



DOI: <https://doi.org/10.38035/jgit.v3i2>
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Peran Fitoremediasi dalam Pemulihan Tanah Tercemar Logam Berat: Tinjauan Mekanisme dan Aplikasi

Khairul Amri¹, Fitri Adifa²

¹Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim, Malang, Indonesia, khairulamri1091@gmail.com

²Universitas Jambi, Jambi, Indonesia, fitriadifa19@gmail.com

Corresponding Author: khairulamri1091@gmail.com¹

Abstract: Heavy metal soil contamination is a serious environmental problem. This article aims to review the mechanisms and applications of phytoremediation as an alternative method for remediating heavy metal-contaminated soils. A descriptive method was used. The findings indicate that phytoremediation operates through three main mechanisms: phytoextraction, phytostabilization, and rhizodegradation. Several hyperaccumulator plants such as *Amaranthus hypochondriacus*, *Vetiveria zizanioides*, and *Brassica juncea* have shown effectiveness in accumulating or stabilizing metals like Cd, Pb, Cr, and As. Its effectiveness increases when combined with soil amendments such as biochar and compost. In addition to reducing metal toxicity, phytoremediation improves biological soil conditions. With advantages in cost-efficiency, sustainability, and minimal environmental impact, phytoremediation has strong potential as a strategic solution for soil recovery.

Keyword: Phytoremediation, Heavy Metals, Hyperaccumulator

Abstrak: Pencemaran tanah oleh logam berat menjadi masalah lingkungan serius. Artikel ini bertujuan untuk mengkaji mekanisme dan aplikasi fitoremediasi sebagai metode alternatif dalam pemulihan tanah tercemar logam berat. Metode yang digunakan adalah studi deskriptif berbasis kajian literatur. Hasil menunjukkan bahwa fitoremediasi bekerja melalui tiga mekanisme utama: fitoekstraksi, fitostabilisasi, dan rizodegradasi. Beberapa tanaman hiperakumulator seperti *Amaranthus hypochondriacus*, *Vetiveria zizanioides*, dan *Brassica juncea* terbukti efektif menyerap dan menstabilkan logam berat seperti Cd, Pb, Cr, dan As. Efektivitasnya meningkat dengan penggunaan amandemen seperti biochar dan kompos. Selain mereduksi kandungan logam, fitoremediasi juga memperbaiki kondisi biologis tanah. Dengan keunggulan biaya rendah, keberlanjutan, dan dampak lingkungan minimal, fitoremediasi berpotensi menjadi solusi strategis dalam pemulihan tanah tercemar.

Kata Kunci: Fitoremediasi, Logam Berat, Hiperakumulator

PENDAHULUAN

Perkembangan pesat di sektor pertanian, pertambangan dan industri tidak selalu memberikan dampak baik manusia dan lingkungan, tetapi juga dapat membawa dampak buruk berupa pencemaran tanah oleh logam berat. Pencemaran tanah oleh akumulasi logam berat menjadi sebuah permasalahan yang krusial bagi keberlanjutan lingkungan hidup (Ali, *et al.*, 2013). Permasalahan ini menjadi sebuah kekhawatiran secara global. Dalam sektor pertanian, praktik penggunaan pestisida berbasis timbal dan arsenik telah mencemari 30% lahan pertanian di Asia (FAO and UNEP, 2021). Di sektor pertambangan, khususnya di negara berkembang, tingkat pencemaran berada pada titik ekstrem. Di Indonesia, 80% lahan bekas tambang tercemar arsen (As) dan merkuri (Hg) (KLHK, 2023). Sektor industri menjadi penyumbang terbesar logam berat, secara global aktivitas industri menyumbang 60% total kontaminasi logam berat di dunia melalui limbah beracun seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), dan merkuri (Hg) (FAO and UNEP, 2021). Pencemaran logam berat memiliki dampak secara multidimensional. Secara ekologis, keberadaan logam berat di dalam tanah dapat bertahan selama ribuan tahun (Alloway, 2013). Hal ini menyebabkan ketidakseimbangan mikroorganisme serta penurunan kesuburan tanah secara permanen. Dari segi kesehatan manusia, paparan jangka panjang terhadap logam berat seperti kadmium (Cd) melalui rantai makanan telah dikaitkan dengan berbagai penyakit kronis seperti asma, kanker, dan leukimia (Charkiewicz *et al.*, 2023). sementara merkuri (Hg) diketahui berpengaruh terhadap perkembangan sistem saraf pada anak-anak (Fuller *et al.*, 2022).

Penanganan tanah tercemar umumnya melibatkan metode fisik dan kimia seperti pencucian tanah, solidifikasi, atau pelarutan, yang meskipun efektif secara teknis, sering kali memerlukan biaya tinggi dan dapat menimbulkan dampak lingkungan sekunder (Bhat *et al.*, 2022). Sebagai alternatif, pendekatan bioteknologi berbasis tumbuhan yang dikenal sebagai fitoremediasi menawarkan solusi yang lebih berkelanjutan, ekonomis, dan ramah lingkungan. Fitoremediasi merupakan proses pemanfaatan tanaman untuk mengekstraksi, menstabilkan, menguapkan, atau mendekomposisi kontaminan dari tanah atau air tercemar (Sierra *et al.*, 2021). Proses ini tidak hanya melibatkan kemampuan fisiologis tanaman, tetapi juga melibatkan interaksi kompleks antara akar, mikroorganisme rizosfer, dan senyawa kimia tanah (Prieto *et al.*, 2018).

Beberapa studi menunjukkan bahwa tanaman tropis juga memiliki potensi besar dalam fitoremediasi berkat adaptasi mereka terhadap tanah dengan karakteristik ekstrem dan kemampuan simbiosis dengan mikroorganisme toleran logam berat (Sierra *et al.*, 2021). Misalnya, kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) dan flax (*Linum usitatissimum* L.) dilaporkan mampu mengakumulasi Cr dan Mn dengan efisiensi yang signifikan dalam dua musim tanam, mencapai lebih dari 60% untuk logam tertentu (Shehata *et al.*, 2019). Selain itu, Alhagi camelorum terbukti mampu menurunkan kandungan Pb, Cd, Ni, dan Cr di tanah tercemar minyak dengan efisiensi hingga 50% dalam waktu enam bulan (Nemati *et al.*, 2024).

Keunggulan lain dari fitoremediasi adalah potensi pengembangannya menggunakan tanaman lokal di wilayah tropis yang memiliki keanekaragaman hayati tinggi dan toleransi alami terhadap kondisi tanah, seperti rendahnya kandungan bahan organik dan tingginya kandungan logam besi (Sierra *et al.*, 2021). Dengan mempertimbangkan pentingnya solusi yang efektif dan berkelanjutan untuk mengatasi pencemaran tanah, pemanfaatan fitoremediasi patut dikaji lebih lanjut. Oleh karena itu, kajian ini bertujuan untuk mengkaji mekanisme dan aplikasi fitoremediasi dalam pemulihan tanah tercemar logam berat.

METODE

Metode dalam penulisan artikel ini adalah studi deskriptif melalui pendekatan kajian literatur. Metode ini bertujuan untuk mendeskripsikan atau memberikan gambaran mengenai

mekanisme, efektivitas dan aplikasi fitoremediasi dalam pemulihan tanah tercemar logam berat. Hasil deskripsi diperoleh melalui analisis terhadap sumber-sumber akademis yang relevan dengan topik pembahasan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Mekanisme Fitoremediasi

Fitoremediasi bekerja dengan memanfaatkan kemampuan alami tanaman dan mikroorganisme yang berasosiasi dengannya untuk menetralkan kontaminasi tanah melalui proses biologis yang kompleks. Mekanisme ini terjadi melalui interaksi yang dinamis antara akar tanaman, sifat polutan, serta kondisi lingkungan tanah (Ali et al., 2013). Berdasarkan perbedaan cara kerja tanaman dalam mengatasi cemaran logam berat pada tanah, tiga teknik fitoremediasi yang menjadi kajian dapat diuraikan sebagai berikut.

Fitoekstraksi

Fitoekstraksi atau juga dikenal dengan fitoakumulasi merupakan salah satu teknik fitoremediasi yang memanfaatkan tanaman untuk menyerap, memindahkan, serta menyimpan logam berat dari dalam tanah ke bagian-bagian tanaman seperti daun dan batang yang nantinya dapat dipanen (Salt et al., 1995). Teknik ini umumnya efektif untuk logam-logam berat tertentu seperti kadmium (Cd), timbal (Pb), nikel (Ni), dan seng (Zn) yang mudah tersedia dan dapat diserap oleh akar tanaman.

Tahapan mekanisme fitoekstraksi diawali dengan pelarutan logam berat di rizosfer (daerah sekitar akar) melalui eksudat akar seperti asam organik dan fitosiderofor, yang membantu melepaskan ion logam dari partikel tanah. Setelah terlarut, ion logam diserap oleh akar melalui transporter spesifik di membran sel. Kemudian, logam ditranslokasikan ke bagian atas tanaman (shoot) melalui jaringan xilem. Di dalam jaringan tanaman, logam berat dapat disimpan dalam vakuola atau diikat oleh dinding sel sebagai mekanisme detoksifikasi, sehingga mencegah kerusakan sel. Akumulasi (Lasat, 2002). logam di bagian yang dapat dipanen (daun, batang) memungkinkan penghilangan polutan melalui pemanenan biomassa (Sharma et al., 2023).

Efektivitas fitoekstraksi dalam remediasi tanah tercemar logam berat dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara jenis tanaman, karakteristik tanah, sifat kimia logam dan keberadaan rizosfer dalam tanah. Tanaman yang efektif dalam fitoekstraksi memiliki karakter dapat bertindak sebagai akumulator logam berat dalam jumlah signifikan dan bertahan dalam kondisi tercemar (Rajkumar et al., 2012). Tanaman juga memiliki pengakaran yang luas (Sarwar et al., 2017). Selain itu, laju pertumbuhan tanaman cepat dan menghasilkan biomassa yang besar. Kondisi tanah yang efektif adalah yang mendukung ketersediaan logam bagi tanaman, pH agak asam berkisar 5,5-6,5 yang mampu melarutkan sebagian besar logam berat seperti Zn, Cd dan Ni (Ali et al., 2013). Sifat logam dengan solubilitas tinggi seperti Cd dan Zn lebih mudah diserap oleh tanaman karena perpindahannya yang cepat dari tanah (Raza et al., 2020). Aktivitas mikroba rizosfer dalam tanah dapat meningkatkan solubilitas logam melalui produksi asam organik dan senyawa pengkelat yang dapat mengikat logam (Hou et al., 2017).

Fitostabilisasi

Fitostabilisasi merupakan salah satu teknik fitoremediasi yang bertujuan untuk menstabilkan polutan dalam tanah melalui pengikatan atau imobilisasi sehingga tidak terjadi penyebaran di lingkungan sekitarnya. Teknik ini diterapkan dalam mengatasi polutan, terutama logam berat tanpa memindahkannya dari lokasi kontaminasi (Ali et al., 2013). Fitostabilisasi digunakan untuk mengikat logam berat seperti timbal (Pb) dan kadmium (Cd) melalui penyerapan pada akar atau pengendapan di zona rizosfer (Mulyana et al., 2017).

Mekanisme fitostabilisasi terjadi melalui proses penyerapan logam berat oleh akar tanaman dan pengendapan pada dinding sel atau vakuola yang mencegah terjadinya translokasi logam ke bagian atas tumbuhan. Kemudian terjadi pembentukan senyawa kompleks yang stabil antara logam berat dengan eksudat akar, seperti asam organik dan fitokhelatin dengan logam berat. Selanjutnya terjadi modifikasi pada logam berat menjadi bentuk kurang larutnya melalui modifikasi kondisi zona rizosfer seperti perubahan pH atau potensial redoks pada logam berat. Terakhir, stabilisasi tanah melalui pengakaran lebat dari tumbuhan untuk mencegah mobilisasi logam berat karena erosi atau dispersi (Shackira & Puthur, 2019).

Efektivitas fitostabilisasi dalam remediasi tanah tercemar logam berat dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara karakteristik tanaman, sifat logam berat serta kondisi tanah dan lingkungan. Tanaman yang digunakan dalam fitostabilisasi harus memiliki toleransi tinggi terhadap logam berat, sistem perakaran yang luas dan dalam, serta mampu tumbuh pada kondisi tanah yang miskin hara. Eksudat akar tanaman yang mengandung asam organik juga memiliki peran penting dalam fiksasi logam berat melalui proses pengelatan. Sifat kimia logam seperti bentuk spesiasi dan kelarutan juga menentukan sejauh mana logam tersebut dapat diimobilisasi dalam tanah oleh tanaman, logam dalam bentuk kurang larut atau endapan (presipitat) akan terikat lebih stabil pada tanah dibandingkan logam bebas atau larut. Kondisi tanah dapat dilihat dari sifat fisik, kimia, dan biologisnya seperti pH, kandungan bahan organik, kapasitas tukar kation (CEC), serta tekstur tanah memengaruhi kemampuan tanah dalam mengikat dan menstabilkan logam berat. Misalnya, peningkatan pH tanah dapat meningkatkan daya ikat logam oleh partikel tanah, sehingga menurunkan mobilitas logam berat. Kondisi iklim dan lingkungan sekitar, seperti curah hujan, suhu, dan kelembapan juga memengaruhi pertumbuhan tanaman serta dinamika air dan unsur hara dalam tanah. Misalnya, curah hujan tinggi dapat menyebabkan terjadinya pergerakan logam berat dalam tanah (Bolan, et al., 2011).

Rizodegradasi

Rizodegradasi merupakan teknik fitoremediasi yang memanfaatkan interaksi antara akar tanaman dan mikroorganisme di zona rizosfer untuk mendegradasi kontaminan dalam tanah (Nnaji et al., 2023). Teknik ini lebih dimanfaatkan dalam degradasi senyawa-senyawa organik seperti hidrokarbon dan pestisida. Namun, meskipun tidak bekerja secara langsung terhadap logam berat, rizodegradasi dapat membantu remediasi logam berat logam berat melalui pelepasan eksudat akar sebagai stimulan (Chojnacka et al., 2023).

Rizodegradasi terjadi melalui proses pelepasan eksudat akar seperti asam organik dan karbohidrat yang menjadi sumber nutrisi bagi pertumbuhan mikroorganisme di zona rizosfer (Glick, 2010). Rizodegradasi mendukung proses fitoekstraksi dan fitostabilisasi melalui perubahan bioavailabilitas logam dan imobilisasi logam oleh senyawa pengkelat. Mikroorganisme menghasilkan asam organik yang mengubah pH tanah dan memengaruhi kelarutan logam berat. Selain itu, mikroorganisme juga dapat menghasilkan senyawa pengkelat seperti biosurfaktan dan siderofor yang dapat berikatan dengan ion logam menghasilkan bentuk yang tidak atau kurang larut sehingga mencegah mobilisasi ion logam berat (Deepika et al., 2024).

Efektivitas rizodegradasi dalam membantu remediasi tanah tercemar logam berat dipengaruhi oleh interaksi antara beberapa faktor, yaitu komposisi dan aktivitas mikroorganisme di rizosfer yang memiliki kemampuan untuk menyerap, mereduksi ataupun mengkelat ion logam berat dalam tanah. Jenis tanaman, karena tiap tanaman mengeluarkan eksudat akar yang berbeda, misalnya eksudat asam organik dan fenolat yang dapat meningkatkan ketersediaan logam dan sumber nutrisi bagi mikroorganisme. Tanaman yang memiliki sifat hiperakumulator akan lebih mampu mendukung aktivitas mikroorganisme di

rizosfer (Rajkumar et al., 2012). Faktor-faktor lain yang mendukung seperti pH, suhu, kelembaban juga memengaruhi aktivitas mikroorganisme dan kelarutan logam dalam tanah. Misalnya, kelarutan logam akan meningkat pada kondisi pH tanah yang rendah dan memudahkan interaksi dengan mikroorganisme rizosfer. Namun, dalam kondisi pH terlalu rendah akan menurunkan kinerja mikroorganisme dan menghambat proses rizodegradasi (Deepika et al., 2024).

Aplikasi Fitoremediasi

Fitoremediasi merupakan salah satu metode ramah lingkungan dalam mengatasi pencemaran logam berat. Aplikasi metode ini telah berkembang luas dalam berbagai skala, berikut beberapa studi mengenai aplikasi fitoremediasi pada tanah tercemar logam berat.

Tabel 1. Aplikasi Fitoremediasi pada tanah tercemar logam berat

Fitoremediasi	Logam Target	Tanaman	Sumber Tanah	Referensi
Fitoekstraksi	Kadmium (Cd)	<i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. dan <i>Perilla frutescens</i> (L.) Britt.	Tanah persawahan	Kama et al. (2024)
Fitoekstraksi	Merkuri (Hg) Kromium (Cr) Arsen (As)	Akar Wangi (<i>Vetiveria zizanioides</i>)	Tanah Tempat Pembuangan Akhir (TPA)	Destri et al. (2024)
Fitostabilisasi	Kadmium (Cd) Timbal (Pb) Seng (Zn)	<i>Cynara cardunculus</i> dan <i>Brassica juncea</i> Czern	Tanah pertanian dan pertambangan	Lacalle et al. (2023)
Fitostabilisasi	Kadmium (Cd) Timbal (Pb)	Rami (<i>Boehmeria nivea</i>)	Tanah pertanian dan pertambangan	Lan et al. (2020)

Penelitian oleh Kama et al. (2024) memanfaatkan kombinasi tanaman hiperakumulator *Amaranthus hypochondriacus* dan *Perilla frutescens* dengan padi (varietas rendah akumulasi) dalam sistem tumpang sari pada tanah sawah tercemar Cd. Jika dibandingkan dengan padi monokultur, sistem tumpang sari mampu menurunkan konsentrasi Cd tanah hingga 20,35% dan ketersediaan Cd hingga 12%. Selain itu, kandungan Cd dalam padi tetap berada di bawah ambang batas konsumsi. Hasil menunjukkan bahwa penggunaan beberapa tanaman hiperakumulator dalam sistem tanam campuran bukan hanya meningkatkan efisiensi fitoekstraksi Cd, tetapi juga membantu mengurangi akumulasi Cd dalam komoditas pangan seperti padi. Dalam penelitian lain oleh Destri et al. (2024) menunjukkan bahwa fitoekstraksi menggunakan tanaman *Vetiveria zizanioides* selama 8 minggu mampu menurunkan kadar Hg sebesar 56–76%, Cr sebesar 39–76%, dan As sebesar 46–65% tergantung pada waktu tanam.

Penelitian oleh Lacalle et al. (2023) mengevaluasi fitostabilisasi pada tanah pertanian dan tambang yang tercemar logam berat As, Cd, Cu, Pb, dan Zn menggunakan tanaman *Brassica juncea* serta amandemen kompos berbasis limbah ternak. Aplikasi fitostabilisasi ini secara signifikan mengurangi ketersediaan Cd hingga 50% dan Zn hingga 76%. Selain itu, terdapat peningkatan aktivitas dan keragaman mikroba tanah, yang menandakan pemulihan kesehatan tanah. Pada penelitian lain oleh Lan et al. (2020) menunjukkan kombinasi tanaman ramie yang dibantu dengan amandemen tanah berupa biochar tempurung kelapa, pupuk organik, dan material Fe-Si-Ca memberikan hasil secara signifikan meningkatkan pH tanah, mengurangi konsentrasi Cd dan Pb yang tersedia secara biologis dalam kisaran 90-100% pada beberapa perlakuan.

KESIMPULAN

Fitoremediasi merupakan metode yang efektif dan ramah lingkungan untuk mengatasi pencemaran tanah oleh logam berat. Proses ini melibatkan pemanfaatan tanaman untuk menyerap (fitoekstraksi), menstabilkan (fitostabilisasi), atau mendukung aktivitas mikroba (rizodegradasi) dalam menetralkan logam berat di tanah. Berbagai tanaman hiperakumulator seperti *Amaranthus hypochondriacus*, *Vetiveria zizanioides*, dan *Brassica juncea* telah terbukti mampu menurunkan kadar logam berat seperti Cd, Pb, Cr, dan As secara signifikan. Efektivitas fitoremediasi meningkat dengan penambahan amandemen seperti biochar atau kompos. Selain mengurangi toksisitas logam, teknik ini juga memperbaiki struktur dan aktivitas biologis tanah. Dengan biaya yang lebih rendah dan dampak lingkungan yang minimal dibanding metode kimia atau fisik, fitoremediasi sangat cocok diterapkan di negara berkembang. Oleh karena itu, fitoremediasi memiliki potensi besar sebagai strategi pemulihan tanah tercemar secara berkelanjutan dan mendukung pertanian ramah lingkungan.

REFERENSI

- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M.A. (2013). Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869-881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
- Alloway, B. J. (2013). Sources of Heavy Metals and Metalloids in Soils. In B. J. Alloway (Ed.), *Heavy Metals in Soils* (pp. 11-50). Dordrecht: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>.
- Bhat, S. A., Bashir, O., Haq, S. a. U., Amin, T., Rafiq, A., Ali, M., Américo-Pinheiro, J. H. P., & Sher, F. (2022). Phytoremediation of heavy metals in soil and water: An eco-friendly, sustainable and multidisciplinary approach. *Chemosphere*, 303, 134788. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134788>
- Bolan, N. S., Park, J. H., Robinson, B., Naidu, R., & Huh, K. Y. (2011). Phytostabilization. In *Advances in agronomy* (pp. 145–204). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-385538-1.00004-4>
- Charkiewicz AE, Omeljaniuk WJ, Nowak K, Garley M, Nikliński J. (2023). Cadmium Toxicity and Health Effects-A Brief Summary. *Molecules*. 14;28(18):6620. doi: 10.3390/molecules28186620. PMID: 37764397; PMCID: PMC10537762.
- Chojnacka, K., Moustakas, K., & Mikulewicz, M. (2023). The combined rhizoremediation by a triad: plant-microorganism-functional materials. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(39), 90500–90521. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28755-8>.
- Deepika, Tyagi, A., Haritash, A.K. (2024). Unveiling the role of PGPRs (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) in phytoremediation of chemical pollutants and heavy metals. In: Madhav, S., Gupta, G.P., Yadav, R.K., Mishra, R., Hullebusch, E.v. (eds) *Phytoremediation*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-60761-5_13
- Destri, M. ., Yanova, S. ., & Jalius, J. (2024). Fitoremediasi Tanah Tercemar Logam Hg, Cr, As Menggunakan Tanaman Akar Wangi (*Vetiveria Zizanioides*) di TPA Lama Tempat Pemrosesan Akhir Talang Gulo Provinsi Jambi. *Al-Ard: Jurnal Teknik Lingkungan*, 9(2), 61–70. <https://doi.org/10.29080/alard.v9i2.1936>
- FAO and UNEP. (2021). Global assessment of soil pollution - Summary for policy makers. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb4827en>
- Fuller, R., Landrigan, P. J., Balakrishnan, K., Bathan, G., Bose-O'Reilly, S., Brauer, M., Caravanos, J., Chiles, T., Cohen, A., Corra, L., Cropper, M., Ferraro, G., Hanna, J., Hanrahan, D., Hu, H., Hunter, D., Janata, G., Kupka, R., Lanphear, B., Yan, C. (2022). Pollution and health: a progress update. *The Lancet Planetary Health*, 6(6), e535–e547. [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(22\)00090-0](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(22)00090-0).

- Glick, B. R. (2010). Using soil bacteria to facilitate phytoremediation. *Biotechnology Advances*, 28(3), 367–374. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.02.001>
- Kama, R., Li, S., Nabi, F., Aidara, M., Huang, P., Li, Z., Diatta, S., Ma, C., & Li, H. (2024). Hyperaccumulators' Diversity Enhances Cd-Contaminated Soil Restoration and Reduces Rice Cd Uptake under an Intercropping System. *ACS Omega*, 9(26), 28784–28790. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c03107>
- KLHK. (2023). Laporan Pemantauan Kualitas Tanah di Area Pertambangan.
- Lacalle, R., Bernal, M., Álvarez-Robles, M., & Clemente, R. (2023). Phytostabilization of soils contaminated with As, Cd, Cu, Pb and Zn: Physicochemical, toxicological and biological evaluations. *Soil & Environmental Health*, 1(2), 100014. <https://doi.org/10.1016/j.seh.2023.100014>
- Lan, M., Liu, C., Liu, S., Qiu, R., & Tang, Y. (2020). Phytostabilization of CD and PB in highly polluted farmland soils using RamiE and amendments. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(5), 1661. <https://doi.org/10.3390/ijerph17051661>
- Lasat, M. M. (2002). Phytoextraction of toxic metals. *Journal of Environmental Quality*, 31(1), 109–120. <https://doi.org/10.2134/jeq2002.1090>
- Mulyana, N., Larasati, T. R. D., & Srikandi. (2017). Stimulasi Fitostabilisasi Logam Berat Pb dan Cd Menggunakan Inokulan Kapang Terpapar Radiasi Gamma Dosis 250 Gy. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, 8(1), 43–54. <https://doi.org/10.21771/jrtpi.2017.v8.no1.p43-54>
- Nemati, B., Baneshi, M. M., Akbari, H., Dehghani, R., & Mostafaii, G. (2024). Phytoremediation of pollutants in oil-contaminated soils by *Alhagi camelorum*: evaluation and modeling. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56214-y>
- Nnaji, N. D., Onyeaka, H., Miri, T., & Ugwa, C. (2023). Bioaccumulation for heavy metal removal: a review. *SN Applied Sciences*, 5(5). <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05351-6>
- Prieto Méndez, J., Acevedo Sandoval, O. A., Prieto García, F., & Trejo González, N. (2018). Phytoremediation of soils contaminated with heavy metals. *Biodiversity International Journal*, 2(4), 362–376. <https://doi.org/10.15406/bij.2018.02.00088>
- Rajkumar, M., Sandhya, S., Prasad, M., & Freitas, H. (2012). Perspectives of plant-associated microbes in heavy metal phytoremediation. *Biotechnology Advances*, 30(6), 1562–1574. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.04.011>
- Rajkumar, M., Ae, N., & Freitas, H. (2009). Endophytic bacteria and their potential to enhance heavy metal phytoextraction. *Chemosphere*, 77(2), 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.06.047>
- Raza, A., Habib, M., Kakavand, S. N., Zahid, Z., Zahra, N., Sharif, R., & Hasanuzzaman, M. (2020). Phytoremediation of cadmium: physiological, biochemical, and molecular mechanisms. *Biology*, 9(7), 177. <https://doi.org/10.3390/biology9070177>
- Salt, D. E., Blaylock, M., Kumar, N. P., Dushenkov, V., Ensley, B. D., Chet, I., & Raskin, I. (1995). Phytoremediation: A Novel Strategy for the Removal of Toxic Metals from the Environment Using Plants. *Nature Biotechnology*, 13(5), 468–474. <https://doi.org/10.1038/nbt0595-468>
- Sarwar, N., Imran, M., Shaheen, M. R., Ishaque, W., Kamran, M. A., Matloob, A., Rehim, A., & Hussain, S. (2017). Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives. *Chemosphere*, 171, 710–721. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.116>

- Shackira, A. M., & Puthur, J. T. (2019). Phytostabilization of Heavy metals: Understanding of principles and practices. In *Springer eBooks* (pp. 263–282). https://doi.org/10.1007/978-3-030-20732-8_13
- Sharma, J. K., Kumar, N., Singh, N. P., & Santal, A. R. (2023). Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: An approach for a sustainable environment. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1076876>
- Shehata, S. M., Badawy, R. K., & Aboulsoud, Y. I. E. (2019). Phytoremediation of some heavy metals in contaminated soil. *Bulletin of the National Research Centre/Bulletin of the National Research Center*, 43(1). <https://doi.org/10.1186/s42269-019-0214-7>
- Sierra, B. E. G., Guerrero, J. M., & Sokolski, S. (2021). Phytoremediation of heavy metals in tropical soils An overview. *Sustainability*, 13(5), 2574. <https://doi.org/10.3390/su13052574>