logam berat di TPA Suwung adalah metode pengelolaan sampah. TPA ini awalnya direncanakan menggunakan sistem sanitary landfill, tetapi kenyataannya praktik yang berlangsung adalah open dumping (Arbain *et al.*, 2021). Open dumping mengakibatkan sampah ditimbun tanpa lapisan pelindung, sehingga meningkatkan risiko kontaminasi terhadap tanah dan air (Sukarmawati *et al.*, 2023). Lindi hasil perkolasi air hujan pada timbunan sampah membawa logam berat, yang dapat meresap ke tanah (vertikal) atau terbawa ke badan air di sekitar TPA (horizontal), termasuk sungai dan laut (Muliarta *et al.*, 2023; Septiariva & Suryawan, 2021).

Studi terdahulu di beberapa TPA di Indonesia membuktikan adanya akumulasi logam berat di tanah dan air tanah. Penelitian Muyassar dan Budianta (2021) di TPA Piyungan, Yogyakarta, menunjukkan konsentrasi logam berat tinggi pada kedalaman 25 cm dan menurun pada kedalaman lebih dalam. Hal ini menegaskan pentingnya analisis distribusi vertikal dan horizontal pencemaran logam berat di TPA Suwung sebagai dasar mitigasi lingkungan.

Berdasarkan permasalahan di atas, penelitian ini dilakukan dengan maksud untuk memahami pola distribusi pencemaran logam berat Arsenik (As), Timbal (Pb), dan Kadmium (Cd) di sekitar TPA Suwung. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pola distribusi vertikal dan horizontal kontaminasi logam berat pada tanah sekitar TPA Suwung, Denpasar, Bali dan menganalisis tingkat kontaminasi dan tingkat pencemaran logam berat As, Pb, dan Cd di sekitar TPA Suwung.

Secara akademis, penelitian ini diharapkan berkontribusi dalam pengembangan ilmu lingkungan, khususnya kajian mengenai distribusi pencemaran logam berat di kawasan TPA. Selain itu, hasil penelitian dapat menjadi rujukan bagi pemerintah daerah dan instansi terkait dalam merancang strategi pengelolaan sampah dan mitigasi pencemaran, serta memberikan edukasi bagi masyarakat sekitar agar lebih waspada terhadap risiko lingkungan.

BAHAN DAN METODE

Metode Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan metode purposive random sampling dengan pendekatan deskriptif kuantitatif untuk menggambarkan hasil yang diperoleh dalam penelitian. Penelitian ini dilaksanakan

mulai bulan Januari 2024 hingga Februari 2025 di sekitar Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Suwung, Denpasar, Bali.

Waktu dan Tempat Pelaksanaan

Pengambilan sampel dilakukan di sekitar TPA Suwung yang terbagi menjadi dua stasiun lokasi, yaitu stasiun pertama di wilayah mangrove dan stasiun kedua di wilayah pemukiman. Pengambilan sampel dilakukan pada tiga kedalaman tanah, yakni 0-20 cm, 20-40 cm, dan 40-60 cm. Pengambilan sampel disesuaikan dengan pasang surut untuk memastikan representasi yang akurat terkait kondisi ekologis yang sering berubah. Pelaksanaan analisis logam berat dilakukan di Laboratorium Analitik Universitas Udayana. Peta lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Penelitian
(Sumber: Google Earth 2024)

Variabel Penelitian

Penelitian ini mengkaji distribusi logam berat di sekitar TPA Suwung, Denpasar, Bali, dengan fokus pada distribusi vertikal dan horizontal logam berat. Variabel penelitian terdiri dari dua jenis, yaitu variabel bebas dan variabel terikat:

Variabel Bebas:

1. Jarak titik pengambilan sampel tanah dari pusat TPA: 0-25 meter, 25-50 meter, dan 50-100 meter.
2. Kedalaman tanah: 0-20 cm, 20-40 cm, dan 40-60 cm.

Variabel Terikat:

1. Konsentrasi logam berat pada sampel tanah, yang meliputi tiga jenis logam berat: Timbal (Pb), Kadmium (Cd), dan Arsenik (As). Pengukuran dilakukan dengan menggunakan metode

Spektrofotometri Serapan Atom (Atomic Absorption Spectrophotometry / AAS) di Laboratorium Analitik Universitas Udayana.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi pola distribusi kontaminasi logam berat secara vertikal dan horizontal, serta untuk menentukan hubungan antara jarak dan kedalaman tanah dengan konsentrasi logam berat di area sekitar TPA Suwung.

Pelaksanaan Penelitian

Penelitian ini menggunakan Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) untuk menganalisis konsentrasi logam berat pada sampel tanah yang diambil dari area sekitar TPA Suwung, Denpasar, Bali. Proses penelitian terdiri dari empat langkah utama, yaitu pengambilan sampel tanah, penyiapan dan pengolahan sampel tanah, pengujian dan ekstraksi logam berat, serta analisis logam berat menggunakan SSA.

Pengambilan Sampel Tanah

Sampel tanah diambil di area sekitar TPA Suwung dengan radius pengambilan yaitu 0-25 meter, 25-50 meter, dan 50-100 meter. Pada setiap titik pengamatan, sampel diambil pada tiga kedalaman tanah: 0-20 cm, 20-40 cm, dan 40-60 cm. Total sampel yang diambil sebanyak 36 sampel tanah.

Teknik pengambilan sampel dilakukan secara stratified random sampling untuk memetakan sebaran kontaminasi secara optimal, menggunakan Soil Core Sampler atau pipa coring. Sampel tanah sebanyak sekitar 100–300 g dimasukkan ke dalam wadah tertutup dan dibawa ke Laboratorium Analitik Universitas Udayana untuk analisis lebih lanjut. Pengambilan sampel dilakukan pada hari yang sama dengan analisis untuk menjaga konsistensi penanganan sampel.

Ekstraksi Logam Berat

Prosedur ekstraksi logam berat dimulai dengan menimbang 1 gram sampel tanah, kemudian dimasukkan ke dalam gelas beaker. Setelah itu, sampel tanah ditambahkan dengan larutan asam nitrat (HNO_3) pekat melalui metode 4x2 (penambahan bertahap). Sampel dipanaskan di water bath pada suhu sekitar 80-100°C hingga sampel mengering. Setelah itu, larutan didinginkan dan ditambahkan aquades sampai volume mencapai 40 mL, kemudian dipanaskan kembali hingga volume sampel mengering. Proses ini diulang untuk mendapatkan hasil yang optimal.

Setelah pemanasan, sampel diencerkan dengan menambahkan aquades hingga mencapai volume 50 mL dan kemudian dihomogenkan. Sampel yang sudah diencerkan disaring menggunakan kertas saring untuk memisahkan padatan dari filtrat yang mengandung logam berat terlarut. Larutan yang telah disaring kemudian dianalisis menggunakan AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometry*).

Metode Pengolahan Data

Data hasil analisis logam berat disajikan dalam bentuk tabel untuk menggambarkan konsentrasi logam berat secara deskriptif. Standar baku mutu untuk arsenik (As), timbal (Pb), dan kadmium (Cd) dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Standar Baku Mutu Logam Berat

Logam Berat	Standar Baku Mutu (mg/kg)
Arsenik (As)	WHO: 20 mg/kg
Timbal (Pb)	EPMC 2015: 80 mg/kg
Kadmium (Cd)	EPMC 2015: 0,6 mg/kg

Setelah itu, Faktor Kontaminasi akan dihitung untuk menilai tingkat pencemaran tanah berdasarkan standar yang diadopsi dari Lacatusu (2000). Formula untuk Cf adalah:

$$Cf = Cm / Cb$$

Keterangan:

- Cm = Konsentrasi logam berat yang terdeteksi dalam sampel tanah
- Cb = Nilai ambang batas untuk logam tersebut

Indeks Polusi akan digunakan untuk mengevaluasi tingkat kontaminasi keseluruhan, dihitung menggunakan rumus berikut:

$$PI = (Cf1 + Cf2 + Cf3 + ... + Cfn) / n$$

Tabel 2. Makna Nilai Indeks Cf/PI

Cf	Tingkat Kontaminasi	PI	Tingkat Pencemaran
< 0,1	Sangat Ringan	1,1-2,0	Sangat Ringan
0,10-0,25	Ringan	2,0-4,0	Ringan
0,26-0,5	Sedang	4,1-8,0	Sedang
0,51-0,75	Berat	8,1-16	Berat
0,76-1,00	Sangat Berat	>16	Sangat Berat

Sumber: Lacatusu (2000), dikutip dari Khasanah *et al.* (2021)

HASIL

Hasil penelitian menunjukkan distribusi logam berat timbal (Pb), kadmium (Cd), dan arsenik (As) pada sampel tanah di sekitar Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Suwung, Denpasar, Bali. Konsentrasi logam berat diukur menggunakan Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). Tabel 3 menyajikan kadar logam berat pada berbagai titik sampel dengan variasi kedalaman 20, 40, dan 60 cm serta jarak 25, 50, dan 100 m dari pusat TPA.

Tabel 3. Kadar Logam Timbal (Pb), Kadmium (Cd), dan Arsenik (As) pada Sampel Tanah di Sekitar TPA Suwung

Kode Sampel		Metode	Kadar (mg/kg)		
			Timbal (Pb)	Kadmium (Cd)	Arsenik (As)
Titik 1	25 m	Spektrometri	37,579	3,118	184,077
	40 cm		0	0	5,831
	60 cm		2,008	0,097	17,362

Kode Sampel			Metode	Kadar (mg/kg)		
				Timbal (Pb)	Kadmium (Cd)	Arsenik (As)
	50 m	20 cm	Spektrometri	0	0	0
		40 cm		1,454	0,01	15,994
		60 cm		0,63	0	7,974
	100 m	20 cm		0	0	5,089
		40 cm		2,29	0,04	17,897
		60 cm		0,102	0	5,243
Titik 2	25 m	20 cm		24,6	2,121	196,132
		40 cm		43,908	3,799	39,244
		60 cm		14,472	1,147	65,304
	50 m	20 cm		3,33	0,082	19,166
		40 cm		0	0	153,252
		60 cm		0	0	0
	100 m	20 cm		23,717	1,728	110,043
		40 cm		0	0	0
		60 cm		0	0	0
Titik 3	25 m	20 cm	Spektrometri	1.267,95	4,87	132,07
		40 cm		0,00	0,00	96,50
		60 cm		1.105,07	5,27	74,36
	50 m	20 cm		0	0	0
		40 cm		2,332	0	16,943
		60 cm		3,489	0,037	16,671
	100 m	20 cm		19,513	0,975	95,746
		40 cm		9,912	0,247	40,385
		60 cm		52,995	3,962	46,102
Titik 4	25 m	20 cm	Spektrometri	0	0	25,587
		40 cm		4,515	0	18,773
		60 cm		0,872	0,185	5,021
	50 m	20 cm		0	0	0
		40 cm		32,029	2,813	30,62
		60 cm		0,957	0	2,541
	100 m	20 cm		13,163	0,349	50,646

Kode Sampel	Metode	Kadar (mg/kg)		
		Timbal (Pb)	Kadmium (Cd)	Arsenik (As)
40 cm		10,65	0,604	62,659
60 cm		0	0	36,489
Baku Mutu		80 mg/kg	0,6 mg/kg	20 mg/kg

Keterangan: Kadar logam berat dinyatakan dalam mg/kg. Kadar maksimum As ditemukan pada Titik 2 (25 m; 20 cm), kadar maksimum Pb pada Titik 3 (25 m; 20 cm), dan kadar maksimum Cd pada Titik 3 (25 m; 60 cm).

Berdasarkan Tabel 3, kadar arsenik (As) tertinggi adalah 196,132 mg/kg pada Titik 2 dengan jarak 25 m dan kedalaman 20 cm. Kadar timbal (Pb) tertinggi mencapai 1.267,95 mg/kg pada Titik 3 dengan jarak 25 m dan kedalaman 20 cm. Kadar kadmium (Cd) tertinggi adalah 5,27 mg/kg pada Titik 3 dengan jarak 25 m dan kedalaman 60 cm. Pada beberapa lokasi konsentrasi menurun dengan bertambahnya kedalaman, tetapi pola tersebut tidak konsisten pada seluruh titik pengamatan.

Penilaian tingkat pencemaran dilakukan menggunakan Contamination Factor (Cf) dan Pollution Index (PI), sebagaimana disajikan pada Tabel 4. Nilai Cf dihitung untuk masing-masing logam, sedangkan PI merangkum tingkat pencemaran pada setiap kombinasi titik, jarak, dan kedalaman.

Tabel 4. Data Hasil Pengamatan Cf dan PI

Kode Sampel		Metode	Kadar (mg/kg)			Cf			PI
			Timbal (Pb)	Kadmium (Cd)	Arsenik (As)	Timbal (Pb)	Kadmium (Cd)	Arsenik (As)	
Titik 1	25 m	20 cm	37,579	3,118	184,077	0,470	5,197	9,204	4,957
		40 cm	0	0	5,831	0,000	0,000	0,292	0,097
		60 cm	2,008	0,097	17,362	0,025	0,162	0,868	0,352
	50 m	20 cm	0	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000
		40 cm	1,454	0,01	15,994	0,018	0,017	0,800	0,278
		60 cm	0,63	0	7,974	0,008	0,000	0,399	0,136
	100 m	20 cm	0	0	5,089	0,000	0,000	0,254	0,085
		40 cm	2,29	0,04	17,897	0,029	0,067	0,895	0,330
		60 cm	0,102	0	5,243	0,001	0,000	0,262	0,088
Titik 2	25 m	20 cm	24,6	2,121	196,132	0,308	3,535	9,807	4,550
		40 cm	43,908	3,799	39,244	0,549	6,332	1,962	2,948
		60 cm	14,472	1,147	65,304	0,181	1,912	3,265	1,786
	50 m	20 cm	3,33	0,082	19,166	0,042	0,137	0,958	0,379
		40 cm	0	0	153,252	0,000	0,000	7,663	2,554
		60 cm	0	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000
	100 m	20 cm	23,717	1,728	110,043	0,296	2,880	5,502	2,893
		40 cm	0	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000
		60 cm	0	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000

Kode Sampel		Metode	Kadar (mg/kg)			Cf			PI
			Timbal (Pb)	Kadmium (Cd)	Arsenik (As)	Timbal (Pb)	Kadmium (Cd)	Arsenik (As)	
Titik 3	25 m	20 cm	1.267,95	4,87	132,07	15,849	8,113	6,604	10,189
		40 cm	0,00	0,00	96,50	0,000	0,000	4,825	1,608
		60 cm	1.105,07	5,27	74,36	13,813	8,775	3,718	8,769
	50 m	20 cm	0	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000
		40 cm	2,332	0	16,943	0,029	0,000	0,847	0,292
		60 cm	3,489	0,037	16,671	0,044	0,062	0,834	0,313
	100 m	20 cm	19,513	0,975	95,746	0,244	1,625	4,787	2,219
		40 cm	9,912	0,247	40,385	0,124	0,412	2,019	0,852
		60 cm	52,995	3,962	46,102	0,662	6,603	2,305	3,190
		20 cm	0	0	25,587	0,000	0,000	1,279	0,426
		40 cm	4,515	0	18,773	0,056	0,000	0,939	0,332
		60 cm	0,872	0,185	5,021	0,011	0,308	0,251	0,190
Titik 4	50 m	20 cm	0	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000
		40 cm	32,029	2,813	30,62	0,400	4,688	1,531	2,207
		60 cm	0,957	0	2,541	0,012	0,000	0,127	0,046
	100 m	20 cm	13,163	0,349	50,646	0,165	0,582	2,532	1,093
		40 cm	10,65	0,604	62,659	0,133	1,007	3,133	1,424
		60 cm	0	0	36,489	0,000	0,000	1,824	0,608

Tabel 4 menunjukkan bahwa nilai Cf bervariasi antarlogam dan lokasi. Cf arsenik tertinggi terdapat pada Titik 2 (25 m; 20 cm) sebesar 9,807, sedangkan Cf timbal dan kadmium tertinggi terdapat pada Titik 3 (25 m) dengan nilai masing-masing 15,849 pada kedalaman 20 cm dan 8,775 pada kedalaman 60 cm. Nilai-nilai tersebut menunjukkan bahwa tingkat kontaminasi tidak seragam secara spasial maupun vertikal.

Pola distribusi kontaminasi secara vertikal dan horizontal diinterpretasikan berdasarkan perubahan kadar logam berat pada kedalaman dan jarak yang berbeda dari pusat TPA Suwung.

Dari hasil yang diperoleh, dapat disimpulkan bahwa Arsenik (As) adalah logam berat yang paling dominan terdeteksi di sekitar TPA Suwung, dengan konsentrasi yang sering kali melebihi ambang batas baku mutu yang ditetapkan oleh WHO (20 mg/kg). Hal ini menunjukkan adanya potensi pencemaran serius di wilayah sekitar TPA yang perlu mendapat perhatian lebih lanjut dari pihak berwenang untuk pengelolaan limbah yang lebih baik. Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd) juga terdeteksi, meskipun dengan konsentrasi yang relatif lebih rendah, namun tetap berpotensi memberikan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan.

Dengan demikian, hasil penelitian ini memberikan gambaran yang jelas mengenai tingkat pencemaran logam berat di sekitar TPA Suwung dan memberikan rekomendasi untuk pengelolaan TPA yang lebih baik guna mengurangi risiko pencemaran lebih lanjut.

PEMBAHASAN

Pola Distribusi Vertikal Logam Berat Arsenik (As), Timbal (Pb), dan Kadmium (Cd)

Distribusi vertikal logam berat di sekitar TPA Suwung menunjukkan variasi yang signifikan, baik antar unsur logam, kedalaman, maupun jarak dari sumber pencemar. Secara umum, konsentrasi tertinggi logam berat ditemukan pada lapisan permukaan (20 cm), seperti yang terlihat pada Arsenik (As) di Titik 1 dan Titik 2 pada jarak 25 m, di mana nilainya jauh melebihi baku mutu yang ditetapkan oleh WHO (20 mg/kg). Pola ini sejalan dengan karakteristik logam berat yang cenderung terakumulasi di horizon atas tanah akibat proses deposisi langsung dari lindi atau limpasan permukaan (Hanif & Pohan, 2024).

Namun, tidak semua logam menunjukkan tren yang konsisten. Di Titik 2 dan Titik 4, pada kedalaman 40 cm, ditemukan konsentrasi logam berat yang lebih tinggi dibandingkan pada kedalaman permukaan 20 cm. Fenomena ini bisa disebabkan oleh akumulasi kontaminasi sebelumnya yang diikuti oleh proses penambahan sedimen akibat limpasan yang mengandung sedimen. Hal ini juga dipengaruhi oleh topografi lokasi, di mana Titik 2 dan Titik 4 terletak di area yang lebih rendah dibandingkan daerah sekitar, yang memungkinkan akumulasi logam berat pada kedalaman yang lebih dalam.

Anomali distribusi vertikal juga terlihat pada Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd) di Titik 3, di mana konsentrasi meningkat lagi pada kedalaman 60 cm setelah sebelumnya menurun pada kedalaman 40 cm. Fenomena ini dapat diinterpretasikan sebagai aliran preferensial vertikal, di mana lindi mengalir melalui makropori atau retakan tanah dan kemudian menyusup pada lapisan yang lebih dalam, seperti yang telah dibahas oleh Zhang *et al.* (2021). Tanah berstruktur granular atau berpori besar sangat memungkinkan terjadinya distribusi yang tidak merata dari kontaminan ini.

Peran kondisi geokimia tanah juga sangat berpengaruh terhadap pola distribusi logam berat. Arsenik (As), misalnya, memiliki mobilitas yang sangat dipengaruhi oleh kondisi redoks tanah, di mana kondisi reduktif dapat menyebabkan pelepasan arsen dari oksida besi atau mangan yang semula mengikatnya (Burnol *et al.*, 2007). Hal ini menjelaskan mengapa pada beberapa titik, seperti Titik 4 pada kedalaman 60 cm dan jarak 100 m, konsentrasi arsen lebih tinggi dibandingkan lapisan atas tanah.

Sementara itu, Timbal (Pb) memiliki afinitas kuat terhadap bahan organik dan mineral liat, sehingga cenderung bertahan di lapisan permukaan atau menengah (Sipos *et al.*, 2005). Sebaliknya, Kadmium (Cd) menunjukkan perilaku yang lebih bervariasi, bergantung pada pH dan kandungan bahan organik tanah. Pada tanah yang lebih masam, akumulasi kadmium cenderung meningkat, yang menjelaskan mengapa kadmium pada Titik 4 di kedalaman 40 cm dan 60 cm lebih tinggi dibandingkan lapisan permukaan (Wang *et al.*, 2022).

Secara keseluruhan, distribusi vertikal logam berat di sekitar TPA Suwung menggambarkan interaksi kompleks antara proses fisik dan kimia, seperti infiltrasi, aliran preferensial, adsorpsi, dan desorpsi yang dipengaruhi oleh kondisi redoks tanah.

Pola Distribusi Horizontal Logam Berat Arsenik (As), Timbal (Pb), dan Kadmium (Cd)

Pola distribusi horizontal logam berat pada kedalaman yang sama memperlihatkan kecenderungan yang tidak selalu menurun seiring bertambahnya jarak dari pusat TPA. Sebagai contoh, pada Arsenik (As) di kedalaman 20 cm, konsentrasi tinggi ditemukan pada jarak 25 m, kemudian menurun tajam di jarak 50 m, namun kembali meningkat di beberapa titik pada jarak 100 m. Fenomena ini terlihat jelas di Titik 2, Titik 3, dan Titik 4, di mana konsentrasi arsen pada jarak 100 m masih melebihi baku mutu, sementara di 50 m hampir tidak terdeteksi. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi horizontal logam berat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti arah dan kecepatan aliran air tanah, serta keberadaan lapisan yang lebih kedap atau lebih berpori, yang memengaruhi pergerakan kontaminan di dalam tanah.

Fenomena serupa juga terjadi pada Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd) di kedalaman 20 cm. Di Titik 4, kedua logam tersebut tidak terdeteksi pada jarak 25 m dan 50 m, tetapi muncul pada jarak 100 m. Sebaliknya, di Titik 1, konsentrasi tinggi terdeteksi pada jarak 25 m, namun hilang pada jarak 50 m dan 100 m. Perbedaan distribusi ini kemungkinan besar dipengaruhi oleh aliran air tanah yang tidak seragam, yang menyebabkan kontaminan tidak menyebar secara merata ke segala arah.

Pada kedalaman 40 cm, distribusi horizontal menunjukkan kompleksitas yang lebih tinggi. Arsenik (As) di Titik 4 menunjukkan peningkatan konsentrasi seiring bertambahnya jarak, sementara di Titik 2, puncak konsentrasi terjadi pada jarak 50 m, sebelum turun drastis pada 100 m. Kadmium (Cd) pada kedalaman yang sama di Titik 4 juga memperlihatkan pola yang serupa, dengan nilai tinggi pada jarak 50 m dan 100 m, namun tidak terdeteksi pada jarak 25 m. Hal ini dapat dijelaskan oleh pengaruh heterogenitas lateral, seperti lapisan lempung atau pasir dalam tanah yang mengubah arah dan kedalaman aliran lindi.

Secara keseluruhan, distribusi horizontal logam berat menunjukkan bahwa jarak dari sumber pencemar tidak selalu berbanding lurus dengan penurunan konsentrasi logam berat. Faktor-faktor seperti aliran preferensial, heterogenitas litologi, dan kondisi geokimia tanah memengaruhi pola sebaran logam berat secara horizontal (Jørgensen *et al.*, 2002).

Analisis Tingkat Kontaminasi (Cf) dan Pencemaran (PI) Logam Berat di Sekitar TPA Suwung Denpasar, Bali

Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 4, nilai Contamination Factor (Cf) dan Pollution Index (PI) menunjukkan variasi tingkat kontaminasi tanah menurut titik pengamatan, jarak, dan kedalaman. Pada beberapa titik, terutama pada jarak 25 m, nilai Cf arsenik, timbal, atau kadmium mencapai kategori kontaminasi tinggi berdasarkan klasifikasi yang digunakan dalam penelitian ini.

Sebagai contoh, di Titik 1 (25 m, 20 cm), nilai Cf untuk Timbal (Pb) adalah 0,470 (sedang), namun Kadmium (Cd) dan Arsenik (As) memiliki nilai Cf yang sangat tinggi, yaitu 5,197 dan 9,204. Hal ini menghasilkan Pollution Index (PI) sebesar 4,957, yang tergolong pencemaran sedang. Penurunan nilai PI pada kedalaman 40 cm dan 60 cm menunjukkan bahwa logam berat terkonsentrasi di lapisan atas tanah.

Pada Titik 3 (25 m; 20 cm), PI mencapai 10,189 dan termasuk kategori pencemaran berat berdasarkan klasifikasi pada Tabel 2. Pada lokasi yang sama, kedalaman 60 cm masih menunjukkan PI sebesar 8,769. Sementara itu, nilai PI pada Titik 4 umumnya lebih rendah, meskipun beberapa kombinasi jarak dan kedalaman tetap menunjukkan peningkatan kontaminasi.

Secara keseluruhan, hasil analisis Cf dan PI menunjukkan bahwa Arsenik (As) dan Kadmium (Cd) adalah penyumbang utama pencemaran di sekitar TPA Suwung. Oleh karena itu, diperlukan langkah-langkah pengelolaan tanah dan air yang lebih baik untuk mengendalikan penyebaran kontaminasi logam berat di wilayah ini.

KESIMPULAN

Distribusi logam berat di sekitar TPA Suwung menunjukkan pola yang tidak seragam. Konsentrasi tinggi banyak ditemukan pada lapisan 0–20 cm dan pada jarak 25 m, tetapi pada beberapa titik terjadi peningkatan kembali pada kedalaman 40–60 cm atau pada jarak 100 m. Nilai Cf dan PI juga bervariasi antarlogam, titik, jarak, dan kedalaman, dengan beberapa lokasi menunjukkan tingkat kontaminasi sedang hingga berat. Temuan ini menunjukkan bahwa pola sebaran logam berat dipengaruhi oleh kombinasi kedalaman, jarak, dan kondisi lokal di sekitar TPA Suwung.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustina, T. (2014). Kontaminasi logam berat pada makanan dan dampaknya pada kesehatan. *Teknoba*, 1(1), 53-65.
- Ahmed, S. F., Kumar, P. S., Rozbu, M. R., Chowdhury, A. T., Nuzhat, S., Rafa, N., Mahlia, T. M. I., Ong, H. C., & Mofijur, M. (2022). Toksisitas logam berat, sumber, dan teknik pemulihan air dan tanah yang terkontaminasi. *Jurnal Teknologi dan Inovasi Lingkungan*, 25(2), 1-27.
- Angriyasa, I. K. J., Mahayana, I. M. B., & Hadi, M. C. (2018). Hubungan pengetahuan personal hygiene dengan gejala penyakit kulit pada pemulung di tempat pembuangan akhir sampah Suwung Denpasar tahun 2018. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 1(2), 51-58. <https://doi.org/10.33992/jkl.v8i2.364>
- Arbain, M., Mardana, N. K., & Sudana, I. B. (2021). Pengaruh air lindi tempat pembuangan akhir sampah Suwung terhadap kualitas air tanah dangkal di sekitarnya di Kelurahan Pedungan Kota Denpasar. *Jurnal Harian Regional*, 3(2), 55-60. <https://www.neliti.com/publications/387818/pengaruh-air-lindi-tempat-pembuangan-akhir-sampah-suwung-terhadap-kualitas-air-t#cite>
- Fathassabilla, A. G., & Budianta, W. (2023). Pencemaran tanah oleh Pb dan Cd di sekitar tempat pembuangan akhir (TPA) Putri Cempo, Kota Surakarta. *Kurvatek*, 8(1), 81-92. <https://doi.org/10.33579/krvtk.v8i1.3919>
- Bali, A. S., & Sidhu, G. P. S. (2021). Heavy metal contamination indices and ecological risk assessment index to assess metal pollution status in different soils. In *Heavy metals in the environment* (pp. 87-98). Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/chapter/edited-volume/abs/pii/B9780128216569000055>
- Barzan, M. (2024). Distribusi vertikal mikroplastik pada sedimen di pesisir Kabupaten Aceh Besar dan Kota Banda Aceh (Doctoral dissertation, UIN Ar-Raniry Fakultas Sains dan Teknologi. <https://repository.ar-raniry.ac.id/id/eprint/37183>
- Putra, T. I., Setyowati, N., & Apriyanto, E. (2019). Identifikasi jenis dan pengelolaan limbah bahan berbahaya dan beracun rumah tangga: Studi kasus Kelurahan Pasar Tais Kecamatan Seluma Kabupaten Seluma. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (pp. 012005). IOP Publishing.
- Susanti, R., Mustikaningtyas, D. dan Sasi, A. F. 2014. Analisis Kadar Logam Berat pada Sungai di Jawa Tengah. *Sain Teknologi*. 12(1): 35 – 40.
- Irhami., Pandia, S., Purba, E. & Hasan, W. 2017. Serapan Logam Berat Esensial dan Non Esensial pada Air Lindi TPA Kota Banda Aceh dalam Mewujudkan Pembangunan Berkelanjutan. *Serambi Enineering*. 2(3): 134 – 140.
- Carter, N. H., Schmidt, W. S. & Hirons, C. A. 2015. An International Assessment of Mangrove Management: Incorporation in Intergrated Coastal Zone Management. *Diversity*. 7(2): 74-104. <https://doi.org/10.3390/d7020074>
- Junriah & Alam, M. 2016. Fitoremediasi Logam Berat Merkuri (Hg) pada Tanah dengan Tanaman *Celosia plumosa* (Voss) Burv. *Jurnal Biologi Makassar*. 1(1): 1 – 8. <https://pdfs.semanticscholar.org/9c4d/e68fe5ae60a942187c695ff24f80fc0787bc.pdf>
- Lavieren H. V, Spalding M, Alongi DA, Kainuma M, Godt MC, Adeel Z. 2015. Securing the Future of Mangroves. Hamilton (CA): Institute for Water, Environment and Health, United Nations University. [https://www.files.ethz.ch/isn/156057/Securing%20the%20future%20of%20mangroves%20\(high%20res\).pdf](https://www.files.ethz.ch/isn/156057/Securing%20the%20future%20of%20mangroves%20(high%20res).pdf)

- Pratikino, G. A., Erawan, f. T. M., Subhan, Rahman, A. A., Kolibongso, D. & Wahyudi, I. A. 2022. Distribusi dan Status Kontaminasi Logam Berat pada Sedimen di Pesisir Ranokonea, Kabupaten Bombana, Sulawesi Tenggara. *Jurnal Sains dan Inovasi Perikanan*. 6(1): 19-26.
- Rohmawati, Y. & Kustomo. 2020. Analisis Kualitas Air pada Reservoir PDAM Kota Semarang Menggunakan Uji Parameter Fisika, Kimia, dan Mikrobiologi, serta Dikombinasikan dengan Analisis Kemometri. *Walisongo Journal of Chemistry*. 3(2): 100 – 107. <http://orcid.org/0000-0002-9255-6369>
- Sihotang, C. Y. A., Santosa, W. G. & Sunaryo. (2021). Pengaruh Kosentrasi Logam Berat Zn pada Pertumbuhan Mikroalga *Dunaliella salina* (Chlorophyceae: Dunaliellaceae). *Jurnal of Marine Research*, 10(3), 340-344. https://repository.unsri.ac.id/181524/3/RAMA_54241_08051282126031_0012057905_0005088102_01_front_ref.pdf
- Sudarmawan, A. R., Suteja, Y., & Widiastuti. (2020). Logam Berat Timbal (Pb) pada Air and Plankton di Teluk Benoa, Badung, Bali. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 6(1), 133-139.
- Pradit, S., Shazili, N. A. M., Pattaratumrong, M. S., Chotikarn, P., Kobkeattawin, T., Yucharoen, M., & Towatana, P. (2018). Accumulation of Trace Metals in Mangrove Plant *Sonneratia caseolaris* in Songkhla Lake, Thailand. *Applied Ecology and Environmental Research*, 16(4), 4081-4095. http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1604_40814095
- Harlyan, L. I., & Sari, S. H. J. (2015). Konsentrasi Logam Berat Pb, Cu, and Zn pada Air and Sedimen Permukaan Ekosistem Mangrove di Muara Sungai Porong, Sidoarjo, Jawa Timur. *Jurnal Perikanan and Kelautan*, 20(1), 52-60. https://media.neliti.com/media/publications/296022-konsentrasi-logam-berat-pb-cu-dan-zn-pada-21be329b.pdf?exp=1789953868&kid=1&sig=Xk6KjK4jMPUbz_D_mmfGr4tyf2dCNoFohRgkBsYFbMg
- Marandi, N. P. S., Restu, I. W., & Sari, A. H. W. (2018). Kandungan Logam Berat Timbal (Pb) and Kadmium (Cd) Pada Baand Air and Ikan di Perairan Teluk Benoa, Bali. *Current Trends in Aquatic Science*, 1(1), 106–113.
- Purbonegoro, T. (2022). Penggunaan Indeks Pencemaran Logam Berat dalam Sedimen di Wilayah Pesisir: Studi Kasus Segara Anakan Cilacap Jawa Tengah. *Oseana*, 47(1), 12-19.
- Santana, I K. Y. T., Julyantoro, P. G. S., & Wijayanti, N. P. P. (2018). Akumulasi Logam Berat Seng (Zn) pada Akar dan Daun Lamun *Enhalus acoroides* di Perairan Pantai Sanur, Bali. *Current Trends in Aquatic Science*, 1(1), 47-56.
- Kapahi, M., & Sachdeva, S. (2019). Bioremediation Options for Heavy Metal Pollution. *Journal of Health & Pollution*, 9(24), 1-20. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6905138>