Available online at: http://jtb.ulm.ac.id/index.php/JTB
Volume 14 Nomor 2
ISSN: 2302-8394 (print)

BIOPILE SEBAGAI TEKNOLOGI RAMAH LINGKUNGAN UNTUK REMEDIASI TANAH TERCEMAR TIMBAL

Awwalini Maghfirah Salim[1], Alricha[2], Iin Nindy Karlinda Kadir[3], Anita Pratiwi[4], Moh. Baitullah Amaludin[5],M Marjan[6]

[1,4,5,6]Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako, Jalan Soekarno Hatta No.KM. 9, Tondo, Kec. Mantikulore, Palu, 94148, Indonesia.

[2,3]Universitas Tadulako, Jalan Soekarno Hatta No.KM. 9, Tondo, Kec. Mantikulore, Palu, 94148, Indonesia.

ABSTRACT

Soil contamination by the heavy metal lead (Pb) poses a significant threat to public health and ecosystems. This study evaluated the effectiveness of the ex-situ biopile method for remediating Pb-contaminated soil at the Kawatuna Landfill, Palu City. Soil samples were collected from the contaminated site and treated in a biopile prototype with controlled aeration and moisture, with the addition of compost as an amendment at 10% (w/w). Laboratory analyses conducted at the Integrated Laboratory of Tadulako University showed a decrease in total Pb concentration from 41.96 mg/kg to 31.83 mg/kg after seven days of treatment. This corresponds to a removal efficiency of 24.13% and an average degradation rate of 1.45 mg/kg·day. These results indicate that the biopile method is capable of reducing Pb concentrations in soil during the initial stage of treatment; however, optimization of treatment duration and operational conditions is required to achieve regulatory soil quality standards. Furthermore, the use of locally sourced compost as a nutrient amendment and the absence of secondary waste generation support the biopile method as an environmentally friendly and cost-effective soil remediation technology.

Keywords**:** Biopile, bioremediation, lead (Pb), contaminated soil, Kawatuna Landfill

ABSTRAK

Pencemaran tanah oleh logam berat timbal (Pb) merupakan ancaman bagi kesehatan masyarakat dan ekosistem. Penelitian ini mengevaluasi efektivitas metode biopile ex-situ untuk meremediasi tanah tercemar di TPA Kawatuna, Kota Palu. Sampel tanah diambil dari lokasi pencemaran dan diproses dalam prototipe biopile dengan pengaturan aerasi, kelembaban, serta penambahan kompos sebagai amandemen (10% w/w). Analisis laboratorium yang dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Tadulako menunjukkan penurunan kadar total Pb dari 41,96 mg/kg menjadi 31,83 mg/kg setelah perlakuan selama 7 hari; efisiensi penurunan tercatat 24,13% dengan laju degradasi rata-rata 1,45 mg/kg·hari. Hasil ini mengindikasikan bahwa biopile mampu mengurangi beban Pb dalam tanah pada tahap awal perlakuan, meskipun optimasi durasi dan kondisi operasional diperlukan untuk mencapai baku mutu yang diinginkan. Selain itu, penggunaan kompos lokal sebagai sumber nutrisi dan tidak dihasilkannya limbah sekunder mendukung karakteristik biopile sebagai teknologi remediasi yang ramah lingkungan dan ekonomis.

Kata kunci**:** Biopile, bioremediasi, timbal (Pb), tanah tercemar, TPA Kawatuna

Correspondence: Awwalini Maghfirah Salim
Email: awwalinimaghfirah@gmail.com

1 PENDAHULUAN

Tanah merupakan komponen vital ekosistem yang berfungsi sebagai media tumbuh tanaman, tempat hidup mikroorganisme, dan penopang keseimbangan lingkungan. Akan tetapi, aktivitas manusia yang tidak terkendali, seperti pembuangan limbah domestik maupun industri, seringkali menyebabkan pencemaran tanah oleh logam berat. Salah satu logam berat yang paling berbahaya adalah timbal (Pb). Timbal bersifat toksik, persisten, dan mudah terakumulasi dalam tanah serta rantai makanan. Paparan Pb dalam jangka panjang dapat menyebabkan gangguan kesehatan serius, di antaranya kerusakan sistem saraf, gangguan fungsi ginjal, penurunan kecerdasan anak, bahkan risiko kanker.

TPA Kawatuna di Kota Palu merupakan salah satu lokasi pembuangan akhir dengan sistem open dumping. Aktivitas ini berpotensi besar meningkatkan akumulasi logam berat, termasuk timbal, di dalam tanah. Hasil analisis awal menunjukkan bahwa konsentrasi Pb pada tanah di TPA Kawatuna mencapai 41,96 mg/kg, angka ini melebihi ambang batas alami tanah sehingga berpotensi mencemari lingkungan sekitar. Kondisi ini menuntut adanya upaya remediasi yang efektif, berkelanjutan, dan ramah lingkungan.

Salah satu metode yang dapat diterapkan adalah bioremediasi. Bioremediasi memanfaatkan kemampuan mikroorganisme untuk menguraikan atau menstabilkan polutan sehingga dampaknya terhadap lingkungan dapat ditekan. Dari berbagai teknik bioremediasi, metode biopile menjadi salah satu pilihan yang menjanjikan. Biopile dilakukan secara ex-situ dengan prinsip penumpukan tanah tercemar, pengaturan aerasi, kelembaban, serta penambahan nutrisi organik untuk mendukung pertumbuhan mikroorganisme. Selain efektif menurunkan kadar polutan, biopile juga dinilai sebagai teknologi yang ekonomis dan ramah lingkungan, sehingga sejalan dengan konsep sustainable remediation.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas biopile dalam menurunkan kadar timbal pada tanah tercemar di TPA Kawatuna. Fokus kajian meliputi pengukuran konsentrasi Pb sebelum dan sesudah perlakuan, serta analisis peran biopile sebagai teknologi remediasi berkelanjutan dalam pengelolaan tanah tercemar logam berat.

2 METODE PENELITIAN

2.1 Jenis Penelitian dan Sumber Data

Penelitian ini merupakan penelitian *eksperimen laboratorium* dengan pendekatan *kuantitatif*. Kegiatan dilakukan secara *ex-situ* melalui penerapan metode *biopile* pada tanah yang tercemar timbal (Pb) di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Kawatuna, Kota Palu. Data penelitian terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dari hasil pengambilan sampel tanah tercemar dengan metode *grab sampling* pada kedalaman 0–30 cm, kemudian dianalisis kadar timbalnya sebelum dan sesudah perlakuan *biopile* menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)*. Selain itu, kondisi tanah selama perlakuan seperti pH, suhu, dan kelembaban juga dicatat sebagai data pendukung. Sementara itu, data sekunder diperoleh dari literatur, jurnal, dan penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan pencemaran timbal serta teknik bioremediasi menggunakan *biopile*. Data primer menjadi dasar utama dalam menilai efektivitas *biopile*, sedangkan data sekunder digunakan untuk memperkuat pembahasan dan memberikan perbandingan dengan hasil penelitian lain. serta data pendukung dari instansi terkait.

2.2 Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Mei hingga Juni tahun 2025. Proses pengambilan sampel TPA Kawatuna, Kota Palu, dengan rentang waktu selama tujuh hari perlakuan.

2.3 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini berada di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Kawatuna, yang terletak di Kecamatan Mantikulore, Kota Palu, Provinsi Sulawesi Tengah (Gambar

1). Area ini dipilih karena merupakan lokasi penampungan limbah domestik utama Kota Palu dengan potensi pencemaran logam berat, khususnya timbal (Pb), sehingga relevan untuk dilakukan uji bioremediasi menggunakan metode biopile. Selanjutnya, proses eksperimen dan analisis laboratorium dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Tadulako.

Gambar 1. Peta Lokasi Pengambilan Sampel

2.4 Jenis Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data primer, yaitu data yang diperoleh langsung dari hasil pengambilan sampel tanah di TPA Kawatuna dan hasil pengukuran laboratorium selama proses bioremediasi menggunakan metode biopile.

2.5 Populasi dan Sampel

Populasi dalam penelitian ini adalah tanah yang tercemar limbah domestik di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Kawatuna, Kecamatan Mantikulore, Kota Palu. Dari populasi tersebut diambil sampel tanah tercemar secara purposive pada titik-titik yang dianggap mewakili kondisi pencemaran di area TPA. Sampel tanah kemudian dibawa ke Laboratorium Terpadu Universitas Tadulako untuk diolah menggunakan metode biopile sebagai objek uji bioremediasi.

2.6 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan selama penelitian yakni:

Alat:

1. Sekop
2. Karung
3. *Handscoon*
4. Masker
5. Container box ukuran 30 Liter
6. Selang *waterpass*
7. Pompa udara

Bahan yang digunakan untuk penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sampel tanah tercemar limbah domestik dari TPA Kawatuna
2. Bulking agent (misalnya kompos, serbuk kayu, atau sekam padi)
3. Pupuk organik sebagai sumber nutrisi mikroorganisme

2.7 Analisa Data

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas metode bioremediasi menggunakan sistem *biopile* terhadap penurunan kadar logam berat timbal (Pb) pada tanah tercemar. Analisis dilakukan dengan menggunakan dua pendekatan, yaitu menghitung persentase degradasi timbal dan menentukan laju biodegradasi timbal selama proses bioremediasi.

Untuk mengetahui persentase degradasi timbal (Pb) pada tanah dapat dilakukan perhitungan dengan persamaan berikut :

$$\%Degradasi = \frac{(Pb0 - Pbn)}{Pb0}\ x\ 100\%$$

Keterangan :
Pb_0 = Timbal kontrol minggu ke-0 (sebelum perlakuan)
Pb_n = Timbal kontrol minggu ke-n (setelah perlakuan)

Rumus ini digunakan untuk mengetahui efektivitas penurunan kandungan timbal selama proses berlangsung, dalam hal ini selama 7 hari

masa bioremediasi menggunakan biopile.

Untuk mengetahui laju biodegradasi kadar timbal dalam tanah dapat dilakukan perhitungan dengan persamaan berikut :

$$Ct = Co – kt$$

Keterangan :
Ct = Konsentrasi timbal yang tersisa pada waktu ke-t
C_0 = Konsentrasi awal timbal
k = Konstanta laju degradasi (diperoleh dari pengolahan data eksperimen)
t = Waktu (Hari)

Persamaan ini digunakan untuk menggambarkan seberapa cepat timbal terdegradasi dari tanah tercemar selama proses bioremediasi berlangsung. Nilai konstanta kkk dapat dihitung dengan pendekatan regresi linier dari data percobaan berdasarkan tren penurunan kandungan Pb terhadap waktu.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Efektivitas Biopile terhadap Penurunan Kadar Timbal (Pb)

Hasil pengujian menunjukkan adanya penurunan konsentrasi timbal (Pb) pada tanah setelah dilakukan perlakuan menggunakan metode biopile. Konsentrasi awal Pb sebelum perlakuan adalah 41,96 mg/kg. Setelah dilakukan proses biopile selama tujuh hari, kadar Pb menurun menjadi 31,83 mg/kg. Penurunan ini membuktikan bahwa metode biopile mampu menurunkan kandungan timbal secara signifikan.

Efektivitas metode biopile dalam remediasi tanah tercemar timbal didukung oleh peran mikroorganisme yang terdapat pada pupuk organik hasil pengolahan IPLT. Mikroorganisme tersebut berperan aktif dalam mendegradasi kandungan timbal melalui mekanisme biologis. Data hasil pengujian penurunan kadar timbal dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hubungan antara Penambahan Kompos dan Penurunan Pb

Presentase Penambahan kompos 1kg atau 10 %	
Sebelum	Sesudah
41,96 mg/kg	31,83 mg/kg

Sumber: Data primer, 2025

3.2 Hasil uji parameter timbal & ph

1. Uji Ph Tanah

Didapatkan hasil uji Ph tanah yaitu 6,5 yang tergolang kedalam kondisi Netral Asam yang dapat dilihat pada tabel 2:

Tabel 2. Hasil Uji Ph Tanah

pH	**Kelarutan Pb**	**Efisiensi Remediasi**	**Status**
6,5	Sedang-Tinggi	75-85 %	BAIK

Sumber: Data primer, 2025

2. Uji Parameter Timbal

Didapatkan hasil uji timbal sebelum penggunaan biopile yaitu 41,96 mg/kg dan sesudah penggunaan biopile 31,83 mg/kg yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Uji Timbal

Karakteristik	**Hasil Uji Sebelum (mg/kg)**	**Hasil Uji Sesudah (mg/kg)**	**Persentase Penurunan (%)**	**Metode Uji**
Kadar Timbal (Pb)	41,96	31,83	24,13 %	SNI 6989.8:2009

Sumber:Laboratoriun Lingkungan Terpadu Universitas Tadulako

Untuk mengetahui efektivitas metode biopile dalam menurunkan kandungan logam berat timbal (Pb) pada tanah tercemar di TPA Kawatuna, dilakukan

analisis kuantitatif terhadap perubahan konsentrasi timbal sebelum dan sesudah perlakuan. Data awal diperoleh dari hasil uji laboratorium pada sampel tanah minggu ke-0 dan minggu ke-1 (hari ke-7). Sehingga, selama proses biopile berlangsung selama 7 hari, kadar timbal berhasil diturunkan sebesar 24,13%, menunjukkan bahwa metode ini cukup efektif dalam meremediasi tanah tercemar.

Untuk menghitung kecepatan penurunan kadar timbal dalam tanah, digunakan pendekatan persamaan laju reaksi orde pertama:

$$Ct = Co - kt$$

Dengan:
C_0 = 41,96 mg/kg
Ct = 31,83 mg/kg
t = 7 hari

Dengan demikian:

$$k = \frac{41{,}96 - 31{,}83}{7}$$

$$k = \frac{10{,}13}{7}$$

$$k = \frac{1{,}45 mg}{kg} /hari$$

Jadi , laju degradasi timbal dalam tanah selama proses biopile adalah sekitar 1,45 mg/kg/hari.

Dari hasil uji laboratorium (Tabel 4), diketahui bahwa kadar timbal awal pada tanah tercemar adalah sebesar 41,96 mg/kg. Setelah dilakukan perlakuan biopile, kadar timbal menurun menjadi 31,83 mg/kg, yang berarti terjadi penurunan konsentrasi sebesar 10,13 mg/kg.

Penurunan kadar timbal tersebut menghasilkan efisiensi bioremediasi sebesar 24,13%. Nilai ini menunjukkan bahwa metode biopile memiliki kemampuan yang cukup baik dalam menurunkan kandungan logam berat dalam waktu singkat. Efisiensi ini dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti keaktifan mikroorganisme dalam sistem biopile, ketersediaan nutrisi dari pupuk organik, serta kondisi aerasi dan kelembaban yang mendukung aktivitas biologis.

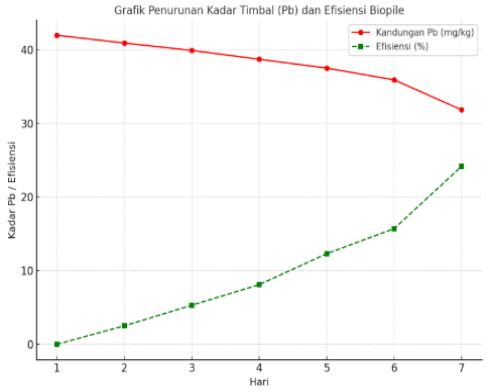
Selain efisiensi, perhitungan juga dilakukan untuk mengetahui laju biodegradasi timbal, yang diperoleh sebesar 1,45 mg/kg per hari. Nilai ini menggambarkan kecepatan penurunan kandungan timbal selama proses bioremediasi berlangsung. Semakin tinggi laju degradasi, semakin cepat pula proses remediasi berlangsung. Nilai laju ini dapat dijadikan acuan untuk memperkirakan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai ambang batas aman logam berat di tanah, serta untuk merancang durasi optimal dalam aplikasi skala lapangan.

Secara keseluruhan, hasil pengukuran dan perhitungan ini membuktikan bahwa metode biopile dapat menjadi solusi efektif dalam menurunkan kontaminasi logam berat pada tanah tercemar di TPA Kawatuna, terutama apabila dikombinasikan dengan pengelolaan sistem yang tepat dan dukungan nutrisi yang memadai.

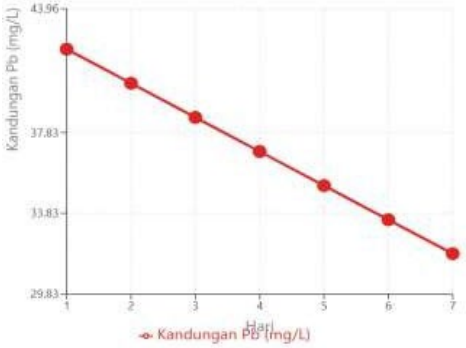
Tabel 4. Hasil Perhitungan Efisiensi dan Laju Bioremediasi Timbal (Pb)

Parameter	**Nilai**	**Keterangan**
Kadar Pb awal (Pb_0)	41,96 mg/kg	Sebelum perlakuan biopile
Kadar Pb akhir (Pb_7)	31,83 mg/kg	Setelah 7 hari perlakuan biopile
Penurunan kadar Pb (Pb_0 - Pb_7)	10,13 mg/kg	Selisih kadar timbal
Efisiensi penurunan	24,13%	Persentase degradasi timbal
Lama perlakuan	7 hari	Durasi eksperimen biopile
Laju degradasi timbal (k)	1,45 mg/kg/hari	Kecepatan rata-rata penurunan Pb per hari

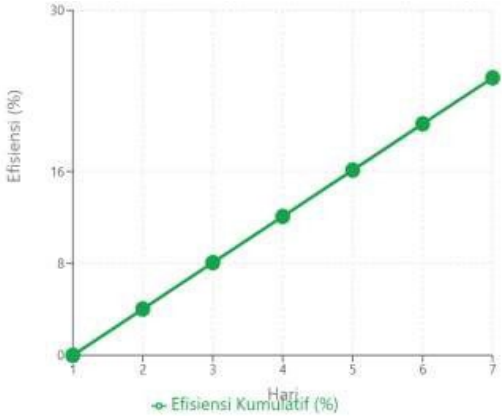
3.3 Tren Penurunan Kadar Timbal (Pb) dan Efisiensi Biopile Selama 7 Hari



Grafik 1. Hubungan antara jumlah kandungan Pb dan efisiensi dan hari



Grafik 2. Hubungan antara Kandungan Pb dan hari



Grafik 3. Hubungan antara Efisiensi dan hari

Hasil penelitian (Gambar 1 sd Gambar 3) menunjukkan bahwa dalam kurun waktu 7 hari terjadi penurunan kadar timbal (Pb) secara konsisten (Gambar 2), sedangkan efisiensi penurunan Pb meningkat dari hari ke hari (Gambar 3). Hubungan terbalik antara kadar Pb dan efisiensi ditunjukkan pada Gambar 1, yaitu semakin rendah konsentrasi Pb maka semakin tinggi persentase efisiensinya.

Hal ini sesuai dengan mekanisme biosorpsi dan bioakumulasi pada media bioremediasi, di mana ion logam berat akan terikat pada permukaan biomassa atau diakumulasi secara intraseluler. Pal et al. (2025) melaporkan bahwa biomassa bakteri mampu mengadsorpsi Pb melalui proses isoterm dan kinetika sorpsi, yang berkontribusi pada penurunan konsentrasi logam berat di lingkungan. Emara et al. (2023) juga menemukan bahwa *Bacillus amyloliquefaciens* dapat menghilangkan Pb melalui kombinasi bio-adsorpsi, deposisi, dan kompleksasi di permukaan sel. Selain itu, tinjauan yang dilakukan oleh Bender et al. (2025) menegaskan bahwa integrasi mikroorganisme dengan fitoremediasi merupakan strategi berkelanjutan dalam pengendalian pencemaran logam berat, termasuk Pb. Hal ini memperkuat hasil penelitian ini bahwa metode bioremediasi mampu menurunkan konsentrasi Pb secara signifikan, sekaligus meningkatkan efisiensi penurunan seiring dengan bertambahnya waktu kontak.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, teknik biopile terbukti efektif dalam menurunkan kadar logam berat timbal (Pb) pada tanah tercemar di TPA Kawatuna. Hasil uji laboratorium menunjukkan adanya penurunan signifikan kadar Pb dari 41,96 mg/kg menjadi 31,83 mg/kg setelah 7 hari proses bioremediasi, dengan efisiensi penurunan sebesar 24,13% dan laju degradasi 1,45 mg/kg/hari.

Penambahan pupuk organik terbukti mempercepat proses bioremediasi dalam sistem biopile. Nutrisi yang diberikan mendukung pertumbuhan dan aktivitas mikroorganisme sehingga mempercepat degradasi serta imobilisasi logam berat dalam tanah.

Selain itu, mikroorganisme memiliki peran utama dalam proses bioremediasi menggunakan teknik biopile. Dengan bantuan aerasi dan ketersediaan nutrisi, mikroorganisme tanah mampu mengikat dan menstabilkan

logam berat Pb melalui mekanisme biosorpsi, sehingga meningkatkan efektivitas bioremediasi dalam waktu relatif singkat.

DAFTAR RUJUKAN

Ahmad, A., Rahman, M., Ali, S., Khan, M. & Hussain, T., 2021. Enhancement of microbial remediation of heavy metal-contaminated soil using organic amendments. *Journal of Environmental Management*, 280(3), pp.1–9.

Andriyani, L., Hakim, A. & Suryani, A., 2022. Penerapan metode biopile untuk remediasi tanah di area TPA. Jurnal Rekayasa Lingkungan, 30(2), pp.55–63.

Atlas, R.M. & Hazen, T.C., 2011. Oil biodegradation and bioremediation: A tale of the two worst spills in US history. Environmental Science & Technology, 45(16), pp.6709–6715.

Bender, J., Ma, J. & Li, H., 2025. Advances in microbial and plant-assisted strategies for lead remediation. Sustainability, 17(4), p.1386.

Brady, N.C. & Weil, R.R., 2016. The nature and properties of soils. 15th ed. London: Pearson Education.

Emara, H., Hassan, S., Salem, D., Ibrahim, M. & Abdelrahman, R., 2023. Bioremediation of lead by Bacillus amyloliquefaciens: mechanisms of biosorption and surface complexation. Journal of Hazardous Materials, 450, p.131211.

Fakayode, S.O., 2019. Soil pollution by industrial wastes and its effect on the environment. Environmental Science and Pollution Research, 26(3), pp.220–228.

Garbisu, C. & Alkorta, I., 2003. Bioremediation: Principles and future. Journal of Cleaner Production, 11(1), pp.147–151.

Hidayati, R. & Yuliana, E., 2019. Potensi bahaya logam berat dari limbah rumah tangga. Jurnal Ilmu Lingkungan, 17(1), pp.45–53.

Pal, A., Singh, S., Sharma, P., Verma, R. & Patel, D., 2025. Biosorption and bioaccumulation of Pb(II) using bacterial biomass: isotherm, kinetics and mechanism. Chemosphere, 352, p.139583.