

Pengaruh pH Tanah Terhadap Metode Aerasi Dalam Stabilisasi Logam Berat Timbal (Pb^{2+})

Moch Shafansyah Yumna Argia*, Muhammad Abdus Salam Jawwad

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: 21034010063@student.upnjatim.ac.id

Diterima: 9 Oktober 2025

Disetujui: 17 Oktober 2025

Abstract

This study examines the effect of soil pH variation on the effectiveness of the aeration method in stabilizing the heavy metal lead (Pb^{2+}). Lead contamination from industrial waste and fossil fuels is a serious environmental problem as it is carcinogenic and can pollute ecosystems, including plants, posing a health risk to humans. Soil remediation is needed to address this issue, and soil aeration is one promising method. However, the effectiveness of aeration is highly influenced by soil environmental conditions, particularly pH, as low pH makes heavy metals easily soluble and mobile. This quantitative experimental study used 3 reactors with variations in pH treatment (acidic pH 4, neutral pH 6.5, and alkaline pH 10) and aeration duration (6 hours/day). Samples were analyzed using Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) to measure the remaining lead concentration, and the stabilization efficiency was calculated from the difference in concentration before and after treatment. The results showed that the alkaline pH treatment (pH 10) consistently provided the highest lead reduction efficiency, reaching 78.7% at a 24-hour aeration duration. Increasing the pH caused the Pb^{2+} ions to precipitate into insoluble and less toxic compounds. Statistical analysis using ANOVA confirmed that pH and aeration duration had a significant effect on the efficiency of lead (Pb^{2+}) reduction.

Keywords: *lead, soil aeration, stabilization, soil ph, remediation*

Abstrak

Penelitian ini mengkaji pengaruh variasi pH tanah terhadap efektivitas metode aerasi dalam menstabilkan logam berat timbal (Pb^{2+}). Pencemaran timbal dari limbah industri dan bahan bakar fosil menjadi masalah lingkungan yang serius karena bersifat karsinogenik dan dapat mencemari ekosistem, termasuk tanaman, yang menimbulkan risiko kesehatan bagi manusia. Remediasi tanah diperlukan untuk mengatasi masalah ini, dan aerasi tanah adalah salah satu metode yang menjanjikan. Namun, efektivitas aerasi sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan tanah, terutama pH, karena pH yang rendah membuat logam berat mudah larut dan berpindah. Penelitian eksperimental kuantitatif ini menggunakan 3 reaktor dengan perlakuan variasi pH (asam pH 4, netral pH 6,5 dan basa pH 10) dan durasi aerasi (6 jam/hari). Sampel dianalisis menggunakan Spektrofotometri Serapan Atom (AAS) untuk mengukur konsentrasi timbal yang tersisa, dan efisiensi stabilisasi dihitung dari perbedaan konsentrasi sebelum dan sesudah perlakuan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan pH basa (pH 10) secara konsisten memberikan efisiensi penurunan timbal tertinggi, mencapai 78,7% pada durasi aerasi 24 jam. Peningkatan pH membuat ion Pb^{2+} mengendap menjadi senyawa yang tidak larut dan kurang beracun. Analisis statistik menggunakan ANOVA mengonfirmasi bahwa pH dan durasi aerasi memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi penurunan timbal (Pb^{2+}).

Kata Kunci: *timbal, aerasi tanah, stabilisasi, ph tanah, remediasi*

1. Pendahuluan

Pencemaran tanah oleh logam berat, khususnya timbal (Pb), menjadi isu lingkungan yang signifikan di Indonesia [1]. Logam berat ini dapat berasal dari berbagai sumber seperti limbah industri, pertambangan, dan penggunaan bahan bakar fosil [2]. Timbal sangat berbahaya karena bersifat karsinogenik dan dapat mencemari udara, air, tanah, tumbuhan, hewan, serta manusia. Selain itu, timbal dapat bertahan lama di dalam tanah dan terus-menerus menimbulkan toksisitas pada ekosistem [3]. Pencemaran timbal di lingkungan pertanian memungkinkan logam ini diserap oleh tanaman dan terakumulasi, menimbulkan risiko kesehatan serius bagi konsumen. Sebagai contoh, studi di berbagai negara, termasuk Vietnam, menunjukkan bahwa konsentrasi timbal di sawah dekat area industri dapat mencapai 10.000 mg/kg, jauh melebihi batas aman, yang dapat menyebabkan gangguan perkembangan kognitif pada anak-anak, termasuk penurunan IQ, serta kerusakan kardiovaskular pada orang dewasa [4].

Di Indonesia, pengaturan mengenai tanah yang terkontaminasi limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) diatur dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 101 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah B3. Dalam peraturan ini, tercantum batas konsentrasi total logam berat timbal Pb^{2+} yaitu 300 mg/kg [5]. Meskipun Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 101 Tahun 2014 menetapkan ambang batas pencemaran timbal (Pb) dalam tanah sebesar 300 mg/kg, berbagai bukti ilmiah internasional dan praktik kesehatan lingkungan menunjukkan bahwa ambang tersebut tergolong terlalu tinggi jika dilihat dari sudut pandang perlindungan kesehatan, terutama bagi kelompok rentan seperti anak-anak. Paparan timbal dalam tanah bahkan pada konsentrasi yang lebih rendah, seperti 100 mg/kg, telah terbukti berisiko dan layak untuk segera ditangani melalui tindakan remediasi.

Berdasarkan pedoman terbaru dari USEPA ambang batas timbal dalam tanah residensial telah direkomendasikan sebesar 100 mg/kg, khususnya apabila terdapat sumber paparan tambahan seperti cat timbal, pipa air timbal, atau pencemaran udara oleh Pb. Nilai ini ditetapkan dengan mempertimbangkan paparan agregat timbal dan peningkatan risiko terhadap anak-anak yang tinggal di lingkungan dengan berbagai sumber kontaminasi. Dengan demikian, tindakan remediasi sebaiknya dilakukan segera ketika kadar timbal di tanah mencapai atau melebihi 100 mg/kg [6].

Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan upaya remediasi yang efektif. Remediasi merupakan proses untuk mengurangi pengaruh kontaminan terhadap kesehatan manusia dan lingkungan [7]. Berbagai metode remediasi dapat diterapkan, baik secara fisika, kimia, maupun biologi. Salah satu metode yang menjanjikan adalah aerasi tanah, yang bertujuan meningkatkan pasokan oksigen (O_2) ke dalam tanah [8]. Aerasi tanah dapat mengoksidasi logam berat, sehingga menjadikannya lebih stabil dengan mengurangi mobilitas dan toksisitas timbal [9], yang pada akhirnya meminimalkan risiko pencemaran lebih lanjut.

Namun, efektivitas aerasi dapat sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan tanah, terutama pH. Pada kondisi pH rendah (asam), logam berat cenderung lebih mudah larut dan berpindah, yang meningkatkan risiko pencemaran air tanah dan penyerapan oleh tanaman [10]. Sebaliknya, pada pH tinggi (basa), timbal cenderung mengendap dan menjadi kurang tersedia bagi tanaman dan organisme tanah [11]. Oleh karena itu, pengaturan pH tanah adalah langkah krusial untuk mengoptimalkan proses stabilisasi dan meningkatkan efektivitas metode remediasi.

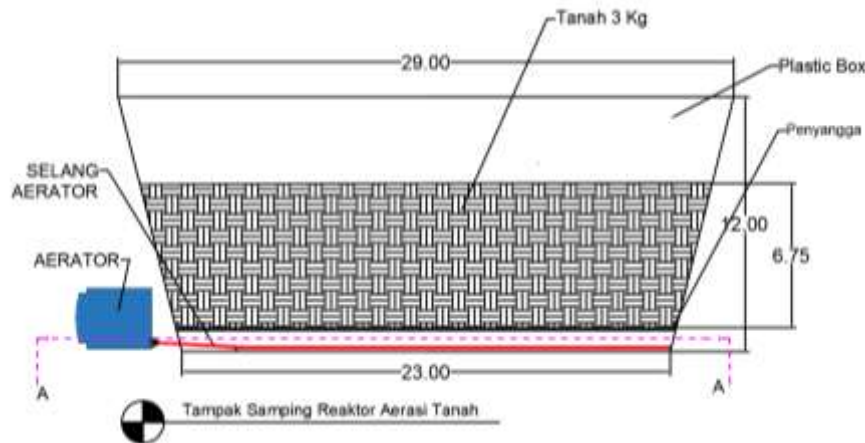
Meskipun penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa aerasi dapat meningkatkan ketersediaan oksigen dan pengaturan pH tanah efektif dalam mengurangi mobilitas dan toksisitas logam berat [12], namun studi tentang kombinasi aerasi dan pengaturan pH untuk remediasi tanah yang terkontaminasi timbal masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi pH tanah (asam, netral, basa) terhadap efektivitas metode aerasi dalam menstabilkan timbal (Pb^{2+}) pada media tanah terkontaminasi. Selain itu, dilakukan analisis terhadap karakteristik fisik tanah pada sebelum dan setelah aerasi untuk melihat apakah ada perubahan pada karakteristik fisik tanah. Dengan memahami interaksi antara pH tanah dan aerasi, diharapkan dapat dikembangkan strategi remediasi yang lebih efisien dan ramah lingkungan untuk mengatasi pencemaran tanah oleh logam berat. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi tentang kaitan pH tanah dan aerasi, untuk dikembangkan sebagai strategi pengolahan tanah.

2. Metode Penelitian

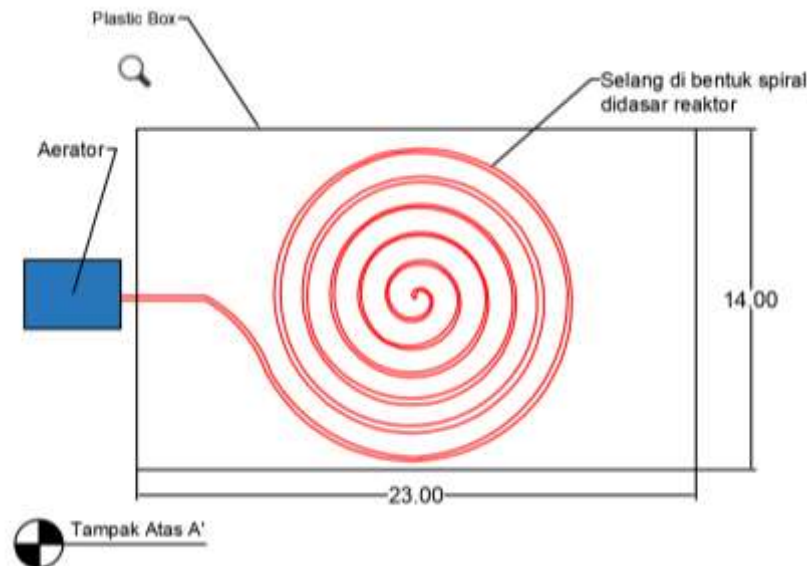
Penelitian ini merupakan studi eksperimental kuantitatif yang bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi pH tanah dan metode aerasi dalam menstabilkan timbal (Pb^{2+}) pada media tanah yang tercemar.

2.1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan sistem reaktor *batch* dengan total dua belas reaktor, di mana setiap reaktor berisi 3 kg tanah. Desain percobaan ini melibatkan dua variabel utama: pH tanah dan durasi aerasi. Variasi pH tanah diatur pada kondisi asam (pH 4), netral (pH 6,5), dan basa (pH 10). Sementara itu, dosis aerasi divariasikan menjadi tanpa aerasi (0 jam), aerasi parsial (6 jam), aerasi parsial (12 jam), dan aerasi penuh (24 jam). Untuk perlakuan tanpa aerasi, reaktor ditutup rapat untuk menciptakan kondisi hipoksia, sedangkan untuk perlakuan aerasi, udara diinjeksikan melalui selang ke dalam reaktor menggunakan aerator. Sampel diambil pada jam ke- 6, jam ke-12, jam ke- 24 dan jam ke-72 dari setiap perlakuan untuk dievaluasi. Desain reaktor ditampilkan pada **Gambar 1 & Gambar 2**.



Gambar 1. Tampak Samping Reaktor



Gambar 2. Tampak Atas Reaktor

2.2. Alat Dan Bahan Penelitian

Penelitian ini menggunakan serangkaian alat dan bahan spesifik untuk memastikan kondisi eksperimen yang terkontrol dan akurat. Untuk sistem reaktor, kotak plastik digunakan sebagai wadah utama, yang memungkinkan proses batch dapat dilakukan secara efisien. Proses aerasi, yang merupakan salah satu variabel kunci, didukung oleh aerator dan selang aerator, yang berfungsi untuk menginjeksikan udara ke dalam tanah.

Pengaturan dan pemantauan kondisi lingkungan dalam reaktor juga dilakukan dengan cermat. pH meter digunakan untuk mengukur dan memantau pH tanah di setiap perlakuan, memastikan kondisi asam, netral, atau basa tetap stabil. Selain itu, timbangan digital dan termometer juga tersedia untuk menimbang bahan dan memantau suhu, memastikan parameter fisik terkontrol dengan baik.

Adapun bahan-bahan yang digunakan meliputi tanah tercemar timbal (Pb^{2+}) sebagai subjek utama penelitian. Untuk mengatur variasi pH, asam humat digunakan untuk menciptakan kondisi pH asam, sementara kapur dolomit berfungsi untuk menaikkan pH dan menciptakan kondisi basa. Terakhir, aquadest digunakan sebagai pelarut standar untuk berbagai kebutuhan dalam persiapan sampel dan analisis.

2.3. Analisis Data

Efektivitas stabilisasi timbal (Pb^{2+}) dalam penelitian ini dievaluasi melalui pengukuran konsentrasi timbal yang tersisa di dalam tanah. Proses analisis dilakukan menggunakan Spektrofotometri Serapan Atom (AAS) dengan instrumen Shimadzu AA-7000. Sebelum diukur, sampel tanah terlebih dahulu diekstraksi menggunakan larutan asam nitrat (HNO_3) untuk melarutkan timbal yang ada di dalamnya. Efisiensi stabilisasi kemudian dihitung dengan membandingkan konsentrasi timbal dalam tanah sebelum dan sesudah

perlakuan, memberikan gambaran kuantitatif mengenai seberapa efektif metode ini mengurangi ketersediaan timbal.

Untuk mengolah dan menganalisis data, digunakan pendekatan statistik. Analisis Varian (ANOVA) diterapkan untuk menguji signifikansi pengaruh dari dua variabel utama, yaitu variasi pH dan durasi aerasi, terhadap efisiensi stabilisasi timbal. Selain itu, statistik deskriptif digunakan untuk meringkas dan menggambarkan karakteristik utama dari data yang terkumpul, memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai hasil penelitian.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hasil pengamatan terhadap penurunan logam berat timbal (Pb^{2+}) pada tanah tercemar logam berat menggunakan metode aerasi dan perlakuan pH selama proses stabilisasi. Penelitian ini dilaksanakan menggunakan 3 reaktor secara batch, dengan durasi aerasi yaitu : 6 jam/hari. Dari durasi aerasi tersebut di masing-masing perlakuan aerasi dikombinasikan dengan tiga kondisi pH yaitu : netral (6,5), asam (4), dan basa (10). Pengamatan dilakukan pada empat titik waktu pengamatan (Periode Aerasi), yaitu 0 jam, 6 jam, 12 jam, dan 24 jam.

Setelah proses inkubasi pada waktu-waktu pengamatan yang telah ditentukan, dilakukan analisis untuk mengevaluasi efektivitas proses stabilisasi logam berat Pb^{2+} di dalam tanah. Analisis dalam penelitian ini adalah pengukuran kadar Pb^{2+} sisa dalam tanah menggunakan metode *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS). Berikut adalah tabel hasil penelitian berdasarkan variasi pH, durasi aerasi, dan periode aerasi.

Tabel 1. Hasil Analisis Konsentrasi Pb^{2+} Durasi Aerasi 6 Jam/Hari

Periode Aerasi \ pH	4	6,5	10
	mg/g	mg/g	mg/g
0 Jam	0.123	0.123	0.123
6 Jam	0.075	0.058	0.0402
12 Jam	0.072	0.0381	0.03
24 Jam	0.068	0.037	0.0262

Tabel 2. Persen Removal Pb^{2+} Dalam Tanah Durasi Aerasi 6 Jam/Hari

Periode Aerasi \ pH	4	6,5	10
	%	%	%
0 Jam	0	0	0
6 Jam	39.02	52.85	67.32
12 Jam	41.46	69.02	75.61
24 Jam	44.72	69.92	78.7

3.2. Pembahasan

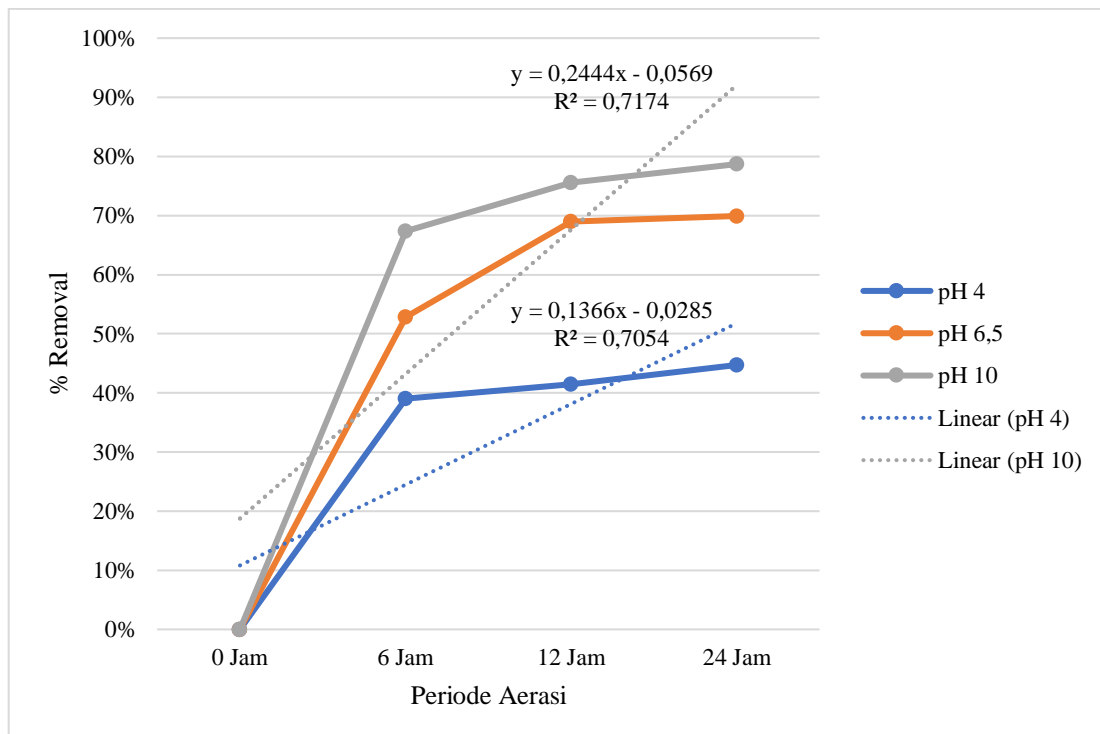
3.2.1. Pengaruh pH terhadap efisiensi removal Pb^{2+}

Berdasarkan data yang disajikan, variasi pH tanah secara nyata memengaruhi tingkat penurunan kadar Pb^{2+} . Pada setiap titik periode aerasi (6, 12, dan 24 jam) dengan dosis aerasi 6 jam, perlakuan pada pH basa (pH 10) secara konsisten menunjukkan efisiensi *removal* tertinggi. Misalnya, setelah 6 jam aerasi, efisiensi pada pH 10 mencapai 67.32%, jauh melampaui pH 6.5 (52.85%) dan pH 4 (39.02%). Tren ini

berlanjut hingga 24 jam, di mana efisiensi pada pH 10 meningkat menjadi 78,7%, sedangkan efisiensi pada pH 6,5 dan pH 4 masing-masing hanya 69,92% dan 44,72%.

Temuan ini konsisten dengan teori pH tanah memiliki pengaruh signifikan terhadap ketersediaan logam berat dalam tanah, ketersediaan Pb^{2+} dalam tanah berhubungan negatif secara signifikan dengan pH tanah, yang berarti bahwa semakin asam tanah (pH rendah), maka logam-logam tersebut menjadi lebih larut. Sebaliknya, dalam tanah dengan pH netral hingga basa, logam-logam tersebut cenderung terpresipitasi atau berikatan dengan partikel tanah, sehingga mengurangi ketersediaannya [13]. Pada pH tinggi, ion Pb^{2+} bereaksi dengan ion hidroksida (OH^-) atau karbonat (CO_3^{2-}) yang tersedia, membentuk senyawa presipitat (endapan) yang tidak larut seperti timbal hidroksida ($Pb(OH)_2$) atau timbal karbonat ($PbCO_3$) [14]. Proses presipitasi ini secara efektif mengimobilisasi timbal, mengubahnya dari bentuk yang *mobile* dan beracun menjadi fasa padat yang terikat kuat di dalam matriks tanah. Sebaliknya, pada pH asam, timbal tetap berada dalam bentuk ion yang mudah larut dan lebih *mobile*, sehingga sulit untuk distabilkan, seperti terlihat dari efisiensi yang lebih rendah pada pH 4. Studi sebelumnya oleh juga menunjukkan bahwa peningkatan aerasi dapat menaikkan pH tanah dari kondisi asam ke basa dalam waktu singkat, yang secara langsung berkontribusi pada stabilisasi Pb karena pembentukan senyawa tak larut pada kondisi pH tinggi [15].

Analisis statistik menggunakan General Linear Model dan ANNOVA menguatkan kesimpulan yang ditarik dari data mentah. Nilai P-value untuk faktor pH (0,001) dan Waktu Sampling (0,017) keduanya berada di bawah tingkat signifikansi 0,05, menunjukkan bahwa kedua faktor ini memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap efisiensi penurunan kadar Pb^{2+} . Hal ini didukung oleh nilai R-sq model yang sangat tinggi sebesar 99,32%, yang menunjukkan bahwa hampir semua variasi hasil dapat dijelaskan oleh model ini. Koefisien model regresi juga menegaskan bahwa pH 4,0 secara signifikan menurunkan efisiensi (koefisien negatif), sementara pH 6,5 dan waktu aerasi yang lebih lama (12 dan 24 jam) secara signifikan meningkatkan efisiensi (koefisien positif). Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pH basa dan durasi aerasi yang lebih panjang merupakan kombinasi perlakuan yang paling optimal untuk stabilisasi timbal dalam tanah.



Gambar 3. Persen Removal Pb^{2+} Dalam Tanah Setiap Variasi pH Pada Durasi Aerasi 6 Jam

Grafik Efisiensi Removal Pb^{2+} di atas memvisualisasikan data dari tabel dan menunjukkan tren yang sama. Garis abu-abu (pH 10) secara konsisten berada di posisi teratas, menunjukkan efisiensi *removal* yang paling tinggi. Sementara itu, garis biru (pH 4) berada di posisi terbawah, menggambarkan efisiensi yang paling rendah. Garis oranye (pH 6.5) menunjukkan efisiensi yang berada di antara keduanya. Peningkatan efisiensi juga terlihat pada semua kondisi pH seiring dengan bertambahnya waktu aerasi, yang menunjukkan bahwa proses aerasi berperan dalam meningkatkan stabilitas timbal di dalam tanah.

3.2.2. Pengaruh Metode Aerasi Terhadap Pengaruh Fisika Tanah

Metode aerasi secara teori merupakan metode penting untuk memperbaiki karakteristik fisik tanah, terutama dalam meningkatkan pertukaran gas dan memperbaiki struktur agregat tanah. Hal ini sangat relevan untuk tanah bertekstur liat yang cenderung memiliki porositas rendah dan aerasi terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini menguji sejauh mana metode aerasi dapat memodifikasi sifat-sifat fisik tersebut, yang dapat diamati pada tabel berikut.

Tabel 3. Hasil Analisis Porositas Tanah

No.	Kode Sampel	BI (g/cm ³)	BJ (g/cm ³)	Porositas (%)
1.	Sampel Awal	1,32	2,64	49,71
2.	Non-Aerasi	1,48	2,90	48,97
3.	Aerasi 12 Jam	1,45	2,83	48,76

Tabel 3 di atas menunjukkan bahwa porositas tanah sampel mengalami penurunan dari 49,71% pada sampel awal menjadi 48,97% pada sampel non-aerasi dan 48,76% pada sampel aerasi 12 jam. Penurunan ini dapat terjadi karena penambahan larutan basa yang menyebabkan pemadatan pada agregat tanah, sehingga mengurangi ruang pori secara keseluruhan. Hasil ini mengindikasikan bahwa efek pemadatan akibat penambahan larutan dan pengadukan awal lebih dominan dibandingkan efek aerasi dalam meningkatkan porositas pada jenis tanah liat ini. Selain itu, perlakuan aerasi dan penambahan larutan basa juga memengaruhi kadar air.

Tabel 4. Hasil Analisis Kadar Air Tanah

No.	Kode Sampel	Berat Cawan	Berat Cawan + Isi (A)	Berat Isi (A)	Berat Cawan + Isi (B)	Berat Isi (B)	Kadar Air (%)
1.	Sampel Awal	3,80	13,59	9,79	12,53	8,73	12,14
2.	Non-Aerasi	5,11	15,11	10,00	13,71	8,60	14,00
3.	Aerasi 12 Jam	5,02	15,02	10,00	13,63	8,61	13,90
4.	Aerasi 24 Jam	3,62	13,62	10,00	12,39	8,77	12,30

Tabel 4 menunjukkan bahwa kadar air sampel yang diberi perlakuan cenderung lebih tinggi dibandingkan sampel awal, yang disebabkan oleh penambahan larutan basa. Namun, perlakuan aerasi terbukti membantu menurunkan kadar air. Misalnya, sampel aerasi 24 jam memiliki kadar air 12,30%, yang hampir kembali ke kondisi awal 12,14%. Penurunan ini menunjukkan bahwa proses aerasi membantu mengurangi kelembaban tanah melalui percepatan evaporasi. Meskipun efeknya terbatas, kemampuan aerasi untuk mengurangi kadar air tetap berperan penting dalam menciptakan kondisi yang lebih kering dan aerobik, yang merupakan faktor kunci untuk proses stabilisasi timbal.

Secara keseluruhan, data dari kedua tabel menunjukkan bahwa perlakuan aerasi dan penambahan larutan basa secara kolektif memengaruhi karakteristik fisik tanah. Meskipun penambahan larutan basa menyebabkan peningkatan kadar air dan penurunan porositas awal, perlakuan aerasi secara konsisten bekerja untuk menurunkan kelembaban tanah. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa meskipun efek aerasi terhadap porositas tanah liat terbatas, kemampuannya untuk mengurangi kadar air tetap berperan penting dalam menciptakan kondisi yang lebih kering dan aerobik, yang merupakan faktor kunci untuk proses stabilisasi timbal.

4. Kesimpulan

Secara keseluruhan, penelitian ini menyimpulkan bahwa pH tanah dan durasi aerasi merupakan faktor yang sangat signifikan dalam menstabilkan timbal (Pb²⁺) pada tanah yang tercemar. Hal ini didukung oleh analisis statistik ANOVA yang menunjukkan nilai P-value untuk kedua faktor ini berada di bawah 0,05, membuktikan adanya pengaruh yang kuat.

Kondisi pH basa (pH 10) terbukti paling efektif dalam stabilisasi timbal, dengan efisiensi tertinggi mencapai 78,7% pada durasi aerasi 24 jam. Efektivitas ini terjadi karena reaksi presipitasi yang mengubah timbal dari bentuk mobile menjadi endapan yang tidak larut, sehingga mengurangi ketersediaannya di lingkungan.

Meskipun efeknya terhadap porositas tanah liat terbatas, proses aerasi berperan penting dalam meningkatkan efisiensi stabilisasi. Aerasi efektif dalam menurunkan kadar air tanah, menciptakan kondisi kering dan aerobik yang mendukung proses stabilisasi timbal perpanjang kalimatnya

5. Daftar Pustaka

- [1] F. N. Afifah and E. Retnaningrum, "Isolasi dan Identifikasi Bakteri Dekontaminasi Logam Berat Timbal (Pb) dari Tempat Pengelolaan Sampah Terpadu (TPST) Piyungan, Bantul, Yogyakarta," *Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, vol. 10, no. 3, pp. 126–133, Dec. 2023, doi: 10.21776/ub.jsal.2023.010.03.4.
- [2] Y. Ma *et al.*, "Assessment of heavy metal pollution and the effect on bacterial community in acidic and neutral soils," *Ecol Indic*, vol. 117, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106626.
- [3] J. P. Tropik, L. Sidauruk, and P. Sipayung, "Phytoremediation of Contaminated Land at Medan Industrial Area by Ornamental Plants," vol. 2, no. 2, pp. 178–186, 2015.
- [4] W. Ali *et al.*, "Comprehensive review of the basic chemical behaviours, sources, processes, and endpoints of trace element contamination in paddy soil-rice systems in rice-growing countries," Oct. 05, 2020, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122720.
- [5] Pemerintah Republik Indonesia, "Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (PP No.101 Tahun 2014)," 2014.
- [6] Grasso, Domenic. "Comprehensive environmental response, compensation, and liability act (CERCLA)." *Hazardous waste site remediation*. Routledge, 2017. 27-46.
- [7] W. Purbalisa and T. Dewi, "Remediasi Tanah Tercemar Kobalt (Co) Menggunakan Bioremediator Dan Amelioran," *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, vol. 6, no. 2, pp. 1237–1242, Jul. 2019, doi: 10.21776/ub.jtstl.2019.006.2.4.
- [8] I. Ben-Noah, I. Nitsan, B. Cohen, G. Kaplan, and S. P. Friedman, "Soil aeration using air injection in a citrus orchard with shallow groundwater," *Agric Water Manag*, vol. 245, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.agwat.2020.106664.
- [9] L. Liu, W. Li, W. Song, and M. Guo, "Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability," Aug. 15, 2018, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.161.
- [10] N. Bolan *et al.*, "Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils - To mobilize or to immobilize?," Feb. 15, 2014, *Elsevier*. doi: 10.1016/j.jhazmat.2013.12.018.
- [11] Brian. J. Alloway, "Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability," 2013. Accessed: Mar. 10, 2025.
- [12] P. Dvořák, P. I. Nikel, J. Damborský, and V. de Lorenzo, "Bioremediation 3.0: Engineering pollutant-removing bacteria in the times of systemic biology," Nov. 15, 2017, *Elsevier Inc.* doi: 10.1016/j.biotechadv.2017.08.001.
- [13] S. Hou, N. Zheng, L. Tang, X. Ji, and Y. Li, "Effect of soil pH and organic matter content on heavy metals availability in maize (*Zea mays* L.) rhizospheric soil of non-ferrous metals smelting area," *Environ Monit Assess*, vol. 191, no. 10, Oct. 2019, doi: 10.1007/s10661-019-7793-5.
- [14] F. Liao *et al.*, "Stabilization mechanism and remediation effectiveness of Pb and cd in agricultural soil using nonmetallic minerals," *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-96970-z.
- [15] C. R. Anderson, M. E. Peterson, R. A. Frampton, S. R. Bulman, S. Keenan, and D. Curtin, "Rapid increases in soil pH solubilise organic matter, dramatically increase denitrification potential and strongly stimulate microorganisms from the Firmicutes phylum," *PeerJ*, vol. 2018, no. 12, 2018, doi: 10.7717/peerj.6090.