

Eksplorasi Sinergi Pendekatan Fitoremediasi dan Ameliorasi dalam Rehabilitasi Tanah pada Lahan Pascatambang

Debora Dellaocto Melati Ambarita ¹⁾, Nabila Nurrulhusna ²⁾, Azizah ³⁾

¹⁾Dept. Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Perikanan dan Kelautan, Universitas Bangka Belitung

²⁾Dept. Agribisnis, Fakultas Pertanian, Perikanan dan Kelautan, Universitas Bangka Belitung

³⁾Dept. Manajemen Sumberdaya Perairan, Fak. Pertanian, Perikanan dan Kelautan, Universitas Bangka Belitung
Balun Ijuk, Kec. Merawang, Kabupaten Bangka, Kepulauan Bangka Belitung

Korespondensi: deborambarita@ubb.ac.id

ABSTRACT

*Soil degradation due to mining activities has led to a significant decline in environmental quality, with the mining sector contributing to deforestation of 29,635 hectares and critical land in Indonesia reaching 12.7 million hectares. Additionally, heavy metal contamination has caused a 75% decrease in soil fertility, posing a threat to ecosystem health and human well-being. This study aims to explore the effects of phytoremediation and amelioration on the rehabilitation of post-mining soils to enhance soil health. The article employs a systematic literature review approach using PRISMA guidelines and bibliometric use VOSviewer 1.6.19 version analysis through Scopus search engine. A systematic review was conducted on studies published between 2016 and 2026, and out of 1,942 identified articles, 15 were deemed eligible for inclusion. The findings indicate that the synergy between phytoremediation and amelioration has significant potential in the recovery of post-mining soils contaminated with heavy metals. Phytoremediation plants such as *Rumex nepalensis*, which can accumulate heavy metals up to 100%, have proven to be effective in reducing soil contamination. Moreover, ameliorants such as biochar and compost can reduce the bioavailability of heavy metals by up to 75%, while improving soil quality by enhancing soil structure, raising pH, and supporting plant growth. The combination of these approaches creates more favorable conditions for plant growth, thereby accelerating the rehabilitation of soils and ecosystem recovery. The appropriate selection of plant species and ameliorants can significantly improve the efficiency and sustainability of post-mining soil restoration, offering a long-term solution to environmental degradation caused by mining activities.*

Keywords: post-mining, soil health, biochar, heavy metals, phytoremediation

1. PENDAHULUAN

Degradasi tanah akibat aktivitas penambangan menjadi masalah lingkungan yang signifikan, dengan dampak luas terhadap ekosistem dan keberlanjutan lingkungan. Auriga Nusantara (2025) mencatat bahwa sektor pertambangan menyumbang deforestasi seluas 29.635 hektar, dengan 381 izin aktif di 289 pulau kecil, mencakup area 921.000 hektare. Kementerian Kehutanan mencatat total lahan kritis Indonesia mencapai 12,7 juta Ha, sebagian besar disebabkan oleh praktik ekstraksi yang tidak sesuai dengan *Good Mining Practice* (KLHK RI, 2024). Selain itu, sekitar 190 perusahaan tambang dihentikan operasionalnya pada akhir 2025 karena gagal memenuhi kewajiban Dana Jaminan Reklamasi dan Pascatambang (Walhi, 2025). Salah satu

dampak utama penambangan adalah kontaminasi logam berat seperti timbal (Pb), merkuri (Hg), kadmium (Cd), dan arsenik (As), yang mencemari tanah dan air, merusak struktur tanah, dan menghambat pertumbuhan tanaman (Wang *et al.*, 2025). Kontaminasi ini tidak hanya menurunkan kesuburan tanah, tetapi juga merusak ekosistem dan membahayakan kesehatan manusia melalui rantai makanan.

Tanah bekas tambang sering kali mengalami kerusakan fisik dan kimia yang signifikan, yang menghambat pertumbuhan tanaman tanpa intervensi rehabilitasi yang intensif. Kerusakan fisik pada tanah bekas tambang, yang ditandai dengan porositas total rendah sebesar 46,5% dan kandungan bahan organik hanya 1,27%, mengurangi kapasitas tanah dalam menyimpan air dan unsur hara,

serta menyulitkan perkembangan akar tanaman (Yulnafatmawita *et al.*, 2023). Hasil penelitian Hemmler *et al.* (2024) juga menunjukkan bahwa lahan bekas tambang pasir mengalami penurunan tajam dalam kandungan C-organik dan hara N, P, K, serta Mg, diikuti dengan peningkatan kerapatan tanah dan tahanan penetrasi yang signifikan, dengan estimasi waktu regenerasi alami lebih dari 20 tahun. Kerusakan fisik dan kimia ini menegaskan perlunya upaya pemulihan yang komprehensif agar tanah bekas tambang dapat mendukung pertanian, memulihkan ekosistem, dan memastikan keberlanjutan lingkungan.

Upaya yang ditempuh untuk mengatasi masalah degradasi tanah meliputi berbagai pendekatan rehabilitasi telah dikembangkan, salah satunya adalah fitoremediasi yang memanfaatkan tanaman untuk mengurangi atau menghilangkan kontaminasi logam berat di tanah. Beberapa tanaman, seperti *Clidemia sericea*, *Piper marginatum*, dan *Miscanthus floridulus*, terbukti efektif dalam menurunkan kandungan logam berat pada tanah pascatambang (Durante *et al.*, 2022; De La Rosa *et al.*, 2025; Wang *et al.*, 2025). Tanaman ini berperan dalam mengurangi toksisitas logam berat melalui mekanisme seperti fitostabilisasi yang melibatkan penyerapan logam berat oleh akar, fitoreduksi yang mengubah bentuk kimia logam berat untuk mengurangi toksisitasnya dan fitorevolusi yang memungkinkan tanaman mengekstraksi logam berat dari tanah dan memindahkannya ke bagian tanaman yang dapat dipanen (Zgorelec *et al.*, 2020). Secara kolektif, mekanisme-mekanisme ini berkontribusi pada penurunan kadar logam berat di tanah dan mendukung keberlanjutan ekosistem.

Selain fitoremediasi, pendekatan ameliorasi juga diterapkan untuk memperbaiki kualitas tanah yang rusak. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan bahan ameliorasi seperti kompos, biochar, dan pupuk organik dapat menurunkan kepadatan tanah serta meningkatkan pH hingga 6,7, meningkatkan kadar

unsur hara NPK hingga 46%, serta memperbaiki respirasi dan biomassa mikroba tanah hingga 56% (Varela *et al.*, 2025; Asirifi *et al.*, 2025). Peningkatan pH yang lebih mendekati netral mendukung ketersediaan unsur hara bagi tanaman, sementara perbaikan struktur tanah meningkatkan kapasitas tanah untuk menyimpan air dan unsur hara, serta mendukung pertumbuhan akar tanaman (Asirifi *et al.*, 2025). Dengan demikian, ameliorasi tidak hanya memperbaiki kesuburan tanah, tetapi juga mendukung pemulihan ekosistem secara lebih efektif.

Pendekatan rehabilitasi telah terbukti efektif, namun masih terdapat gap penelitian yang signifikan terkait eksplorasi sinergi antara fitoremediasi dan ameliorasi dalam rehabilitasi tanah pada lahan pascatambang. Sinergi antara kedua pendekatan ini diyakini dapat memberikan hasil yang lebih optimal dalam pemulihan tanah. Oleh karena itu, artikel ini bertujuan untuk mengeksplorasi bagaimana fitoremediasi dan ameliorasi dapat berpengaruh langsung terhadap perbaikan lahan pascatambang, serta dampaknya terhadap kesehatan tanah. Selain itu, artikel ini juga akan merekomendasikan mekanisme yang tepat dalam menggabungkan kedua pendekatan tersebut, dengan fokus kepada optimalisasi rehabilitasi tanah. Penelitian ini akan dilakukan melalui pendekatan sistematis literatur *review* dengan menggunakan metode PRISMA, yang memungkinkan analisis mendalam terhadap studi-studi terkait guna merumuskan kesimpulan yang lebih komprehensif dan berbasis bukti.

2. BAHAN DAN METODE

2.1 Pengambilan Data dari Basis Data

Penelitian ini didasarkan pada tinjauan pustaka sistematis terhadap artikel penelitian terbaru yang diterbitkan dalam 10 tahun terakhir (2016–2026). Artikel-artikel tersebut diidentifikasi melalui pencarian di basis data Scopus, yang dipilih karena merupakan salah

satu database ilmiah terkemuka yang menyediakan akses ke jurnal-jurnal berkualitas tinggi dan terindeks secara internasional.

Pencarian artikel dibatasi pada topik yang terkait dengan subject area "*Agricultural and Biological Sciences*" dan tipe jurnal "*research*". Hanya artikel yang diterbitkan dalam bahasa Inggris dan jurnal open access yang dipertimbangkan untuk memastikan aksesibilitas dan kualitas informasi yang lebih tinggi. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian meliputi "*heavy*", "*metal*", "*soil*", "*mining*", "*phytoremediation*", "*post*", "*sustainability*", "*health*", "*amelior**", dan "*amend**". Pemilihan kata kunci ini bertujuan untuk memfokuskan penelitian pada fitoremediasi dan ameliorasi dalam perbaikan tanah pada lahan pascatambang secara berkelanjutan. Hasil pencarian artikel disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1 Hasil Pencarian Artikel Berdasarkan Kata Kunci di Scopus

Kata Kunci	Jumlah artikel
heavy AND metal AND mining AND soil	382
phytoremediation AND heavy AND metal	851
phytoremediation AND post AND mining AND soil	11
amelior* AND mining AND soil	42
amelior* AND soil AND heavy AND metal	102
sustainability AND post AND mining AND soil	8
soil AND health AND post AND mining AND soil	16
amend* AND mining AND soil	124
amend* AND soil AND heavy AND metal	414
Total	1942
After Duplicate	1634

2.2 Analisis Bibliometrik menggunakan VosViewer

Analisis bibliometrik dilakukan dengan mengimpor data yang diekspor dalam format RIS dan dianalisis menggunakan VOSviewer versi 1.6.19. Fokus analisis ini meliputi

keyword analysis, *co-occurrence pattern of terms*, dan *citation pattern* (Van Eck & Waltman, 2019). Melalui pendekatan ini, diperoleh pola *co-occurrence* dan tren penelitian yang relevan, yang memberikan wawasan lebih dalam mengenai hubungan antar istilah dan arah perkembangan penelitian dalam bidang fitoremediasi dan ameliorasi lahan pascatambang.

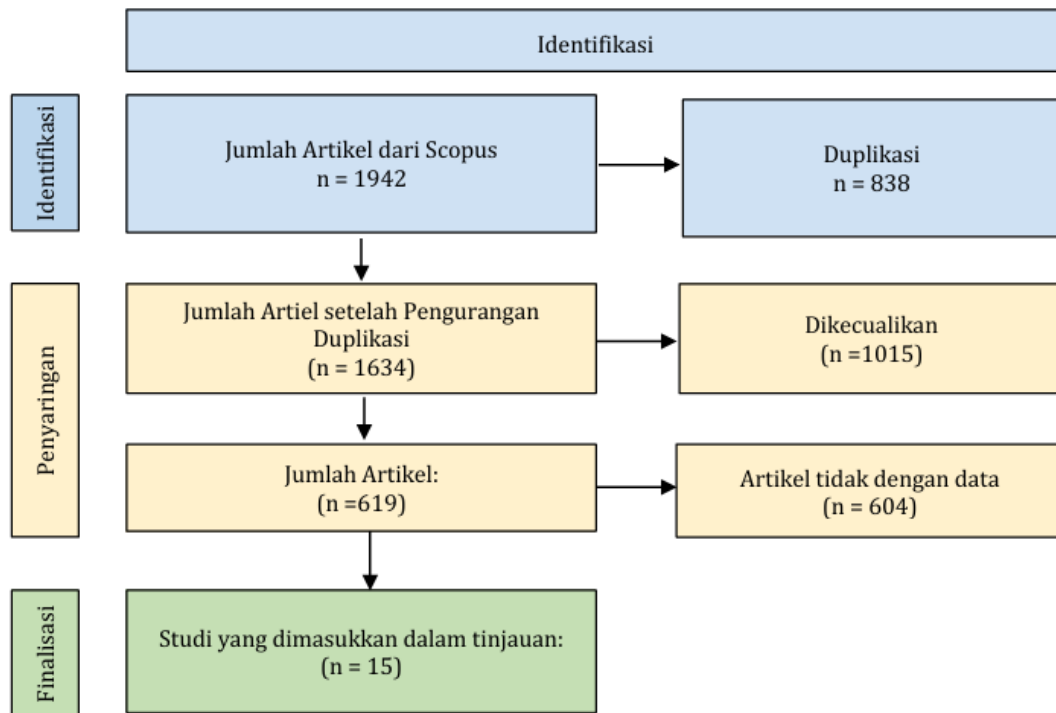
2.3 Tinjauan Pustaka Sistematis menggunakan PRISMA

Tinjauan pustaka sistematis ini mengikuti pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) (Page *et al.*, 2021) dan mengintegrasikan analisis bibliometrik. Analisis ini digunakan untuk mengeksplorasi penerapan fitoremediasi dan ameliorasi pada lahan pascatambang, serta mekanisme keduanya dalam memperbaiki kualitas tanah pascatambang. Pencarian literatur dilakukan secara menyeluruh dengan ekstraksi data dari basis data Scopus untuk memastikan artikel yang berkualitas tinggi dan memiliki relevansi dengan topik penelitian. Proses tinjauan secara keseluruhan, dimulai dari identifikasi, penyaringan, hingga evaluasi kelayakan jurnal. Tahapan kegiatan digambarkan pada diagram alir dalam Gambar 1.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Bibliometrik Analisis

Analisis bibliometrik yang dilakukan menghasilkan pembagian menjadi tiga kluster warna: merah, kuning, dan hijau. Kluster merah menunjukkan kata kunci yang paling sering muncul, diikuti oleh kluster kuning dan terakhir kluster hijau. Pembagian kluster ini menggambarkan area fokus yang berbeda dalam penelitian terkait rehabilitasi tanah pascatambang. Kata kunci yang ada dalam setiap kluster membentuk topik-topik tertentu yang saling terkait, seperti yang ditampilkan pada Tabel 2.



Gambar 1 Diagram alir PRISMA yang melaporkan proses pemilihan artikel untuk tinjauan literatur sistematis

Tabel 2 Cluster topik berdasarkan kata kunci dalam analisis bibliometrik

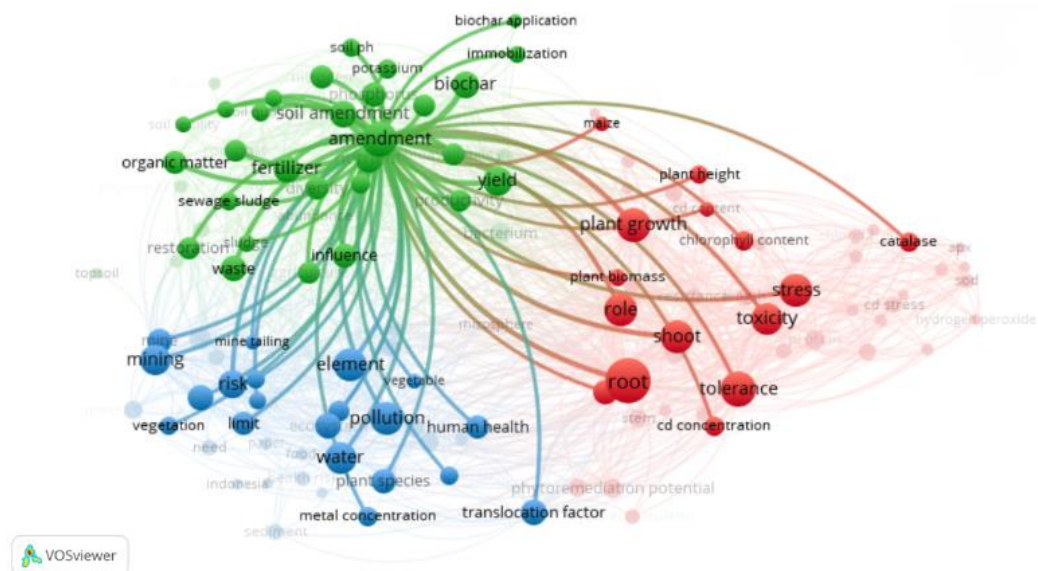
Cluster	Topic	Key keyword
Cluster 1 (merah)	Fitoremediasi, Stres Oksidatif, dan Pemulihan Tanah yang Tercemar Logam Berat	antioxidant enzyme, antioxidant enzyme acti, arbuscular mycorrhizal f, ascorbate peroxidase, catalase, cd accumulation, cd concentration, cd content, cd stress, cd toxicity, chlorophyll, chlorophyll content, gene, heavy metal stress, hydrogen peroxide, hyperaccumulator, inoculation, maize, oxidative stress, photosynthesis, photosynthetic pigments, phytoextraction, phytoremediation potential, phytotoxicity, plant biomass, plant growth, plant height, proline, protein, resistance, rhizosphere, role, root, root length, shoot, sod, stem, strain, stress, superoxide dismutase, tolerance, toxic heavy metal, toxicity, translocation, zea
Cluster 2, (kuning)	Ameliorasi Tanah, Peningkatan Kesuburan Tanah, Mikrobioma Rizhosfer, dan Penggunaan Bahan Organik	abundance, agriculture, amendment, bacterium, bioavailability, biochar, biochar application, calcium, compost, degradation, diversity, electrical conductivity, fertilizer, fungi, immobilization, improvement, influence, microbial community, microorganism, nitrogen, nutrient, organic carbon, organic matter, phosphorus, physicochemical properties, potassium, productivity, reclamation, restoration, sewage sludge, sludge, soil amendment, soil fertility, soil health, soil pH, soil quality, topsoil, total nitrogen, waste
Cluster 3, (hijau)	Dampak Kontaminasi Logam Berat terhadap Kesehatan Manusia dan Lingkungan, serta Pemulihan Tanah Pasca-tambang	china, cobalt, country, ecosystem, element, food, health risk, heavy metal concentration, heavy metal contamination, heavy metal content, heavy metal pollution, human health, indonesia, limit, mercury, metal concentration, mine, mine tailing, mining, mining activity, mining area, need, nickel, paper, phytostabilization, plant species, pollution, relationship, risk, sediment, soil pollution, soil sample, tailing, translocation factor, vegetable, vegetation, water

Cluster pertama menunjukkan dominasi topik fitoremediasi dan stres logam berat, dengan kata kunci utama enzim antioksidan, translokasi logam berat, dan *phytoextraction*. Fitoremediasi, khususnya menggunakan tanaman *hyperaccumulators*, menjadi pendekatan utama untuk mengurangi kontaminasi logam berat pada tanah pascatambang. Penekanan pada adaptasi tanaman terhadap stres oksidatif dan translokasi logam berat menunjukkan perkembangan pesat riset fitoremediasi dalam rehabilitasi tanah pascatambang.

Pada *cluster* kedua, meskipun dengan kata kunci yang lebih sedikit, menekankan pentingnya ameliorasi tanah menggunakan biochar, kompos, dan pengelolaan mikrobioma rizosfer. Bahan ameliorasi ini terbukti efektif dalam memperbaiki struktur dan kesuburan tanah pascatambang, serta mempercepat restorasi tanah melalui peran mikroba dan penerapan bahan organik, yang mendukung sinergi dengan fitoremediasi.

Terakhir, *cluster* ketiga berfokus pada dampak logam berat terhadap kesehatan manusia dan lingkungan, dengan kata kunci seperti *heavy metal contamination*, *human health*, dan *pollution*. Hasil penelitian ini menunjukkan urgensi untuk mengurangi dampak jangka panjang dari polusi logam berat, yang dapat menyebar melalui rantai makanan dan membahayakan kesehatan manusia serta ekosistem. Selain itu, fokus penelitian masih pada fitoremediasi dan ameliorasi tanah.

Kata kunci-kata kunci pada analisis bibliometrik saling berkaitan satu sama lain. Dalam kajian ini, fokus analisis bibliometrik pada kajian ini diberikan pada dua kata kunci utama, yaitu "*amendment*" yang mewakili ameliorasi tanah dan "*phytoremediation*". Kedua kata kunci ini mencerminkan pendekatan yang saling terkait dalam pemulihan tanah pascatambang. Hasil analisis bibliometrik yang menghubungkan kedua kata kunci ini dapat dilihat pada Gambar 2 dan 3.



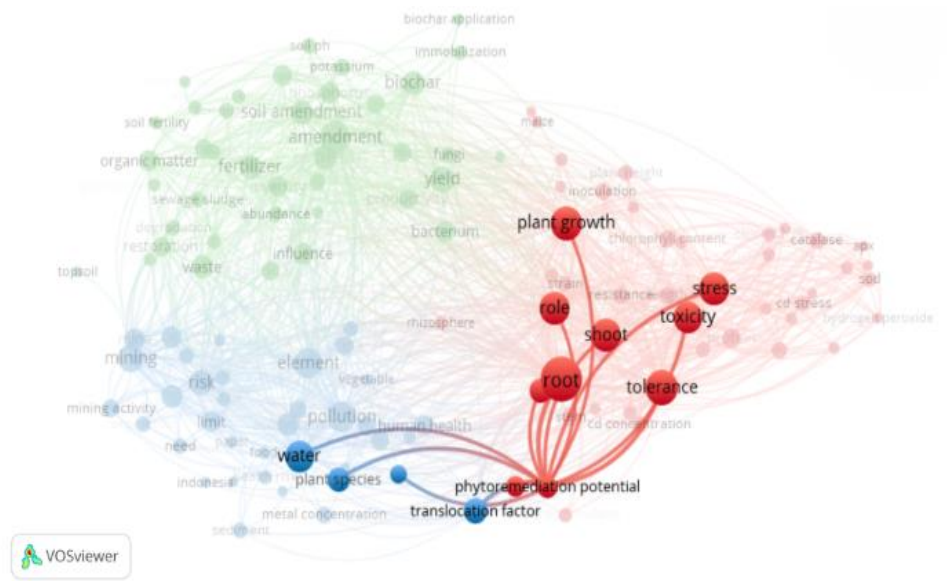
Gambar 2 Peta *co-occurrence* dengan fokus *amendment*

Gambar 2 menunjukkan bahwa riset terkait dengan *soil amendment* sangat terhubung dengan berbagai topik utama dalam fitoremediasi dan perbaikan tanah pasca-tambang. Terlihat adanya interaksi yang

jelas antara penggunaan bahan perbaikan tanah, pertumbuhan tanaman, mikrobioma tanah, dan toleransi tanaman terhadap logam berat. Penelitian-penelitian ini menekankan pentingnya penerapan bahan or-

ganik seperti biochar dan kompos, yang tidak hanya mendukung proses fitoremediasi

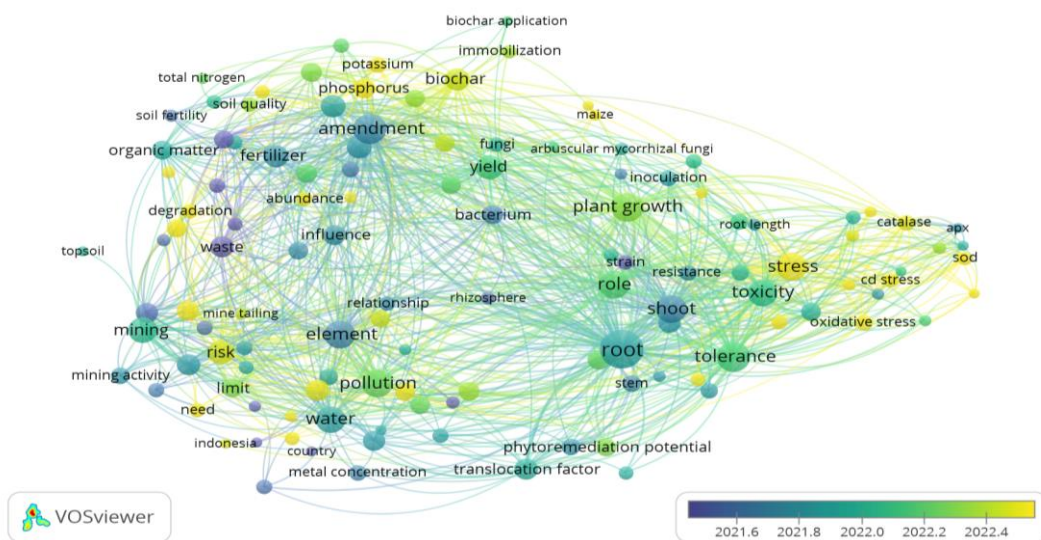
tetapi juga mengurangi dampak toksik logam berat terhadap tanaman dan tanah.



Gambar 2 Peta *co-occurrence* dengan fokus *phytoremediation*

Gambar 3 menunjukkan bahwa fitoremediasi sangat terkait dengan beberapa aspek kunci, di antaranya kemampuan tanaman untuk tetap tumbuh meskipun terpapar logam berat, berkat mekanisme adaptasi seperti enzim antioksidan yang melawan stres oksidatif dan translokasi logam berat yang membantu tanaman mengatasi dampak toksik dari logam tersebut. Tanaman *hyperaccumulator* dan proses *phytoextraction* memainkan peran penting

dalam mengakumulasi logam berat dari tanah dan menurunkan konsentrasi logam tersebut ke tingkat yang lebih aman. Meskipun hubungan ini tidak terlihat secara eksplisit dalam visualisasi, mikrobioma rizosfer juga berkontribusi pada efektivitas fitoremediasi dengan membantu tanaman dalam penyerapan dan mobilisasi logam berat, serta mengurangi dampak toksisitas logam pada tanah dan tanaman.



Gambar 4 Visualisasi katakunci berdasarkan waktu publikasi

Dari visualisasi Gambar 4 terlihat bahwa penelitian terkini dalam fitoremediasi dan pengelolaan tanah tercemar semakin berkembang, dengan fokus pada inovasi dalam bahan ameliorasi tanah, mikrobioma rizosfer, dan toleransi tanaman terhadap stres logam berat. Penggunaan bahan organik seperti biochar, serta perhatian terhadap mikroba tanah dan toleransi stres tanaman, menjadi sorotan utama dalam riset ini. Selain itu, semakin banyak penelitian yang berfokus pada dampak kesehatan dan pengelolaan logam berat, mengindikasikan bahwa fitoremediasi tidak hanya dipandang sebagai solusi teknis, tetapi juga sebagai pendekatan berkelanjutan untuk mengatasi dampak lingkungan dan kesehatan yang disebabkan oleh kontaminasi logam berat.

3.2 Fitoremediasi dalam Pemulihan Tanah Pascatambang

Fitoremediasi telah terbukti menjadi salah satu pendekatan yang menjanjikan dalam rehabilitasi tanah pascatambang yang tercemar logam berat. Pendekatan ini memanfaatkan kemampuan tanaman untuk menyerap, mengakumulasi, dan mengubah kontaminan, yang tidak hanya membantu mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, tetapi juga mendukung keberlanjutan ekosistem. Berbagai penelitian terkait fitoremediasi telah dilakukan untuk mengidentifikasi tanaman yang efektif dalam mengatasi kontaminasi logam berat di tanah pascatambang, dan hasil-hasil tersebut dirangkum pada Tabel 3.

Berdasarkan data penelitian dari berbagai lokasi, termasuk Kongo, Ethiopia, Pakistan, dan Kazakhstan, tanaman lokal menunjukkan kemampuan adaptasi yang luar biasa terhadap kondisi ekstrem lahan tambang. Tanaman seperti *Rumex nepalensis* di Ethiopia dan *Artemisia annua* di Kazakhstan mampu mencapai efisiensi penyerapan logam berat hingga 100% untuk logam tertentu, seperti timbal dan kadmium. Penelitian ini mendukung temuan

Shakeel *et al.* (2024) yang menekankan bahwa tanaman dengan Nilai Penting (IV) tinggi di area tambang batubara di Pakistan, seperti *Bidens pilosa*, memiliki ketahanan alami yang menjadikannya kandidat kuat untuk rehabilitasi lahan pascatambang. Tanaman ini mampu mengakumulasi berbagai jenis logam berat (Cr, Pb, Cu), menjadikannya sangat potensial untuk pemulihan tanah tercemar. Hasil ini menunjukkan bahwa vegetasi lokal dapat dimanfaatkan sebagai solusi alami untuk memperbaiki kualitas tanah pascatambang yang terkontaminasi logam berat.

Mekanisme translokasi dan akumulasi logam dalam tanaman menjadi indikator utama efektivitas fitoremediasi. Analisis terhadap nilai *Bioconcentration Factor* (BCF) dan *Translocation Factor* (TF) menunjukkan kemampuan tanaman untuk memindahkan logam dari akar ke bagian atas tanaman. Sebagai contoh, penelitian De La Rosa *et al.* (2025) pada *Piper marginatum* menunjukkan nilai TF sebesar 1,4, yang mengindikasikan bahwa tanaman ini sangat efektif dalam mentranslokasikan merkuri (Hg) dari akar ke daun. Pola serupa juga ditemukan pada genotipe *Salix alba* 81/79 di Serbia (Urošević *et al.*, 2024), yang memiliki BCF > 1, artinya konsentrasi logam dalam tanaman lebih tinggi daripada di tanah, sehingga sangat efektif dalam teknik fitoekstraksi. Temuan ini memperkuat pentingnya pemilihan tanaman dengan TF tinggi untuk meningkatkan efisiensi fitoremediasi.

Distribusi logam dalam jaringan tanaman tidak merata, yang menunjukkan bahwa bagian tanaman tertentu lebih efektif dalam mengakumulasi logam berat. Sebagai contoh, Lovynska *et al.* (2025) mencatat bahwa pada spesies *Salix caprea* dan *Populus tremula*, konsentrasi Kadmium (Cd) di daun bisa mencapai 181–396% lebih tinggi dibandingkan pada cabang. Temuan ini mengindikasikan bahwa daun sering menjadi organ utama dalam akumulasi logam berat. Penelitian serupa oleh

Naimanova *et al.* (2024) menunjukkan bahwa meskipun sebagian besar logam berat sering tertahan di akar sebagai mekanisme pertahanan, spesies tertentu tetap mampu melakukan translokasi yang tinggi ke bagian tajuk untuk efisiensi pembersihan yang lebih maksimal. Hal ini menunjukkan pentingnya memilih genotipe yang sesuai berdasarkan pola distribusi logam untuk meningkatkan efektivitas fitoremediasi.

Tabel 3 Efisiensi fitoremediasi tanaman dalam menyerap logam berat pada tanah pascatambang

Jenis Tanaman	Kondisi Tanah, Lokasi dan Area Tambang	Hasil Penelitian	Penulis
<i>Persea americana</i> , <i>Tithonia diversifolia</i> , <i>Melissa officinalis</i> , <i>Lanea discolor</i> , <i>Bamboussa vulgaris</i> , <i>Anisophilea boehmii</i>	Copperbelt, Republik Demokratik Kongo, Tanah bekas tambang (Tercemar logam (Cu, Zn, Cr, Co), pH asam (4,42–7,5)	Efisiensi menyerap logam berat hingga 92%	Mputu <i>et al.</i> , 2021
<i>Piper marginatum</i>	Ayapel, Kolombia, Bekas aktivitas pertambangan emas artisanal (Tercemar merkuri)	Penurunan merkuri sebesar 37,3%; konsentrasi merkuri rata-rata di akar 109,2 µg/kg, batang 80,6 µg/kg, dan daun 122,6 µg/kg; BCF rata-rata 0,3 (rendah) dan TF rata-rata 1,4	De La Rosa <i>et al.</i> , 2025
<i>Salix caprea</i> , <i>Populus tremula</i> , <i>Betula pendula</i>	Freiberg, Jerman, Tanah bekas tambang (Tercemar logam (As, Pb, Cd)	Konsentrasi Cd di daun 181–396% lebih tinggi dibandingkan dengan cabang	Lovynska <i>et al.</i> , 2025
<i>Rumex nepalensis</i>	Legadambi Gold Mine, Ethiopia, Tanah bekas tambang. Tercemar logam (Pb, Ni, Cu, Zn)	Menyerap logam berat hingga 100%	Techane <i>et al.</i> , 2024
<i>Ilex cornuta</i> , <i>Epipremnum aureum</i>	Shaoxing City, Zhejiang, China, Area tambang Tercemar logam (Pb, Zn, Cu, Cd)	Efisiensi penyerap logam berat hingga 87%	Li <i>et al.</i> , 2024
<i>Bidens pilosa</i> , <i>Amaranthus spinosus</i> , <i>Chenopodium ambrosioides</i>	Harnoi (Kali-Mitti), Abbottabad, Pakistan, Area tambang Batubara (Tercemar logam (Cd, Cu, Cr, Pb, Ni)	Efisiensi penyerap logam berat: Cr 76,5%, Pb 14,8%, Cu 4,2%, Ni 4,1%, Cd 0,4%	Shakeel <i>et al.</i> , 2024
<i>Artemisia annua</i> , <i>Salsola nitraria</i>	Kazakhstan Selatan, Industri dan pertambangan (Tercemar logam (Zn, Pb, Cd, Cu)	Efisiensi penyerap logam berat hingga 100% (Cd)	Naimanova <i>et al.</i> , 2024
<i>Salix alba</i> 81/79	Tepian Sungai Danube, Serbia, Tanah bekas tambang (Tercemar logam (Cd, Pb, Cu, Ni, Cr, Zn))	Efisiensi penyerap logam berat hingga 100% (BCF > 1)	Urošević <i>et al.</i> , 2024

3.3 Ameliorasi Tanah Pascatambang

Amelioran berperan penting dalam memperbaiki kualitas tanah yang tercemar akibat aktivitas pertambangan, terutama tanah yang terkontaminasi logam berat. Berbagai jenis amelioran, seperti biochar, kompos, dan bahan organik lainnya, telah terbukti efektif dalam menurunkan bioavailabilitas logam berat, menstabilkan pH tanah, serta meningkatkan kesuburan tanah yang rusak. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan amelioran dapat memperbaiki kondisi tanah yang terkontaminasi secara signifikan. Hasil pencarian terkait topik ini disajikan dalam Tabel 4.

Tabel 1 Efektivitas Amelioran dalam Mengurangi Kontaminasi Logam Berat pada Tanah Pascatambang

Amelioran	Lokasi	Hasil Penelitian	Penulis
Biochar Eucalyptus spp. dan Kompos	Tanah terkontaminasi limbah tailing pertambangan dari Quiulacocha, Pasco, Peru (terkontaminasi Pb, Cd, Zn, Cu, Fe, dan As)	Menurunkan ketersediaan logam berat di tanah hingga 75%	Virú-Vasquez <i>et al.</i> , 2025
Biochar dari Oak, Beech, dan Hornbeam serta Kompos	Limbah tambang berpasir (sandy mining waste) di Touissit-Boubker, Maroko (terkontaminasi Zn dan Cu)	Menurunkan ketersediaan Zn hingga 79,6% dan Cu hingga 58,3%	Chafik <i>et al.</i> , 2025
Biochar dan Sepiolit	Tanah pertanian tercemar timbal dan seng di Jinding Town, Provinsi Yunnan, China	Menurunkan ketersediaan logam hingga 95%, meningkatkan ketersediaan fosfor hingga 73,2%	Chen <i>et al.</i> , 2024
Organo-mineral (Kompos + Tanah Liat + Limbah Marmer)	Area pertambangan Kettara, Maroko (terkontaminasi Cu, Pb, dan Zn)	Reduksi logam terlarut lebih dari 90%	Sahlaoui <i>et al.</i> , 2024
Biochar Limbah Kayu + Pupuk Organik Campuran	Limbah tambang kromit di Muslim Bagh, Distrik Qilla Saifullah, Balochistan, Pakistan (terkontaminasi Cr, Ni, Pb, dan Cd)	Reduksi logam berat hingga 50%	Altaf <i>et al.</i> , 2021
Biosolid: Limbah Perkotaan, Sisa WTP, dan Kapur	Area bekas tambang timbal (Pb) dan seng (Zn) di Tri-State Mining District, Amerika Serikat	Meningkatkan pH tanah sehingga ketersediaan logam terikat	Alghamdi <i>et al.</i> , 2020
Biochar dari Filter Cake Tebu dan Abu Bagasse Tebu	Area tercemar di sekitar Lower Klity Creek, Thailand (terkontaminasi As, Cd, Cu, dan Zn)	Penurunan kandungan logam hingga 79,5%	Ketrot & Wisawapipat, 2021

Penggunaan kombinasi biochar dan kompos terbukti menjadi strategi yang sangat efektif dalam menurunkan ketersediaan logam berat di tanah (*bioavailability*). Penelitian oleh Virú-Vasquez *et al.* (2025) menunjukkan bahwa penggunaan biochar dan kompos di tanah *tailing* di Peru dapat menurunkan ketersediaan logam berat hingga 75%. Temuan serupa juga ditemukan oleh Chafik *et al.* (2025) di Maroko, di mana kombinasi bahan tersebut berhasil mengurangi konsentrasi Seng (Zn) hingga 79,6% dan Tembaga (Cu) hingga 58,3%. Efektivitas gabungan ini disebabkan oleh kemampuan biochar untuk mengikat logam melalui permukaannya yang luas dan gugus fungsional yang kaya, sedangkan kompos meningkatkan aktivitas mikroba tanah dan

memperkaya nutrisi yang mendukung pertumbuhan tanaman. Selain itu, Altaf *et al.* (2021) menekankan pentingnya penambahan pupuk organik pada biochar limbah kayu yang mampu mereduksi logam hingga 50% di area tambang kromit Pakistan, menegaskan bahwa bahan organik memiliki peran krusial dalam menekan toksisitas tanah dan mendukung restorasi ekosistem.

Selain bahan organik, penggunaan material mineral seperti sepiolit dan limbah marmer juga memberikan dampak signifikan terhadap stabilitas kimia logam di tanah. Penelitian Chen *et al.* (2024) di China menunjukkan bahwa kombinasi biochar dengan sepiolit dapat menurunkan ketersediaan logam berat hingga 95%, berkat kemampuan sepiolit dalam

mengadsorpsi ion logam melalui struktur kristalnya yang stabil. Sementara itu, penelitian Sahlaoui *et al.* (2024) menggunakan pendekatan "organomineral" (campuran kompos, tanah liat, dan limbah marmer) yang menghasilkan reduksi logam terlarut lebih dari 90%. Limbah marmer berfungsi sebagai agen penetral kemasaman yang sangat efektif untuk tanah *tailing* yang memiliki pH sangat rendah, sehingga mencegah logam berat terlarut yang dapat meracuni tanaman.

Peningkatan pH tanah merupakan faktor penting dalam imobilisasi logam berat. Dalam penelitian jangka panjang yang dilakukan oleh Alghamdi *et al.* (2020) di Amerika Serikat, penggunaan biosolid dan kapur terbukti meningkatkan pH tanah secara signifikan. Ketika pH tanah meningkat, logam berat seperti Pb dan Zn menjadi tidak larut dan terikat lebih kuat pada matriks tanah, mencegahnya masuk ke dalam jaringan tanaman. Temuan serupa ditemukan oleh Ketrot & Wisawapipat (2021) di Thailand, di mana penggunaan biochar dari filter *cake* tebu mampu menurunkan kandungan logam hingga 79,5%. Pada penelitian ini, peningkatan pH tanah dari 5,1 menjadi 7,0, hal ini dapat mengubah logam dari bentuk bebas (toksik) menjadi bentuk presipitasi yang lebih stabil, sehingga mengurangi risiko keracunan logam pada tanaman.

Selain berfungsi untuk mengikat logam berat, amelioran juga berperan penting dalam memperbaiki kualitas nutrisi dan kesehatan tanah. Penelitian oleh Chen *et al.* (2024) mencatat bahwa penggunaan kombinasi biochar dan sepiolit dapat meningkatkan ketersediaan fosfor (P) hingga 73,2%, unsur hara yang sangat dibutuhkan untuk pertumbuhan tanaman, terutama di tanah tambang yang sering kali kekurangan unsur hara. Selain itu, penggunaan biosolid dan residu WTP, seperti yang ditemukan oleh Alghamdi *et al.* (2020), tidak hanya memperbaiki struktur fisik tanah tetapi juga meningkatkan kapasitas tanah dalam menahan air dan meningkatkan kandungan C-

organik hingga 1100%. Hal ini menciptakan kondisi yang lebih mendukung bagi pertumbuhan vegetasi dan meningkatkan keberlanjutan ekosistem di lahan pascatambang.

Secara keseluruhan, efektivitas amelioran dalam rehabilitasi tanah pascatambang sangat bergantung pada jenis bahan dan dosis aplikasi yang digunakan. Biochar tetap menjadi komponen utama yang dominan, karena sifatnya yang stabil dan tahan lama, namun efektivitasnya dapat meningkat signifikan ketika dikombinasikan dengan bahan organik seperti kompos atau mineral seperti sepiolit dan kapur. Sinergi antara bahan organik dan mineral ini tidak hanya mengurangi ketersediaan logam berat tetapi juga meningkatkan kualitas tanah secara keseluruhan. Amelioran membantu mengubah lahan *tailing* yang awalnya sangat toksik dan tidak ramah terhadap pertumbuhan tanaman, menjadi media tanam yang lebih subur dan mendukung pertumbuhan vegetasi untuk fitoremediasi yang lebih efektif.

3.4 Sinergi Fitoremediasi dan Ameliorasi dalam Pemulihan Tanah

Pemulihan tanah pascatambang yang tercemar logam berat merupakan tantangan besar bagi banyak negara yang memiliki sektor pertambangan aktif. Fitoremediasi, yang melibatkan penggunaan tanaman untuk menyerap atau menstabilkan kontaminan, dan ameliorasi, yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas fisik, kimia, dan biologis tanah, keduanya memiliki potensi besar dalam memperbaiki tanah yang terdegradasi. Oleh karena itu, sinergi antara fitoremediasi dan ameliorasi memiliki potensi untuk meningkatkan efektivitas rehabilitasi tanah pascatambang.

Fitoremediasi dapat berfungsi baik dengan pemanfaatan tanaman untuk mengakumulasi logam berat dari tanah melalui mekanisme seperti fitoreduksi, fitorevolusi, dan *phytoextraction*. Tanaman *hyperaccumulators*, seperti *Rumex nepalensis*, *Ilex cornuta* dan *Epipremnum aureum*, memiliki kemam-

puan luar biasa untuk menyerap logam berat seperti kadmium (Cd) dan logam berat lain (Lovynska *et al.*, 2025; Techane *et al.*, 2024). Namun, meskipun fitoremediasi mampu mengurangi tingkat kontaminasi, tanaman seringkali menghadapi stres berat yang menghambat pertumbuhannya, terutama dalam tanah dengan pH yang sangat rendah atau sangat tinggi akibat kontaminasi logam berat (Wang *et al.*, 2022). Oleh karena itu, pentingnya penggunaan amelioran untuk menciptakan lingkungan yang baik untuk tanaman.

Ameliorasi tanah, yang mencakup penggunaan bahan seperti biochar, kompos, dan kapur, bertujuan untuk memperbaiki struktur tanah, meningkatkan pH, serta meningkatkan ketersediaan unsur hara yang penting bagi tanaman. Penggunaan biochar dapat menurunkan bioavailabilitas logam berat dan meningkatkan kemampuan tanah untuk menyimpan air (Virú-Vasquez *et al.*, 2025; Chen *et al.*, 2024). Sementara itu, kompos dan bahan organik lainnya mendukung peningkatan mikrobioma tanah, yang membantu dalam proses dekomposisi dan siklus hara (Chafik *et al.*, 2025). Meskipun masing-masing teknik ini efektif secara individu, keduanya dapat lebih maksimal jika diterapkan bersama-sama, menciptakan kondisi tanah yang lebih ramah bagi tanaman fitoremediasi.

Sinergi antara fitoremediasi dan ameliorasi menunjukkan potensi signifikan dalam rehabilitasi tanah pascatambang. Pemilihan tanaman yang tahan terhadap kondisi tanah ekstrem, dikombinasikan dengan amelioran untuk memperbaiki pH tanah dan mengurangi toksisitas logam, meningkatkan kemampuan tanaman dalam menyerap dan mentranslokasikan logam berat. Sebagai contoh, di lahan pascatambang pasir silika dengan kadar Al, Fe, dan Zn tinggi, kombinasi kapur, kompos, dan inokulum mikoriza (*MycoSilvi*) secara signifikan dapat meningkatkan pH, pertumbuhan, biomassa, dan kolonisasi akar *Falcataria sp.* dan *Ochroma bicolor*, memungkinkan tanaman

tumbuh pada media yang sebelumnya tidak layak tanam (Munawaroh *et al.*, 2020). Selain itu, fitoremediasi timbal (Pb) dengan bunga matahari yang disertai biochar dan kompos larva *black soldier fly* meningkatkan efisiensi pengangkatan Pb hingga 45–67%, serta mendukung pertumbuhan sawi di tanah pascatanfitoremediasi (Nurindriana & Wicaksono, 2022). Sinergi ini memperlihatkan efektivitasnya dalam mempercepat pemulihan tanah yang terdegradasi.

3.5 Tantangan dan Prospek Sinergi Fitoremediasi dan Ameliorasi dalam Pemulihan Tanah Pascatambang

Tantangan utama dari sinergi antara fitoremediasi dan ameliorasi dalam upaya pemulihan adalah kesesuaian antara jenis tanaman dan amelioran yang digunakan. Tanah yang terkontaminasi logam berat seringkali memiliki kondisi yang sangat ekstrem, seperti pH yang terlalu rendah atau tinggi, serta kekurangan unsur hara penting bagi tanaman (Takáč *et al.*, 2018). Penggabungan tanaman dengan kemampuan fitoremediasi yang baik dan amelioran yang dapat menstabilkan pH tanah harus dilakukan dengan hati-hati. Pemilihan tanaman yang tidak cocok atau dosis amelioran yang tidak tepat dapat mengurangi efektivitas keduanya, menyebabkan tanaman gagal tumbuh atau tanaman tidak dapat mengakumulasi logam berat secara optimal (Tamma *et al.*, 2025). Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menentukan kombinasi tanaman dan amelioran yang paling efektif dalam kondisi tanah yang spesifik.

Meskipun terdapat tantangan dalam optimalisasi sinergi ini, potensi yang dihasilkan dari kombinasi fitoremediasi dan ameliorasi sangat besar. Sinergi ini memungkinkan keduanya saling melengkapi, dimana amelioran memperbaiki kondisi tanah secara fisik dan kimiawi, sementara tanaman fitoremediasi mengakumulasi dan menstabilkan logam berat di tanah (Nurindriana & Wicaksono, 2022).

Tanaman yang mampu beradaptasi dengan kondisi tanah yang telah diperbaiki melalui amelioran akan lebih efektif dalam menyerap logam berat dan mengurangi toksisitas tanah (Tang *et al.*, 2022). Hal ini membuka potensi besar untuk menciptakan lahan pascatambang yang tidak hanya lebih subur tetapi juga lebih aman bagi ekosistem dan manusia.

Meskipun potensi sinergi ini besar, tantangan terkait keberlanjutan dan biaya tetap menjadi perhatian. Penerapan skala besar dari sinergi fitoremediasi dan ameliorasi memerlukan biaya yang mahal mencapai 75.375 USD per Ha dan membutuhkan waktu yang sangat lama hingga 8 tahun (Wan *et al.*, 2016). Namun, jika kedua pendekatan ini dapat dioptimalkan dan diterapkan secara luas, mereka memiliki potensi untuk memberikan manfaat jangka panjang yang jauh lebih besar, seperti pemulihan tanah yang lebih cepat, keberlanjutan ekosistem yang lebih baik, dan pengurangan dampak lingkungan akibat aktivitas pertambangan (Salomou *et al.*, 2022). Keberhasilan dalam mengintegrasikan fitoremediasi dan ameliorasi dapat membuka jalan bagi metode rehabilitasi yang lebih efisien dan ramah lingkungan untuk tanah pascatambang.

4. KESIMPULAN

Sinergi antara fitoremediasi dan ameliorasi memberikan potensi besar dalam pemulihan tanah pascatambang yang tercemar logam berat. Tanaman fitoremediasi seperti *Rumex nepalensis* yang mampu mengakumulasi logam berat hingga 100%, terbukti sangat efektif dalam mengurangi kontaminasi tanah. Amelioran seperti biochar dan kompos dapat menurunkan ketersediaan logam berat hingga 75% dan meningkatkan kualitas tanah, dengan memperbaiki struktur tanah, meningkatkan pH, serta mendukung pertumbuhan tanaman. Kombinasi kedua pendekatan ini menciptakan kondisi yang lebih baik bagi tanaman untuk tumbuh, meningkatkan efektivitas rehabilitasi tanah, serta mempercepat pemulihan ekosis-

tem. Dengan memilih kombinasi tanaman dan amelioran yang tepat, pemulihan tanah pascatambang dapat dilakukan dengan lebih efisien dan berkelanjutan, memberikan solusi jangka panjang terhadap degradasi lingkungan akibat aktivitas pertambangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alghamdi, A., Presley, D. R., Kirkham, M. B., & Hettiarachchi, G. 2020. *Efficacy of amendments to improve soil physical properties at an abandoned lead and zinc mine*. Agrosystems, Geosciences & Environment, 3(1): e20032. <https://doi.org/10.1002/agg2.20032>
- Altaf, F., Gul, S., Chandio, T. A., Rehman, G. B., Kakar, A. R., Ullah, S., Khan, N., Shaheen, U., Shahwani, M. N., Ajmal, M., & Manzoor, M. 2021. *Influence of biochar based organic fertilizers on growth and concentration of heavy metals in tomato and lettuce in chromite mine tailings contaminated soil*. Sarhad Journal of Agriculture, 37(1): 315-324. <https://doi.org/10.17582/journal.sja/2021/37.1.315.324>
- Asirifi, I., Makarowsky, L., Heinze, S., Herre, M., Werner, S., Frimpong, K., Pierburg, R., & Marschner, B. 2025. *Biochar and Kitchen Stove Ash for Improving Nutrient Availability and Microbial Functions of Tropical Acidic Soil*. Soil Systems. <https://doi.org/10.3390/soilsystems9020049>.
- Asirifi, I., Makarowsky, L., Heinze, S., Herre, M., Werner, S., Frimpong, K., Pierburg, R., & Marschner, B. 2025. *Biochar and Kitchen Stove Ash for Improving Nutrient Availability and Microbial Functions of Tropical Acidic Soil*. Soil Systems. <https://doi.org/10.3390/soilsystems9020049>.
- Auriga Nusantara. 2025. *Awas! Ancaman Pertambangan Nikel terhadap Raja Ampat: Perlindungan, Pencegahan,*

- dan Pemulihan. Laporan Ancaman 2025.
- Chafik, Y., Sena-Velez, M., Henaut, H., Missbah El Idrissi, M., Carpin, S., Bourgerie, S., & Morabito, D. 2025. *Synergistic effects of compost and biochar on soil health and heavy metal stabilization in contaminated mine soils*. *Agronomy*, 15(6): 1295. <https://doi.org/10.3390/agronomy15061295>
- Chen, Q., Wang, L., Li, B., He, S., Li, Y., He, Y., Liang, X., & Zhan, F. 2024. *Remediation of cadmium and lead in mine soil by ameliorants and its impact on maize (Zea mays L.) cultivation*. *Agronomy*, 14(2): 372. <https://doi.org/10.3390/agronomy14020372>
- De la Rosa-Mendoza, M., Viña-Pico, M., Marrugo-Negrete, J. 2025. *Phytoremediation of Soils Contaminated with Mercury Using Piper marginatum in Ayapel, Colombia*. *Soil System*. 9(3): 68. <https://doi.org/10.3390/soilsystems9030068>
- Durante-Yáñez, E., Martínez-Macea, M., Enamorado-Montes, G., Caballero, E., & Marrugo-Negrete, J. 2022. *Phytoremediation of Soils Contaminated with Heavy Metals from Gold Mining Activities Using Clidemia sericea D. Don*. *Plants*, 11. <https://doi.org/10.3390/plants11050597>.
- Hemmler, K., Asare, K., Tenkorang, E., & Buerkert, A. 2024. *Sand mining deteriorates soil fertility and farming livelihoods around Accra, Ghana*. *Scientific Reports*, 14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66656-z>.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia (KLHKRI). 2024. Laporan Kinerja Direktorat Jenderal Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan Tahun 2024. Jakarta: KLHK. Diakses dari <https://ppkl.menlhk.go.id/website/filebox/1017/250224112700LKj%20Ditjen%20PPKL%202024%20FIN%20AL.pdf>
- Ketrot, D., & Wisawapipat, W. 2021. *Lead immobilisation in mining contaminated soil using biochar and ash from sugarcane*. *Plant, Soil and Environment*, 67(8): 474-481. <https://doi.org/10.17221/57/2021-PSE>
- Li, Q., Tang, Y., Dong, D., Wang, X., Wu, X., Gul, S., Li, Y., Xie, X., Liu, D., & Xu, W. 2024. *Remediation of Pb-, Zn-, Cu-, and Cd-Contaminated Soil in a Lead-Zinc Mining Area by Co-Cropping Ilex cornuta and Epipremnum aureum with Illite Application*. *Agriculture*, 14:867. <https://doi.org/10.3390/agriculture14060867>
- Lovynska, V., Wiche, O., Heilmeyer, H., Samarska, A., & Bol, R. 2025. *Accumulation of soil metal(loids) in fast-growing woody plants of the post-mining area of Freiberg, Germany*. *Soil Systems*, 9(2): 56. <https://doi.org/10.3390/soilsystems9020056>
- Mputu, J.-N.K., Nkutu, L.K., Kisimba, T.N., Masudi, M.K., Papier, S., Tshamala, A.K., & Baele, J.-M. 2025. *Physicochemical qualities and ecological risk assessment of soil and plant heavy metal contamination in selected areas around Kipushi mining at the Congolese Copperbelt in DR Congo*. *Scientific African*, 30: e02987. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2025.e02987>
- Munawaroh, K., Budi, S., & Pamoengkas, P. 2020. Aplikasi amelioran tanah dan mycosilvi pada *Falcataria* sp. dan *Ochroma bicolor* Rowlee. untuk reklamasi lahan pascatambang pasir silika. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*. <https://doi.org/10.18343/jipi.25.3.334>.
- Naimanova, A., Akhmetova, S., Issayeva, A., Vyrakhmanova, A., & Alipbekova, A. 2024. *Phytoaccumulation of heavy metals in South Kazakhstan soils*

- (Almaty and Turkestan regions): An evaluation of plant-based remediation potential. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 19(2): 451-464. <https://doi.org/10.18280/ijdne.19.0211>
- Nurindriana, F., & Wicaksono, K. 2022. Pemanfaatan biochar dan kompos black soldier fly pada fitoremediasi tanah tercemar timbal dan pengaruhnya terhadap pertumbuhan serta hasil tanaman sawi (*Brassica juncea* L.). *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2.022.009.2.10>.
- Ouyang, L., Chen, S., Yang, W., Zheng, J., Ye, L., Liu, Q., & Yang, J. 2024. Organic fertilizer improved the lead and cadmium metal tolerance of *Eucalyptus camaldulensis* by enhancing the uptake of potassium, phosphorus, and calcium. *Frontiers in Plant Science*, 15: 1444227. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1444227>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., & Moher, D. 2021. *Updating guidance for reporting systematic reviews: Development of the PRISMA 2020 statement*. *Journal of Clinical Epidemiology*, 134: 103-112. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2021.02.003>
- Sahlaoui, T., Raklami, A., Heinze, S., Marschner, B., Tahiri, A., Chtouki, M., Ibnyasser, A., Bargaz, A., & Oufdou, K. 2024. Use of organo-mineral amendments and *Lupinus angustifolius* to enhance mine tailings rehabilitation. *Environmental and Experimental Botany*, 224: 105800. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105800>
- Shakeel, T., Shah, G. M., Zeb, B. S., Gul, I., Bibi, S., Hussain, Z., & Irshad, M. 2024. Phytoremediation potential and vegetation assessment of plant species growing on multi-metals contaminated coal mining site. *Environmental Research Communications*, 6(5): 055006. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ad4320>.
- Solomou, A., Germani, R., Proutsos, N., Petropoulou, M., Koutroumpilas, P., Galanis, C., Maroulis, G., & Kolimenakis, A. 2022. *Utilizing Mediterranean Plants to Remove Contaminants from the Soil Environment: A Short Review*. *Agriculture*. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020238>.
- Takáč, P., Szabová, T., Kozáková, L., & Benková, M. 2018. Heavy metals and their bioavailability from soils in the long-term polluted Central Spiš region of SR. *Plant Soil and Environment*, 55: 167-172. <https://doi.org/10.17221/21/2009-pse>.
- Tamma, A., Lejcuś, K., Fiałkiewicz, W., & Marczak, D. 2025. *Advancing Phytoremediation: A Review of Soil Amendments for Heavy Metal Contamination Management*. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su17135688>.
- Tang, H., Wang, S., Liu, Y., Hassan, M., Song, Y., Huang, G., Hashem, M., Alamri, S., & Mostafa, Y. 2022. Biochar: A promising soil amendment to mitigate heavy metals toxicity in plants. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. <https://doi.org/10.15835/nbha50.312778>.
- Techane, G., Sahilu, G., & Amare, E. 2024. Experimental study on phytoremediation of heavy metal from mine wastewater by *Rumex nepalensis* Spreng. *Borneo Journal of Resource Science and Technology*, 14(1): 88-97. <https://doi.org/10.33736/bjrst.59.58.2024>
- Urošević, J., Stanković, D., Jokanović, D., Trivan, G., Rodzkin, A., Jović, D., & Jovanović, F. 2024. Phytoremediation potential of different genotypes of *Salix alba*

- and *S. viminalis*. *Plants*, 13(5): 735.
<https://doi.org/10.3390/plants13050735>
- Van Eck, N., & Waltman, L. 2010. *Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping*. *Scientometrics*, 84(2): 523–538.
<https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Varela, A., Herrera, J., Vanegas, J., Soler, J., Peña, J., Pérez, P., & Pinilla, J. 2025. *Biochar, Compost, and Effective Microorganisms: Evaluating the Recovery of Post-Clay Mining Soil Sustainability*.
<https://doi.org/10.3390/su17136088>
- Virú-Vasquez, P., Pilco-Nuñez, A., Tineo-Cordova, F., Madueño-Sulca, C. T., Quispe-Ojeda, T. C., Arroyo-Paz, A., Alvarez-Arteaga, R., Velasquez-Zuñiga, Y., Oscanoa-Gamarra, L. L., Saldivar-Villarroel, J., Césare-Coral, M. F., & Nuñez-Bustamante, E. 2025. *Integrated biochar-compost amendment for Zea mays L. phytoremediation in soils contaminated with mining tailings of Quiulacocha, Peru*. *Plants*, 14(10): 1448.
<https://doi.org/10.3390/plants14101448>
- Wahana Lingkungan Hidup Indonesia (WALHI). 2025. *Laporan Tahunan WALHI 2025*. Jakarta: WALHI. Diakses dari
<https://www.walhi.or.id/uploads/2024-Rilis/TLH%202025%20rev.pdf>
- Wan, X., Lei, M., & Chen, T. 2016. *Cost-benefit calculation of phytoremediation technology for heavy-metal-contaminated soil*. *The Science of the total environment*, 563-564: 796-802.
<https://doi.org/10.1016/j.scitoten.v.2015.12.080>
- Wang, J., Jiang, Y., Peng, Y., Chen, X., Yan, W., Liang, X., Wu, Q., & Fang, J. 2025. *Influence of miscanthus floridulus on heavy metal distribution and phytoremediation in coal gangue dump Soils: implications for ecological risk mitigation*. *Plants*, 14.
<https://doi.org/10.3390/plants14060836>
- Wang, S., Guo, Y., Hu, H., Liang, Y., Li, K., Zhang, K., Hou, G., Li, C., Zhang, J., & Wang, Z. 2025. *Sources, distribution, and health risks of heavy metal contamination in the Tongren Mercury Mining Area: a case study on mercury and cadmium*. *Toxics*, 13.
<https://doi.org/10.3390/toxics13070527>
- Wang, Y., Narayanan, M., Shi, X., Chen, X., Li, Z., Natarajan, D., & Ma, Y. 2022. *Plant growth-promoting bacteria in metal-contaminated soil: Current perspectives on remediation mechanisms*. *Frontiers in Microbiology*, 13.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.966226>
- Yulnafatmawita, Y., Yasin, S., & Maira, L. 2023. *Role of rice husk biochar in improving soil physical properties of ex gold-mined soil*. *Journal of Tropical Soils*.
<https://doi.org/10.5400/jts.2023.v28i3.127-133>
- Zgorelec, Ž., Bilandzija, N., Knez, K., Galić, M., & Žužul, S. 2020. *Cadmium and mercury phytostabilization from soil using Miscanthus × giganteus*. *Scientific Reports*, 10.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-63488-5>