

Pengaruh Penambahan Pasir Pada Metode Aerasi Tanah Dalam Stabilisasi Timbal (Pb)

Faiq Pandu Mahajana, Muhammad Abdus Salam Jawwad

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

*Koresponden email: muhammad.abdus.tl@upnjatim.ac.id

Diterima: 9 Oktober 2025

Disetujui: 17 Oktober 2025

Abstract

Soil contamination by heavy metals, particularly lead (Pb), is a serious environmental issue in Indonesia, as it affects human health, ecosystems, and land productivity. Pb can accumulate in plants and enter the food chain, increasing public health risks. Therefore, an effective, low-cost, and field-applicable remediation method is required. One potential approach is aeration, which involves oxygen addition to improve soil porosity and enhance heavy metal stabilization. However, the effectiveness of aeration is strongly influenced by soil physical properties; hence, this study focuses on the effect of soil–sand composition on Pb stabilization in Inceptisol soil. The research was conducted using a laboratory-scale batch reactor with Inceptisol soil contaminated by $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ (300 mg/kg). Treatments included three soil–sand ratios (100:0, 70:30, and 60:40) and three aeration durations (non-aerated, 12 hours, and 24 hours). Parameters analyzed were residual Pb^{2+} concentration and soil physical characteristics, with data processed using two-way ANOVA. Results showed that sand addition improved aeration effectiveness, achieving the highest Pb removal (94,6%; final Pb 17,1 mg/kg) at 60:40 composition with 24-hour aeration. In contrast, pure soil without aeration showed the lowest effectiveness (76,1%). Statistical tests confirmed that media composition, aeration duration, and their interaction significantly affected Pb stabilization ($p < 0,05$). This study demonstrates that combining aeration with sand addition offers a simple and practical method for remediating Pb-contaminated Inceptisol soil.

Keywords: *lead, heavy metal, soil aeration, sand*

Abstrak

Pencemaran tanah oleh logam berat, khususnya timbal (Pb), merupakan masalah serius di Indonesia karena berdampak pada kesehatan manusia, ekosistem, dan produktivitas lahan. Pb dapat terakumulasi dalam tanaman dan masuk ke rantai makanan, sehingga meningkatkan risiko kesehatan masyarakat. Oleh karena itu, diperlukan metode remediasi yang efektif, ekonomis, dan mudah diterapkan di lapangan. Salah satu metode potensial adalah aerasi, yaitu penambahan oksigen untuk memperbaiki porositas tanah dan mendukung stabilisasi logam berat. Namun, efektivitas aerasi sangat dipengaruhi oleh sifat fisik tanah, sehingga penelitian ini difokuskan pada pengaruh komposisi tanah–pasir terhadap stabilisasi Pb dalam tanah Inceptisol. Penelitian dilakukan menggunakan sistem *batch reactor* skala laboratorium dengan tanah Inceptisol yang dikontaminasi $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ (300 mg/kg). Perlakuan terdiri dari tiga variasi komposisi tanah–pasir (100:0, 70:30, dan 60:40) serta tiga variasi durasi aerasi (non-aerasi, 12 jam, dan 24 jam). Parameter yang diuji meliputi kadar Pb^{2+} sisa dan sifat fisik tanah, dianalisis dengan ANOVA two-way. Hasil menunjukkan bahwa penambahan pasir meningkatkan efektivitas aerasi, dengan removal tertinggi mencapai 94,6% (Pb akhir 17,1 mg/kg) pada komposisi 60:40 dan aerasi 24 jam. Sebaliknya, tanah murni tanpa aerasi menunjukkan efektivitas terendah sebesar 76,1%. Uji statistik membuktikan bahwa komposisi media, durasi aerasi, dan interaksinya berpengaruh signifikan terhadap stabilisasi Pb ($p < 0,05$). Penelitian ini menegaskan bahwa kombinasi aerasi dan penambahan pasir merupakan metode sederhana dan aplikatif untuk remediasi tanah Inceptisol tercemar Pb.

Kata Kunci: *timbal, logam berat, aerasi tanah, pasir*

1. Pendahuluan

Pencemaran tanah oleh logam berat, khususnya timbal (Pb), menjadi masalah lingkungan serius di Indonesia karena berdampak pada ekosistem, kesehatan masyarakat, dan keberlanjutan pertanian. Keberadaan Pb di lingkungan tanah bersifat berbahaya karena logam ini tidak dapat terdegradasi secara alami, sehingga cenderung mengalami akumulasi dari waktu ke waktu. Sumber utama kontaminasi berasal dari aktivitas industri yang tidak terkendali serta penggunaan pupuk dan pestisida yang mengandung logam berat [1]. Kondisi ini menunjukkan bahwa pencemaran Pb tidak hanya terjadi di sekitar kawasan industri, melainkan juga dapat menjangkau area pertanian akibat aktivitas manusia sehari-hari. Akumulasi Pb dalam tanah dapat merusak struktur tanah, menurunkan kesuburan, serta mengganggu proses biogeokimia penting yang menjadi dasar produktivitas lahan. Dari sisi kesehatan, paparan Pb berhubungan dengan gangguan sistem saraf, hipertensi, anemia, kerusakan ginjal, gangguan pencernaan, hingga masalah reproduksi [2]. Efek kronisnya juga bersifat karsinogenik sehingga meningkatkan risiko penyakit berbahaya. Kelompok anak-anak merupakan populasi paling rentan karena sistem saraf mereka masih dalam tahap perkembangan.

Bahkan paparan dengan kadar rendah pun dapat menyebabkan hambatan pada pertumbuhan, perkembangan kognitif, serta menurunkan kemampuan belajar. Sementara itu pada orang dewasa, paparan Pb berkontribusi terhadap meningkatnya risiko penyakit kronis seperti gangguan tekanan darah tinggi dan gangguan metabolisme tubuh. Selain itu, akumulasi Pb pada tanaman memungkinkan logam ini masuk ke rantai makanan, sehingga memperbesar risiko kesehatan masyarakat [3]. Dengan demikian, pencemaran Pb perlu dipandang sebagai ancaman ekologi sekaligus kesehatan publik jangka panjang.

Untuk mengurangi dampak tersebut, berbagai metode remediasi telah dikembangkan. Fitoremediasi dengan memanfaatkan tanaman hiperakumulator cukup menjanjikan karena relatif ramah lingkungan, tetapi efektivitasnya sangat bergantung pada spesies tanaman, kondisi tanah, serta durasi pertumbuhan. Pada praktiknya, masih dibutuhkan identifikasi lebih lanjut mengenai jenis tanaman yang benar-benar efektif dalam menyerap Pb serta mekanisme serapannya [4]. Metode aerasi dinilai potensial karena melibatkan penambahan oksigen ke dalam tanah dengan bantuan gelembung udara. Penelitian sebelumnya melaporkan bahwa aerasi dapat meningkatkan efektivitas remediasi logam berat melalui peningkatan ketersediaan oksigen yang mengubah kondisi redoks tanah [5]. Dengan kondisi tanah yang lebih teroksigenasi, reaksi fisikokimia yang mendukung imobilisasi Pb dapat berlangsung lebih optimal, sehingga konsentrasi Pb yang tersedia bagi tanaman dapat ditekan. Efektivitas aerasi sendiri bergantung pada sifat fisik tanah, meliputi tekstur, struktur, porositas, dan permeabilitas. Tanah bertekstur halus, terutama yang kaya fraksi liat, umumnya memiliki pori-pori kecil (mikropori) yang mendominasi. Hal ini membatasi pergerakan udara dan menyebabkan distribusi oksigen tidak merata.

Kondisi aerasi pada tanah seperti ini menjadi terbatas, sehingga efektivitas remediasi tidak tercapai. Untuk itu, diperlukan modifikasi media agar aerasi dapat lebih optimal. Salah satu upaya sederhana adalah penambahan pasir, yang berfungsi memperbaiki porositas dan mendukung aktivitas mikroba yang juga berperan dalam stabilisasi logam berat [6]. Dengan ukuran partikel yang lebih besar, pasir dapat meningkatkan jumlah makropori, memperlancar aliran udara, serta memperbaiki infiltrasi air, sehingga oksigen dapat lebih mudah tersebar ke seluruh lapisan tanah.

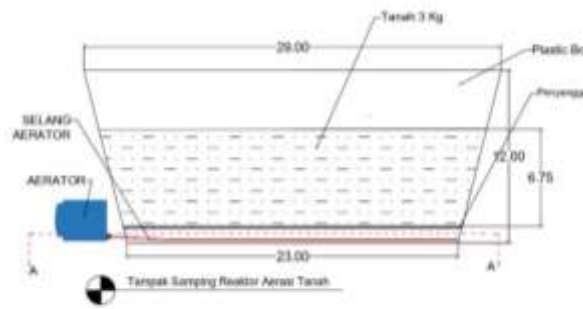
Penambahan pasir meningkatkan jumlah makropori yang memperlancar aliran udara, infiltrasi air, dan menjaga kelembapan tanah yang seimbang [7]. Dengan meningkatnya pori makro, tanah menjadi lebih remah, sehingga tidak hanya mendukung sirkulasi udara tetapi juga meningkatkan kemampuan tanah dalam menahan air dalam jumlah yang proporsional. Hal ini penting untuk menjaga keseimbangan kelembapan yang mendukung proses kimiawi sekaligus mencegah kondisi anaerob yang justru dapat memobilisasi logam berat kembali ke bentuk yang lebih larut. Dengan demikian, perbaikan struktur dan tekstur tanah melalui penambahan pasir diharapkan dapat meningkatkan kinerja aerasi dalam remediasi. Tanah Inceptisol dipilih sebagai media penelitian karena merupakan salah satu ordo tanah dengan penyebaran luas di Indonesia. Tanah ini umumnya ditandai dengan kandungan bahan organik yang rendah, struktur yang kurang stabil, serta porositas yang terbatas [8].

Kondisi tersebut membuat Inceptisol rentan terhadap pencemaran logam berat karena kemampuan alaminya dalam menahan pencemar relatif rendah. Penambahan bahan organik memang terbukti dapat meningkatkan porositas dan menurunkan kepadatan tanah [9]. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan untuk menganalisis peran pasir dalam meningkatkan aerasi dan hubungannya dengan stabilisasi Pb pada tanah Inceptisol, sebagai upaya menemukan metode remediasi yang efektif, murah, dan aplikatif.

2. Metode Penelitian

Desain Penelitian

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental dengan sistem batch reactor skala laboratorium menggunakan tanah Inceptisol yang didapatkan dari Wonosalam, Jawa Timur. Tanah dikontaminasi larutan $Pb(NO_3)_2$ dengan merk SMARTLAB dengan massa molar 331,21 g/mol pada konsentrasi 300 mg/kg dengan cara dilarutkan ke dalam aquades dan untuk mencapai konsentrasi 300 mg/kg Pb pada 3 kg tanah, dibutuhkan 0,9 g Pb. Karena kandungan Pb dalam $Pb(NO_3)_2$ adalah 62,56%, maka jumlah $Pb(NO_3)_2$ yang diperlukan sebesar $0,9 \div 0,6256 = 1,44$ g, atau sekitar 1,48 g. Media perlakuan disiapkan dalam sembilan reaktor berkapasitas 3 kg tanah dengan variasi komposisi tanah-pasir (100:0, 70:30, dan 60:40) serta dosis aerasi berbeda, yaitu non-aerasi, aerasi 12 jam, dan aerasi 24 jam. Aerasi diberikan menggunakan aerator kolam berkapasitas 11,16 L/menit, sedangkan pH tanah dijaga dalam kondisi basa (≥ 9) dengan penambahan kapur dolomit. Pengamatan dilakukan pada jam ke-0, 12, 24, dan 72 untuk mengevaluasi kadar Pb^{2+} sisa serta perubahan karakteristik fisik tanah, meliputi tekstur, struktur, porositas, dan kadar air.



Gambar 1. Desain Reaktor Aerasi Tanah
Sumber : Penelitian (2025)

Alat dan Bahan Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas sembilan unit reaktor plastik tipe thinwall dengan kapasitas masing-masing 4.300 mL yang berfungsi sebagai wadah reaksi utama dalam sistem batch reactor skala laboratorium. Setiap reaktor dilengkapi dengan aerator kolam berkapasitas 11,16 L/menit yang digunakan untuk menyalurkan udara secara kontinu sesuai dengan durasi aerasi yang telah ditentukan, sehingga suplai oksigen dalam media tanah dapat dikontrol dengan baik. Untuk mendukung kegiatan pengukuran dan pengolahan sampel, digunakan beberapa peralatan pendukung seperti pH meter digital untuk memantau kestabilan pH tanah selama proses remediasi, timbangan digital untuk menimbang bahan dengan presisi, sekop kecil dan kontainer box untuk proses pencampuran serta homogenisasi tanah dan pasir, paranet sebagai pelindung selang aerator agar tidak tersumbat oleh tanah, serta perlengkapan tambahan berupa selotip, gunting, solder, dan lem yang digunakan dalam proses perakitan, penyegelan, dan penataan sistem aerasi agar tidak terjadi kebocoran udara.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas 30 kg tanah Inceptisol yang diambil sebagai media utama penelitian karena mewakili karakteristik tanah dengan porositas rendah dan struktur yang belum matang, sehingga relevan untuk pengujian pengaruh aerasi. Sebagai bahan campuran, digunakan 12 kg pasir komersial yang berfungsi untuk memperbaiki sifat fisik tanah, khususnya dalam meningkatkan porositas, permeabilitas, dan ketersediaan ruang udara di dalam reaktor. Kontaminan buatan berupa 43,2 gram $Pb(NO_3)_2$ digunakan untuk menciptakan kondisi tanah tercemar dengan kadar timbal sebesar 300 mg/kg, yang kemudian dilarutkan dalam 1.800 mL aquades agar penyebaran Pb lebih merata di seluruh media tanah. Selain itu, digunakan pula kapur dolomit komersial sebagai bahan penyeimbang pH yang berfungsi menjaga kondisi tanah tetap basa ($pH \geq 9$) selama proses remediasi berlangsung. Kondisi basa ini penting karena mempengaruhi bentuk spesiasi Pb dalam tanah serta mendukung terjadinya proses stabilisasi melalui pembentukan senyawa $PbCO_3$, $Pb(OH)_2$, atau PbO yang kurang larut.

Analisis Data

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kadar Pb^{2+} sisa dan perubahan karakteristik fisik tanah setelah perlakuan. Kadar Pb^{2+} dianalisis menggunakan Spektrofotometri Serapan Atom (SNI 8910:2021). Data yang diperoleh selanjutnya dianalisis menggunakan ANOVA *two-way* untuk menguji pengaruh dua faktor utama, yaitu komposisi tanah–pasir dan dosis aerasi, serta interaksinya terhadap efektivitas stabilisasi Pb. Pendekatan ini dipilih karena mampu menunjukkan apakah variasi komposisi media dan perlakuan aerasi perbedaan yang signifikan secara statistik terhadap kadar Pb^{2+} yang tersisa dalam tanah Inceptisol.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil Penelitian

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan pasir pada media tanah memberikan pengaruh nyata terhadap penurunan kadar Pb. Data pengamatan pada 72 jam memperlihatkan variasi yang cukup jelas antara setiap komposisi agregat tanah–pasir dan dosis aerasi yang diberikan. Rangkuman hasil pengujian ditampilkan pada **Tabel 1**.

Hasil pengujian pada 72 jam menunjukkan adanya perbedaan yang jelas pada efektivitas stabilisasi Pb berdasarkan variasi komposisi tanah–pasir dan durasi aerasi. Pada kondisi tanpa aerasi, media 100% tanah murni hanya mampu menurunkan Pb sebesar 76,1% dengan konsentrasi akhir 75,9 mg/kg. Sebaliknya, penambahan pasir memperlihatkan hasil yang lebih baik, di mana komposisi 70% tanah mencapai 85,3% (46,7 mg/kg) dan komposisi 60% tanah memberikan nilai tertinggi dengan removal 88,8%

(35,4 mg/kg). Hal ini menunjukkan bahwa meskipun tanpa aerasi, penambahan pasir sudah berpengaruh positif terhadap penurunan kadar Pb.

Tabel 1. Hasil Pengujian
Hasil Aerasi 72 Jam

Agregat	Dosis	Removal %	Kadar Pb (mg/kg)
100 % Tanah	Non-aerasi	76.1	75.9
70 % Tanah	Non-aerasi	85.3	46.7
60% Tanah	Non-aerasi	88.8	35.4
100 % Tanah	Aerasi 12 Jam	77.9	70.2
70 % Tanah	Aerasi 12 Jam	86.5	42.9
60% Tanah	Aerasi 12 Jam	91.4	27.4
100 % Tanah	Aerasi 24 Jam	80	63.6
70 % Tanah	Aerasi 24 Jam	87.8	38.7
60% Tanah	Aerasi 24 Jam	94.6	17.1

Pada perlakuan aerasi 12 jam, terjadi peningkatan efektivitas pada semua variasi. Media 100% tanah murni naik menjadi 77,9% dengan kadar akhir 70,2 mg/kg, sedangkan agregat 70% tanah menunjukkan nilai 86,5% (42,9 mg/kg). Komposisi 60% tanah kembali memberikan hasil tertinggi dengan removal 91,4% dan kadar akhir 27,4 mg/kg. Data ini menunjukkan bahwa kombinasi aerasi dan penambahan pasir memberikan hasil lebih baik dibandingkan perlakuan tunggal.

Lebih lanjut, aerasi 24 jam menghasilkan capaian tertinggi dibandingkan perlakuan lain. Media 100% tanah murni mencapai 80,0% (63,6 mg/kg), agregat 70% tanah menunjukkan 87,8% (38,7 mg/kg), dan agregat 60% tanah menempati posisi tertinggi dengan 94,6% serta kadar akhir hanya 17,1 mg/kg. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa komposisi 60% tanah dengan 40% pasir konsisten memberikan performa terbaik pada semua kondisi perlakuan, sedangkan tanah murni tanpa campuran pasir menunjukkan efektivitas paling rendah.

Pembahasan Penelitian

Perlakuan dengan agregat 100% tanah murni selalu memperlihatkan efektivitas terendah. Nilai removal yang hanya 76,1% tanpa aerasi dan 80,0% pada aerasi 24 jam diduga terkait dominasi fraksi liat. Struktur tanah murni yang padat dengan pori mikro menyebabkan difusi oksigen terhambat, sehingga aerasi yang diberikan tidak mampu bekerja secara maksimal. Perbedaan ini menunjukkan bahwa komposisi media sangat berpengaruh terhadap keberhasilan metode aerasi. Agregat 60% secara konsisten menunjukkan hasil removal tertinggi, yaitu 88,8% tanpa aerasi, bahwa penambahan pasir mampu menciptakan kondisi fisik tanah yang lebih mendukung proses stabilisasi Pb. Porositas yang lebih besar dan ruang antar partikel yang lebih longgar membuat oksigen lebih mudah berdifusi, sehingga proses imobilisasi logam berat dapat berlangsung lebih optimal.[10]

Hasil uji karakteristik tanah pada 72 jam mendukung temuan tersebut. Media dengan penambahan pasir, baik pada agregat 70% maupun 60%, memperlihatkan tekstur lebih remah, struktur lebih berkembang, serta porositas lebih tinggi dibandingkan tanah murni. Kondisi ini menjadikan aerasi lebih efektif karena distribusi udara merata dan kadar air tetap terjaga. Sebaliknya, tanah murni cenderung menahan air berlebih, sehingga membatasi ketersediaan ruang udara dan berpotensi menimbulkan kondisi anaerob [11].

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa penambahan pasir berperan penting dalam meningkatkan efektivitas aerasi. Peningkatan jumlah pori makro dan menurunnya kepadatan tanah membuat media lebih responsif terhadap perlakuan aerasi, terutama pada komposisi 60% tanah yang konsisten memberikan hasil terbaik. Dengan demikian, kombinasi aerasi dan penambahan pasir dapat dipandang sebagai pendekatan sederhana namun efektif untuk mendukung proses stabilisasi Pb dalam tanah Inceptisol [12].

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Agregat	2	283.449	141.724	205.07	0.000
Durasi	2	24.862	12.431	17.99	0.010
Error	4	2.764	0.691		
Total	8	311.076			

Gambar 2. Hasil Uji Anova Two-Way

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.831331	99.11%	98.22%	95.50%

Gambar 3. Hasil Model Summary

Analisis ANOVA *Two-Way* menunjukkan bahwa komposisi agregat tanah dan dosis aerasi berpengaruh signifikan terhadap stabilisasi timbal (Pb) pada tanah Inceptisol. Hasil uji ANOVA memperlihatkan faktor agregat memiliki pengaruh dominan dengan nilai $F = 205,07$ ($P = 0,000$) dan $Adj\ SS = 283,449$, jauh lebih besar dibanding dosis aerasi ($F = 17,99$; $P = 0,010$; $Adj\ SS = 24,862$). Nilai error yang rendah ($Adj\ MS = 0,691$) serta koefisien determinasi model yang sangat tinggi ($R^2 = 99,11\%$; $R^2_{adj} = 98,22\%$; $R^2_{pred} = 95,50\%$) menegaskan bahwa model mampu menjelaskan hampir seluruh variasi data sekaligus memiliki kemampuan prediksi yang baik. Hal ini menandakan bahwa kedua faktor signifikan terhadap efektivitas stabilisasi Pb, dengan komposisi agregat sebagai faktor paling berpengaruh.

Data removal pada periode aerasi 72 jam memperlihatkan bahwa agregat 60% menghasilkan stabilisasi terbaik. Nilai removal meningkat dari 88,8% tanpa aerasi, menjadi 91,4% pada aerasi 12 jam, dan mencapai 94,6% pada aerasi 24 jam. Sebaliknya, agregat 100% menunjukkan removal terendah dengan kisaran 76,1–80,0%. Secara umum, penambahan aerasi mampu meningkatkan removal pada semua komposisi, namun efeknya lebih optimal pada agregat dengan campuran pasir. Kondisi ini menegaskan bahwa variasi komposisi agregat, khususnya dengan keberadaan pasir, mampu memperbaiki struktur dan porositas tanah sehingga mendukung proses imobilisasi Pb secara lebih efektif.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa karakteristik fisik tanah berperan penting dalam menentukan efektivitas metode aerasi pada proses stabilisasi timbal (Pb) dalam tanah Inceptisol. Variasi komposisi tanah–pasir dan lama aerasi terbukti menghasilkan perbedaan nyata terhadap kadar Pb sisa. Dari keseluruhan perlakuan, komposisi agregat 60% tanah dengan 40% pasir memberikan hasil terbaik dengan nilai removal mencapai 94,6% pada aerasi 24 jam, sedangkan tanah murni 100% menunjukkan efektivitas terendah, yaitu hanya 76,1% tanpa aerasi dan 80,0% pada aerasi 24 jam.

Durasi aerasi juga terbukti memengaruhi hasil stabilisasi. Aerasi 12 jam sudah menunjukkan peningkatan signifikan dibandingkan kondisi tanpa aerasi, namun hasil paling optimal diperoleh pada aerasi 24 jam. Walaupun demikian, penerapan di lapangan perlu mempertimbangkan aspek teknis dan ekonomis, karena semakin lama aerasi diberikan maka kebutuhan energi juga semakin tinggi.

Implikasi praktis penelitian ini adalah bahwa kombinasi aerasi dan penambahan pasir dapat digunakan sebagai metode remediasi sederhana, murah, dan mudah diaplikasikan, terutama pada lahan pertanian maupun kawasan berisiko tinggi terhadap pencemaran Pb di Indonesia. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan uji coba skala lapangan, pemantauan jangka panjang, serta eksplorasi kombinasi aerasi dengan metode lain seperti fitoremediasi atau penambahan amelioran ramah lingkungan.

5. Referensi

- [1] Y. Hindarwati, T. R. Soeprbowati, M. Izzati, and H. Hadiyanto, "Kontaminan Logam Berat (Pb, Cd, dan Cu) pada Tanah dari Pupukan Berbasis Jerami Padi," *Jurnal Ilmu Lingkungan*, vol. 21, no. 1, pp. 8–14, Jan. 2023, doi: 10.14710/jil.21.1.8-14.
- [2] Soelistyoningsih, Dwi. "Pengaruh paparan kronis timbal (Pb) terhadap tekanan darah petugas parkir di pasar besar Kota Malang." *Jurnal Ilmiah Kesehatan Media Husada* 6.2 (2017): 295-301.
- [3] L. Fitrihanah, M. Yani, and S. Effendy, "The Impact of Pollution Motor Vehicle Activities to Lead (Pb) Content in Soil and Rice Plant," *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, vol. 7, no. 1, pp. 11–18, 2017, doi: 10.19081/jpsl.2017.7.1.11.
- [4] Novandi, R. "Remediasi tanah tercemar logam timbal (Pb) menggunakan tanaman bayam cabut (*Amaranthus tricolor* L.)." *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah* 2.1 (2014).
- [5] Komala, Ria, and Suhadi Aziz. "Pengaruh proses aerasi terhadap pengolahan limbah cair pabrik kelapa sawit di PTPN VII secara aerobik." *Jurnal Redoks* 4.2 (2019): 7-16.

- [6] M. Yani and K. Murtalaksono, "Bioremediation of a Clay Textured Soil Contaminated with Crude Oil: Application of Biopile Technique with Addition of Sand," *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, vol. 6, no. 1, pp. 13–19, 2016, doi: 10.19081/jpsl.6.1.13.
- [7] N. Hartanto, Zulkarnain, and A. A. Wicaksono, "Analisis Beberapa Sifat Fisik Tanah Sebagai Indikator Kerusakan Tanah Pada Lahan Kering," 2022.
- [8] Muyassir, Sufardi, and I. Saputra, "Perubahan Sifat Fisika Inceptisol Akibat Perbedaan Jenis Dan Dosis Pupuk Organik," 2012.
- [9] A. Azhari Harahap, Y. Oktorini, N. Qomar, and V. Volcherina Darlis, "Identification Of Inceptisol Soil Physical Properties In Land Use Around The Bina Widya Campus, Riau University," 2022, doi: 10.32502/sylva.v11i2.5413.
- [10] Y. Chen, D. Liu, J. Ma, B. Jin, J. Peng, and X. He, "Assessing the influence of immobilization remediation of heavy metal contaminated farmland on the physical properties of soil," *Science of the Total Environment*, vol. 781, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146773.
- [11] I. Sánchez-Castro, L. Molina, M. Á. Prieto-Fernández, and A. Segura, "Past, present and future trends in the remediation of heavy-metal contaminated soil - Remediation techniques applied in real soil-contamination events," Jun. 01, 2023, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e16692.
- [12] M. Sharma, N. Satyam, K. R. Reddy, and M. Chrysochoou, "Multiple heavy metal immobilization and strength improvement of contaminated soil using bio-mediated calcite precipitation technique," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, no. 34, pp. 51827–51846, Jul. 2022, doi: 10.1007/s11356-022-19551-x.
- [13] A. K. R. de Campos, K. M. V. Cavalieri-Polizeli, and V. de F. Melo, "Effects of compaction on lead availability in contaminated soils with contrasting texture," *Environ Monit Assess*, vol. 192, no. 11, p. 672, 2020, doi: 10.1007/s10661-020-08648-w.
- [14] J. Skála, F. Boahen, J. Száková, R. Vácha, and P. Tlustoš, "Arsenic and lead in soil: impacts on element mobility and bioaccessibility," *Environ Geochem Health*, vol. 44, no. 3, pp. 943–959, 2022, doi: 10.1007/s10653-021-01008-8.
- [15] S. Yang *et al.*, "Insights into remediation of cadmium and lead contaminated-soil by Fe-Mn modified biochar," *J Environ Chem Eng*, vol. 12, no. 3, p. 112771, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.JECE.2024.112771.