Jurnal Global Ilmiah
Vol. 4, No. 4, April 2026
ISSN: 3026-5207

Analisis Pencemaran Tanah Limbah Elektronik Berbasis Total Konsentrasi dan *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP) di Jayapura

Herlia*, Janviter Manalu, Johnson Siallagan, Frans A. Asmuruf, Maklon Warpur
Universitas Cenderawasih, Indonesia
Email: herliachemistry95@gmail.com*

Abstrak ;
Perkembangan teknologi yang pesat telah meningkatkan jumlah limbah elektronik (e-waste) yang berpotensi mencemari lingkungan, khususnya tanah akibat kandungan logam berat yang bersifat toksik dan persisten. Di Kota Jayapura, pengelolaan limbah elektronik masih dilakukan secara informal sehingga meningkatkan risiko pencemaran tanah dan air tanah. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat pencemaran tanah akibat limbah elektronik menggunakan pendekatan total konsentrasi dan Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP). Metode penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan pengambilan sampel tanah secara purposive dan composite sampling pada empat lokasi, yaitu TPA Koya Koso, Waena, Hamadi, dan Abepura. Analisis logam berat Pb, Cd, Cu, dan Cr dilakukan menggunakan Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS), sedangkan uji TCLP digunakan untuk menilai potensi pelindian logam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa logam Pb memiliki konsentrasi tertinggi dan melebihi baku mutu pada beberapa lokasi, sementara Cu, Cd, dan Cr umumnya berada di bawah ambang batas pada analisis total. Namun, hasil TCLP menunjukkan bahwa Cu, Pb, dan Cd memiliki mobilitas tinggi dan melampaui baku mutu, yang mengindikasikan risiko pencemaran air tanah. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pencemaran tanah tidak hanya ditentukan oleh konsentrasi total logam, tetapi juga oleh mobilitasnya, sehingga pendekatan kombinasi memberikan gambaran risiko lingkungan yang lebih komprehensif.
Kata Kunci: Pencemaran Tanah; Limbah Elektronik; Logam Berat; TCLP.

Abstract ;
The rapid advancement of technology has significantly increased the generation of electronic waste (e-waste), which poses environmental risks due to its heavy metal content that is toxic and persistent. In Jayapura City, e-waste management is still largely informal, increasing the potential for soil and groundwater contamination. This study aims to analyze soil contamination caused by e-waste using total concentration and Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) approaches. The research employed a quantitative method with purposive and composite soil sampling conducted at four locations: Koya Koso landfill, Waena, Hamadi, and Abepura. Heavy metals including Pb, Cd, Cu, and Cr were analyzed using Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS), while TCLP testing was applied to assess the leaching potential of these metals. The results indicate that lead (Pb) exhibited the highest concentration and exceeded regulatory standards at several locations, whereas Cu, Cd, and Cr remained below threshold levels in total concentration analysis. However, TCLP results revealed that Cu, Pb, and Cd had high mobility and exceeded permissible limits, indicating a significant risk of groundwater contamination. Therefore, it can be concluded that soil contamination is influenced not only by total metal concentration but also by metal mobility, highlighting the importance of integrating both approaches to obtain a more comprehensive environmental risk assessment.
Keywords: *Soil Contamination; Electronic Waste; Heavy Metals; TCLP.*

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi yang pesat dalam beberapa dekade terakhir telah mendorong peningkatan signifikan jumlah limbah elektronik (*electronic waste* / e-waste) di berbagai negara, termasuk Indonesia. Limbah elektronik merupakan salah satu jenis limbah dengan pertumbuhan tercepat secara global, dengan jumlah mencapai 53,6 juta ton pada tahun 2019 dan diproyeksikan terus meningkat (Forti et al., 2020). Tingginya konsumsi perangkat elektronik serta siklus hidup produk yang semakin pendek menjadi faktor utama

meningkatnya volume limbah tersebut (Alrumman & al., 2021; Awasthi et al., 2021; Das & al., 2023).

Di Indonesia, pengelolaan limbah elektronik masih menghadapi berbagai tantangan. Sebagian besar limbah elektronik belum dikelola secara formal dan masih tercampur dengan sampah domestik (Setiawan & al., 2023). Kondisi ini menyebabkan limbah elektronik banyak ditangani oleh sektor informal tanpa pengendalian lingkungan yang memadai, sehingga berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan, khususnya pada media tanah (Han et al., 2018; *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan Dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*, 2021; Zeng & al., 2020).

Limbah elektronik mengandung berbagai logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), kromium (Cr), dan tembaga (Cu) yang bersifat toksik, persisten, dan dapat terakumulasi di lingkungan (Alabi et al., 2021). Logam-logam tersebut dapat mencemari tanah melalui proses pelindian (*leaching*), terutama pada kondisi lingkungan dengan curah hujan tinggi. Akumulasi logam berat dalam tanah dapat menurunkan kualitas tanah, mengganggu organisme tanah, serta berpotensi mencemari air tanah dan membahayakan kesehatan manusia (Organization, 2022).

Di Kota Jayapura, pengelolaan limbah elektronik hingga saat ini masih belum dilakukan secara khusus. Limbah elektronik umumnya tercampur dengan sampah rumah tangga di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Koya Koso atau dikelola oleh sektor informal di wilayah Waena, Hamadi, dan Abepura. Aktivitas tersebut berpotensi meningkatkan akumulasi logam berat dalam tanah, terutama pada lokasi dengan intensitas aktivitas limbah elektronik yang tinggi, sehingga berisiko menimbulkan pencemaran lingkungan.

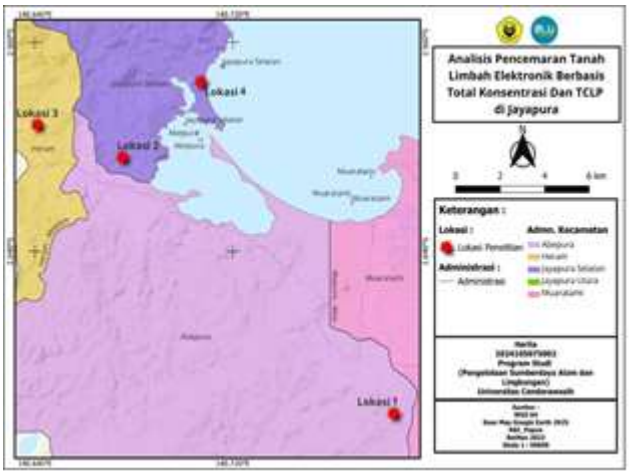
Selama ini, penilaian pencemaran tanah umumnya hanya didasarkan pada total konsentrasi logam berat (Ankit et al., 2021; Liu et al., 2023). Namun, pendekatan tersebut belum mampu menggambarkan tingkat risiko pencemaran secara menyeluruh karena tidak mempertimbangkan mobilitas logam di lingkungan (Arya & Kumar, 2020; Rautela et al., 2021). Dalam beberapa kasus, logam dengan konsentrasi rendah tetap dapat memiliki potensi pelindian yang tinggi dan berisiko mencemari air tanah (Li & al., 2021). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan tambahan seperti TCLP untuk menilai potensi mobilitas logam berat dalam tanah.

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji pencemaran tanah akibat limbah elektronik, namun sebagian besar masih berfokus pada analisis kandungan logam berat saja tanpa mempertimbangkan potensi pelindian (Geissdoerfer et al., 2017; Kollmuss & Agyeman, 2002). Penelitian yang mengombinasikan pendekatan total konsentrasi dan TCLP, khususnya di wilayah Indonesia bagian timur seperti Kota Jayapura, masih terbatas. Selain itu, kajian yang secara khusus membandingkan antara total konsentrasi dan potensi pelindian logam berat dalam satu pendekatan penelitian masih jarang dilakukan.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis risiko pencemaran tanah akibat limbah elektronik di Kota Jayapura dengan menggunakan pendekatan total konsentrasi dan TCLP. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi kedua pendekatan tersebut untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai tingkat pencemaran dan potensi risiko lingkungan, khususnya terhadap air tanah di wilayah perkotaan.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif untuk menganalisis kandungan logam berat dalam tanah akibat aktivitas limbah elektronik (*electronic waste* / *e-waste*) di Kota Jayapura. Penelitian dilaksanakan pada empat lokasi yang memiliki aktivitas *e-waste*, yaitu Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Koya Koso serta lokasi pengepul di Waena, Hamadi, dan Abepura. Pemilihan lokasi dilakukan secara *purposive sampling* berdasarkan tingkat aktivitas pengumpulan, pembongkaran, dan potensi pencemaran lingkungan. Lokasi penelitian ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian di Kota Jayapura (*Google earth*,2025)

Pengambilan sampel tanah dilakukan menggunakan metode *composite sampling*, yaitu penggabungan beberapa titik sampel pada setiap lokasi untuk mewakili kondisi area penelitian. Pada setiap lokasi, sampel diambil dari tiga titik yang memiliki indikasi aktivitas *e-waste* tertinggi, kemudian digabung menjadi satu sampel komposit. Sampel tanah diambil pada kedalaman 0-20 cm (*topsoil*), yang merupakan lapisan tanah yang paling rentan terhadap kontaminasi logam berat.

Sampel tanah yang telah diambil disimpan dalam wadah bersih, diberi label, dan dibawa ke laboratorium untuk dianalisis. Preparasi sampel dilakukan melalui proses destruksi asam sebelum analisis logam berat.

Analisis kandungan logam berat meliputi timbal (Pb), kadmium (Cd), tembaga (Cu), dan kromium (Cr) menggunakan metode *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) dengan sistem flame (*air-acetylene*). Pengukuran dilakukan pada panjang gelombang spesifik untuk masing-masing logam dengan pengaturan instrumen yang mengacu pada SNI 6989-84:2019.

Kalibrasi dilakukan menggunakan larutan standar dengan rentang konsentrasi tertentu dan menghasilkan kurva kalibrasi linear dengan nilai koefisien determinasi (r) > 0,995. Pengendalian mutu (*quality control*) dilakukan melalui penggunaan *reagent blank* untuk memastikan tidak terjadi kontaminasi selama proses analisis, serta evaluasi presisi berdasarkan nilai *relative standard deviation* (%RSD).

Penentuan tingkat pencemaran tanah dilakukan menggunakan dua pendekatan, yaitu analisis total konsentrasi dan uji *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP). Analisis total konsentrasi digunakan untuk mengetahui kadar logam berat dalam tanah,

sedangkan uji TCLP digunakan untuk menentukan potensi pelindian logam berat yang dapat mencemari lingkungan, khususnya air tanah. Uji TCLP mengacu pada metode USEPA 1311.

Hasil analisis total konsentrasi dibandingkan dengan baku mutu berdasarkan PP RI Nomor 22 Tahun 2021 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Sementara itu, hasil uji TCLP digunakan untuk menilai potensi mobilitas logam berat dalam tanah.

Data yang diperoleh dianalisis secara deskriptif dan komparatif untuk membandingkan tingkat pencemaran antar lokasi penelitian serta mengevaluasi hubungan antara total konsentrasi dan potensi pelindian logam berat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1.1 Total Konsentrasi Logam Berat

Hasil analisis total konsentrasi logam berat pada tanah menunjukkan adanya variasi kandungan logam pada setiap lokasi penelitian, yaitu TPA Koya Koso pengepul Waena, pengepul Hamadi, dan pengepul Abepura. Nilai hasil pengujian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Total konsentrasi logam berat dalam tanah

No	Jenis Sampel	Cu (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Baku Mutu Cu	Baku Mutu Cr	Baku Mutu Cd	Baku Mutu Pb
1	TPA Koya Kaso	3,213	< 0,03	< 0,03	590	30	1	3	300
2	Pengepul Waena	2,212	< 0,03	< 0,03	530	30	1	3	300
3	Pengepul Hamadi	3,252	< 0,03	< 0,03	130	30	1	3	300
4	Pengepul Abepura	0,524	< 0,03	< 0,03	40	30	1	3	300

Sumber : Hasil uji AAS (2025)

Berdasarkan Tabel 1, logam timbal (Pb) menunjukkan konsentrasi tertinggi dibandingkan logam lainnya. Konsentrasi Pb pada TPA Koya Koso (590 mg/kg) dan pengepul Waena (530 mg/kg) telah melebihi baku mutu tanah berdasarkan PP RI Nomor 22 Tahun 2021 (TK-C =300 mg/kg), sehingga dapat dikategorikan sebagai pencemar utama pada lokasi tersebut.

Jika dibandingkan antar lokasi, TPA Koya Koso menunjukkan tingkat pencemaran tertinggi, diikuti oleh Waena, Hamadi, dan Abepura. Hal ini menunjukkan bahwa intensitas aktivitas limbah elektronik berpengaruh terhadap akumulasi logam berat dalam tanah. Tingginya kandungan Pb berkaitan dengan aktivitas pengelolaan limbah elektronik yang dilakukan secara informal, seperti pembongkaran perangkat dan pembuangan terbuka (*open dumping*). Limbah elektronik diketahui mengandung logam berat, terutama timbal yang banyak ditemukan pada solder dan papan sirkuit elektronik (Robinson, 2009).

Sementara itu, logam tembaga (Cu) terdeteksi pada seluruh lokasi dengan kisaran 0,524–3,252 mg/kg, namun masih berada di bawah ambang batas baku mutu. Logam Cd dan

Cr berada di bawah batas deteksi, sehingga belum menunjukkan indikasi sebagai parameter pencemar.

Meskipun beberapa logam masih berada di bawah baku mutu, keberadaannya tetap perlu diperhatikan karena logam berat bersifat persisten dan dapat terakumulasi dalam jangka panjang, yang berpotensi menurunkan kualitas tanah serta mengganggu organisme tanah (Alloway, 2013).

1.2 Hasil Uji Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

Hasil uji TCLP menunjukkan bahwa seluruh lokasi penelitian memiliki potensi pelindian logam berat. Nilai hasil pengujian dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil uji TCLP logam berat tanah

No	Jenis Sampel	Cu (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Baku Mutu Cu	Baku Mutu Cr	Baku Mutu Cd	Baku Mutu Pb
1	TPA Koya Kaso	574,4	1,05	0,26	26,55	3	1	0,2	25
2	Pengepul Waena	596,9	1,32	0,27	30,1	3	1	0,2	25
3	Pengepul Hamadi	563,1	1,45	0,30	29,5	3	1	0,2	25
4	Pengepul Abepura	561,6	1,36	0,29	31,4	3	1	0,2	25

Sumber: Hasil uji TCLP tanah Pada AAS (2025)

Hasil analisis menunjukkan bahwa logam Cu, Pb, dan Cd memiliki nilai yang melampaui baku mutu TCLP berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021. Konsentrasi Cu menunjukkan nilai yang sangat tinggi pada seluruh lokasi, meskipun pada analisis total konsentrasi masih berada di bawah ambang batas.

Hal ini menunjukkan bahwa logam berat dalam tanah tidak hanya terakumulasi, tetapi juga berada dalam bentuk yang mudah larut dan memiliki mobilitas tinggi. Nilai TCLP yang melebihi baku mutu mengindikasikan bahwa logam berat berpotensi untuk berpindah ke media lingkungan lain, terutama air tanah, sehingga meningkatkan risiko pencemaran lingkungan.

Mobilitas logam berat dalam tanah dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti pH, kelembapan, dan kandungan bahan organik (Alloway, 2013). Selain itu, aktivitas pengelolaan limbah elektronik secara informal, seperti pembongkaran dan penumpukan limbah di area terbuka, turut meningkatkan potensi pelindian logam akibat paparan langsung terhadap air hujan. Temuan ini sejalan dengan penelitian (Yang & al., 2024) yang menyatakan bahwa lokasi pengelolaan limbah elektronik secara informal cenderung memiliki tingkat mobilitas logam berat yang tinggi akibat minimnya pengelolaan lingkungan yang memadai.

1.3 Perbandingan Total Konsentrasi dan TCLP

Perbandingan antara total konsentrasi dan TCLP menunjukkan bahwa tingkat pencemaran tanah tidak hanya ditentukan oleh jumlah logam dalam tanah, tetapi juga oleh mobilitasnya.

Logam Pb menunjukkan nilai tinggi baik pada TK maupun TCLP, sehingga dapat diidentifikasi sebagai parameter pencemar utama. Sementara itu, logam Cu dan Cd menunjukkan bahwa meskipun konsentrasi totalnya relatif rendah, namun memiliki potensi pelindian yang tinggi.

Hal ini menegaskan bahwa mobilitas logam berat merupakan faktor kunci dalam menentukan tingkat risiko pencemaran lingkungan, bukan hanya konsentrasi totalnya. Pendekatan total konsentrasi hanya menggambarkan akumulasi logam dalam tanah, sedangkan TCLP memberikan informasi mengenai potensi mobilitas logam tersebut.

Temuan ini sejalan dengan pendapat Alloway (2013) yang menyatakan bahwa fraksi logam yang mudah larut lebih berperan dalam menentukan tingkat risiko pencemaran dibandingkan jumlah total logam dalam tanah. Dengan demikian, kombinasi antara analisis total konsentrasi dan TCLP memberikan gambaran yang lebih komprehensif dalam menilai tingkat pencemaran tanah akibat limbah elektronik.

1.4 Implikasi Lingkungan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pencemaran tanah akibat limbah elektronik berpotensi menimbulkan dampak terhadap kualitas tanah dan air tanah. Logam berat dengan mobilitas tinggi dapat terlarut dan berpindah ke air tanah melalui proses pelindian (*leaching*), sehingga meningkatkan risiko pencemaran lingkungan.

Logam berat seperti Pb dan Cd bersifat toksik, persisten, dan dapat terakumulasi dalam rantai makanan. Paparan jangka panjang terhadap logam berat dapat menyebabkan gangguan kesehatan, termasuk gangguan sistem saraf dan organ vital lainnya (WHO, 2022).

Kondisi ini menjadi perhatian penting, terutama pada wilayah dengan curah hujan tinggi seperti Kota Jayapura, yang dapat mempercepat proses pelindian logam berat ke dalam tanah dan air tanah.

Oleh karena itu, diperlukan pengelolaan limbah elektronik yang lebih baik dan terstruktur, termasuk penguatan sistem pengelolaan formal, pengawasan terhadap aktivitas sektor informal, serta peningkatan kesadaran masyarakat mengenai bahaya limbah elektronik terhadap lingkungan dan kesehatan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa tanah pada lokasi yang terpapar limbah elektronik di Kota Jayapura telah mengalami pencemaran logam berat dengan tingkat yang bervariasi pada setiap lokasi. Logam timbal (Pb) merupakan parameter pencemar utama yang menunjukkan konsentrasi tertinggi dan telah melebihi baku mutu pada lokasi TPA Koya Koso dan pengepul Waena.

Hasil uji *TCLP* menunjukkan bahwa logam Cu, Pb, dan Cd memiliki potensi pelindian yang tinggi dan melampaui baku mutu, yang mengindikasikan adanya risiko pencemaran lingkungan, terutama terhadap air tanah.

Perbandingan antara total konsentrasi dan TCLP menunjukkan bahwa tingkat pencemaran tanah tidak hanya ditentukan oleh jumlah logam yang terakumulasi, tetapi juga oleh mobilitasnya. Logam dengan konsentrasi rendah dapat memiliki potensi pelindian yang tinggi, sehingga meningkatkan risiko pencemaran lingkungan.

Dengan demikian, penggunaan pendekatan kombinasi antara analisis total konsentrasi dan TCLP memberikan gambaran yang lebih komprehensif dalam menilai tingkat pencemaran dan risiko lingkungan akibat limbah elektronik.

REFERENSI

Alabi, O. A., Bakare, A. A., & Xu, X. (2021). Electronic Waste and Human Health Risk: A Review of the Current Status. *Journal of Environmental Management*, *280*, 111784.

Alloway, B. J. (2013). *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and Their Bioavailability* (3rd ed.). Springer.

Alrumman, S. A., & al., et. (2021). Environmental Impact of Electronic Waste and Its Management. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*, 12345–12360.

Ankit, Saha, L., Kumar, V., Tiwari, J., Rawat, S., Singh, J., & Bauddh, K. (2021). Electronic Waste and Their Leachates Impact on Human Health and Environment: Global Ecological Threat and Management. *Environmental Technology & Innovation*, *24*, 102049. https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102049

Arya, S., & Kumar, S. (2020). E-Waste in India at a Glance: Current Trends, Regulations, Challenges and Management Strategies. *Journal of Cleaner Production*, *271*, 122707. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122707

Awasthi, A. K., Li, J., & Zhang, C. (2021). Management of Electrical and Electronic Waste: A Comparative Evaluation of China and India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *76*, 434–447.

Das, S., & al., et. (2023). Heavy Metal Contamination and Environmental Risk Assessment in Soils: A Review. *Environmental Research*, *216*, 114584.

Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). *The Global E-Waste Monitor 2020: Quantities, Flows, and the Circular Economy Potential*. United Nations University.

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A New Sustainability Paradigm? *Journal of Cleaner Production*, *143*, 757–768.

Han, W., Gao, G., Geng, J., Li, Y., & Wang, Y. (2018). Ecological and Health Risks Assessment and Spatial Distribution of Residual Heavy Metals in the Soil of an E-Waste Circular Economy Park in Tianjin, China. *Chemosphere*, *197*, 325–335. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.043

Kollmuss, A., & Agyeman, J. (2002). Mind the Gap: Why Do People Act Environmentally and What Are the Barriers? *Environmental Education Research*, *8*(3), 239–260.

Li, J., & al., et. (2021). Leaching Characteristics of Heavy Metals from E-Waste Contaminated Soil. *Chemosphere*, *263*, 127967.

Liu, K., Tan, Q., Yu, J., & al., et. (2023). A Global Perspective on E-Waste Recycling. *Circular Economy*, *2*(1), 100028. https://doi.org/10.1016/j.cec.2023.100028

Organization, W. H. (2022). *Health Effects of Heavy Metals Exposure*. WHO Press.

Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. (2021).

Rautela, R., Arya, S., Vishwakarma, S., Lee, J., Kim, K.-H., & Kumar, S. (2021). E-Waste Management and Its Effects on the Environment and Human Health. *Science of the Total Environment*, *773*, 145623. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145623

Robinson, B. H. (2009). E-Waste: An Assessment of Global Production and Environmental

Impacts. *Science of the Total Environment*, *408*(2), 183–191.
Setiawan, B., & al., et. (2023). Pengelolaan Limbah Elektronik di Indonesia: Tantangan dan Peluang. *Jurnal Pengelolaan Lingkungan*, *12*(2), 45–56.
Yang, X., & al., et. (2024). Heavy Metal Mobility and Environmental Risks in Informal E-Waste Recycling Areas. *Environmental Pollution*, *330*, 121845.
Zeng, X., & al., et. (2020). Environmental Pollution and Health Risks of Heavy Metals from E-Waste Recycling. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*, 123–135.