

TEKNOLOGI REMEDIASI TANAH TERKONTAMINASI LOGAM BERAT PADA REKLAMASI LAHAN BEKAS TAMBANG TEMBAGA

Remediation Technology for Heavy Metal-Contaminated Soil on Copper Post-Mining Land Reclamation

Putri Oktariani^{1,2*}, Suwardi^{1,2}, Hermanu Widjaja^{1,2}, Dyah Tjahyandari Suryaningtyas^{1,2}, Aulya Putri¹

¹Pusat Studi Reklamasi Tambang, IPB University, Kampus IPB Baranangsiang, Bogor 16143

²Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, IPB University, Dramaga, Bogor 16680

*Korespondensi: putrioktariani@apps.ipb.ac.id

Abstract

Indonesia is a country with very high mineral reserves. Copper is one of the most important minerals found and produced in Indonesia. According to data from USGS in 2023, Indonesia is the world's seventh-largest copper producer. Copper mining activities primarily utilize open-pit mining techniques compared to underground mining techniques. Open-pit mining techniques lead to environmental damage, including land degradation, erosion, deforestation, ecosystem destruction, and soil, air, and water pollution due to acid mine drainage. The aim of this research is to provide remediation technologies recommendations for heavy metal-contaminated soil on copper post-mining land. Mine reclamation plays a crucial role in addressing various issues on post-mining lands. Waste dump area is one of the focus areas in reclamation activities that used as a place to store non-valuable materials. Waste dump area typically contain heavy metals that are harmful to the environment. High concentrations of heavy metals in the soil can make it toxic, which then has an impact on reducing soil quality and poisoning plants. Selecting suitable ameliorants and hyperaccumulator plants that are capable to reduce heavy metal toxicity is the key to successful mine reclamation. Zeolite ameliorant can reduce heavy metal content in the soil by increasing adsorption complexes, while dolomite can reduce heavy metal content in the soil by increasing soil pH. Phytoremediation by using hyperaccumulator plants also can reduce soil toxicity through destruction, inactivation, or immobilization of heavy metals into harmless forms.

Keywords: ameliorants, heavy metal-contaminated soil, phytoremediation, reclamation.

PENDAHULUAN

Tembaga merupakan salah satu mineral terpenting yang ditemukan dan diproduksi di Indonesia. Menurut USGS (2023), pada tahun 2022 Indonesia menempati peringkat ke-7 produsen tembaga terbesar di dunia, setelah Chili, Peru, Kongo, Tiongkok, Amerika Serikat, dan Rusia dengan pangsa produksi mencapai 920 ribu ton. Indonesia memiliki cadangan tembaga sebesar 24 juta ton atau sekitar 2,7% dari total cadangan tembaga dunia dengan perkiraan umur cadangan bijih tembaga 25 tahun. Sebanyak 71% cadangan bijih tembaga Indonesia berada di Papua (Kementerian ESDM, 2020). Salah satu tambang tembaga terbesar di dunia berada di Indonesia, yaitu tambang Grasberg milik PT Freeport Indonesia. Terdapat dua metode penambangan tembaga yaitu, tambang terbuka (*open-pit mining*) dan tambang bawah tanah (*underground mining*). Kegiatan penambangan tembaga dengan teknik tambang terbuka lebih banyak beroperasi dibandingkan dengan teknik tambang bawah tanah. Teknik penambangan terbuka menyebabkan kerusakan lingkungan dan mengubah tutupan lahan secara drastis. Dampak lingkungan utama yang terjadi meliputi, degradasi lahan, erosi, deforestasi hutan, kerusakan ekosistem, serta pencemaran tanah, air dan udara akibat air asam tambang (Takam Tiamgne *et al.*, 2021).

Aktivitas penambangan tembaga dapat menghasilkan akumulasi logam berat. Penambangan tembaga dapat menghasilkan limbah logam berat yang kemudian dapat mencemari perairan dan tanah, sehingga dapat menyebabkan akumulasi logam berat dalam tubuh organisme air dan tanah. Logam berat adalah unsur kimia yang mempunyai bobot jenis lebih dari 5 g/cm³ dan biasanya terletak di bagian kanan bawah sistem periodik (Saeni, 1989). Contoh logam berat adalah timbal (Pb), besi (Fe), dan mangan (Mn). Logam berat adalah bahan pencemar berbahaya yang bersifat toksik jika terdapat dalam jumlah besar, dan dapat memengaruhi berbagai aspek biologi serta ekologi perairan. Indikator pencemaran lingkungan perairan meliputi kandungan logam berat yang terakumulasi dalam air dan sedimen. Logam berat yang masuk ke badan air juga dapat terakumulasi di dalam tubuh ikan (Azizah & Maslahat, 2021).

Selain itu, sumberdaya mineral tembaga seringkali berdampungan dengan emas dan perak, maka dari itu umumnya kegiatan penambangan tembaga memiliki produk samping emas dan perak. Menurut Sukandarrumidi (2016), endapan emas biasa ditemukan bersamaan dengan logam perak dan tembaga. Deposit tembaga (Cu), emas (Au), dan perak (Ag) sering ditemukan bersamaan akibat berbagai faktor geologi dan geokimia. Tembaga, emas, dan, perak menunjukkan perilaku geokimia yang serupa, yaitu tergolong sebagai logam mulia yang tahan terhadap korosi dan oksidasi, serta cenderung tetap dalam bentuk logam dibandingkan membentuk senyawa dengan unsur lain. Akibatnya, logam-logam tersebut mencemari lingkungan perairan dengan cara menetap dalam sedimen dan partikel-partikel di dasar perairan, yang dapat menyebabkan bioakumulasi dalam organisme akuatik dan mengganggu keseimbangan ekosistem (Hariyoto, 2021).

Berbagai permasalahan lingkungan yang terjadi pada lahan bekas tambang dapat diatasi melalui kegiatan reklamasi tambang dengan cara menata, memulihkan, dan memperbaiki kualitas lingkungan dan ekosistem agar dapat berfungsi kembali sesuai peruntukannya. Salah satu fokus kawasan dalam kegiatan reklamasi lahan bekas tambang tembaga adalah area penimbunan atau yang biasa dikenal dengan *waste dump area*. Area penimbunan merupakan daerah pada lokasi tambang terbuka yang dijadikan sebagai tempat penimbunan material tidak berharga, yaitu material kadar rendah dan/atau material bukan bijih (Hardianti & Halim, 2021). Area penimbunan umumnya mengandung logam-logam berat yang berbahaya bagi lingkungan. Tingginya kandungan logam berat pada tanah dapat mengakibatkan tanah bersifat toksik yang kemudian berdampak pada penurunan kualitas tanah serta keracunan pada tanaman. Pemilihan teknologi remediasi yang tepat dalam menurunkan tingkat toksisitas logam berat menjadi kunci dalam mencapai keberhasilan reklamasi tambang. Tujuan dari penelitian ini yaitu memberikan rekomendasi teknologi remediasi untuk tanah yang terkontaminasi logam berat pada lahan bekas tambang tembaga.

METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif analitis untuk mendeskripsikan dan memberikan rekomendasi terkait strategi reklamasi lahan bekas tambang tembaga guna merestorasi ekosistem. Langkah-langkah yang dilakukan meliputi: (1) Pengumpulan Data Sekunder: mengumpulkan data dari laporan penelitian, dokumen pemerintah, publikasi ilmiah, dan studi kasus terkait reklamasi lahan bekas tambang tembaga. (2) Studi Literatur: meninjau literatur yang relevan untuk memahami teknik-teknik reklamasi yang telah diterapkan di berbagai lokasi tambang tembaga dan menganalisis hasil penelitian untuk mengidentifikasi praktik terbaik dalam merestorasi ekosistem lahan bekas tambang. (3) Analisis Komparatif: membandingkan berbagai studi kasus reklamasi tambang tembaga untuk menentukan faktor-faktor kunci keberhasilan atau kegagalan proyek reklamasi. (4) Pengembangan Rekomendasi: mengembangkan rekomendasi strategi reklamasi yang sesuai berdasarkan analisis data sekunder dan studi literatur. Rekomendasi ini mencakup langkah teknis, pilihan tanaman untuk revegetasi, metode pengelolaan air, dan teknik pemulihan tanah.

PEMBAHASAN

Dampak aktivitas penambangan tembaga

Kegiatan penambangan mineral tembaga dapat menghasilkan limbah yang mengandung logam berat. Limbah ini dapat berupa tailing yang mengandung beberapa unsur logam berat yang mempunyai sifat toksik, seperti tembaga (Cu), perak (Ag), emas (Au), kadmium (Cd), timbal (Pb), dan lain-lain (Paradise & Nurkhamim, 2020). Penambangan tembaga menghasilkan tailing tembaga dalam jumlah besar, yang dikelompokkan berdasarkan ukurannya menjadi empat kategori: tailing ukuran kasar ($>175 \mu\text{m}$) diendapkan di bagian hulu, tailing ukuran sedang ($150\text{--}175 \mu\text{m}$) di bagian tengah, tailing ukuran halus ($38\text{--}75 \mu\text{m}$) di bagian hilir, dan tailing ukuran sangat halus ($<38 \mu\text{m}$) diendapkan di muara serta zona pesisir (Puradyatmika et al., 2012). Tailing tembaga merupakan limbah yang tidak dapat terurai dan cenderung terakumulasi dalam jangka panjang di lingkungan, sehingga menimbulkan berbagai masalah seperti menghambat perkembangan tumbuhan, menyebabkan klorosis dan defoliasi, menghalangi pemanjangan akar serta merusak membran sel akar, dan mencemari tanah melalui genangan air tailing (Napitupulu & Purwanti, 2022). Selain itu, logam tembaga dapat terbuang ke air sungai dan perairan laut melalui aliran air sungai dan run-off daratan, yang menyebabkan konsentrasi tembaga tinggi di perairan (Tampubolon et al., 2021).

Berdasarkan penelitian (Nuriadi et al., 2013) pengukuran limbah tembaga pada pertambangan Poboya, Sulawesi Tengah menunjukkan kadar tembaga (Cu) berkisar antara 79,51 mg/kg hingga 204,92 mg/kg. Hal ini melampaui ambang batas Cu dalam limbah yang ditetapkan oleh Bapedal (Kep.04/Bapedal/09/1995), yang hanya sebesar 100 mg/kg. Selain itu, analisis kandungan logam berat pada tailing yang dilakukan oleh (Zhao et al., 2023) menunjukkan bahwa di antara enam logam berat (Cu, Pb, Zn, As, Cr, Cd) yang terkandung dalam tailing, hanya kandungan Cu yang melebihi batas standar. Cu merupakan polutan utama dalam tailing tembaga, dengan toksisitas tinggi yang menyebabkan potensi risiko ekologi terbesar.

Menurut Dusengemungu *et al.*, (2022) tanah pada lahan bekas tambang tembaga mengalami kontaminasi logam berat secara umum adalah $\text{Cu} > \text{Co} > \text{Fe} > \text{Pb} > \text{Mn} > \text{Zn}$ dengan Co, Cu, dan Fe memiliki konsentrasi tinggi sedangkan Mn, Pb, dan Zn memiliki konsentrasi yang sedang (Tabel 1). Kondisi tanah pada lahan bekas tambang tembaga dan hutan alami di areal reklamasi Batu Hijau PT AMNT, Nusa Tenggara Barat disajikan pada Tabel 2. Berdasarkan kriteria BPSI Tanah dan Pupuk (2023), tanah pada lokasi reklamasi memiliki pH yang tergolong sangat masam; kejenuhan basa dan Mg-dd sangat tinggi; KTK dan Ca-dd tinggi; C-organik sangat rendah; N-total, P, Na-dd, dan K-dd

rendah. Sedangkan tanah pada lokasi hutan alami memiliki pH yang tergolong masam; kejenuhan basa sangat tinggi; Ca-dd dan Mg-dd tinggi; KTK, N-total, dan K-dd sedang; C-organik, P, dan Na-dd rendah.

Tabel 1 Kandungan logam berat pada tanah tailing tambang tembaga di Provinsi Copperbelt, Zambia, Afrika Selatan

Lokasi	Logam Berat (ppm)					
	Cu	Co	Fe	Mn	Zn	Pb
Nkana <i>Slag Dumpsite</i> (BM)	138,9	19,5	401,1	14,8	2,3	1,05
Uchi <i>Tailing Dam</i> (TD 26)	100,1	13,7	318,9	16,1	2,3	0,9
Mufulira <i>Tailing Dam</i> (TD 10)	22,5	1,2	137,6	7,8	0,6	0,9
Hutan Alami oleh Zambia <i>Forestry</i>	16	0	185,5	3,8	0	0

Sumber: Dusengemungu *et al.*, (2022)

Tabel 2 Analisis sifat kimia tanah lahan bekas tambang tembaga di areal reklamasi Batu Hijau PT AMNT, Nusa Tenggara Barat

Lokasi	pH	KB	C-org	N-total	P	K
	H ₂ O					
Tahun tanam 2017	4,43	91,92	0,50	0,11	6,10	118
Hutan Alami	5,26	80,30	1,59	0,28	7,47	279,50

Lokasi	KTK	Ca-dd	Mg-dd	Na-dd	K-dd
Tahun tanam 2017	29,54	13,75	13,02	0,19	0,20
Hutan Alami	21,75	10,71	6,16	0,19	0,41

Sumber: Pusdi Reklamatam IPB (2021)

Menurut Aanisa *et al.*, (2023), kelarutan logam berat lebih tinggi pada pH rendah yang kemudian menyebabkan toksisitas logam berat menjadi semakin besar. Tingginya kandungan logam berat pada tanah mengakibatkan tanah bersifat toksik yang kemudian berdampak pada penurunan kualitas tanah, keracunan pada tanaman, serta akumulasi logam berat dalam tanaman. Selain itu, logam berat juga dapat terlarut ke dalam air tanah dan menimbulkan risiko terhadap ekosistem perairan serta kesehatan manusia. Konsumsi tanaman serta air yang mengandung logam berat dapat mengancam kesehatan manusia (Golia, 2023). Oleh karena itu, masalah toksisitas logam berat pada tanah perlu segera diatasi guna mencegah dampak lingkungan yang semakin meluas.

Penambangan tembaga tidak hanya menghasilkan limbah padat (tailing) tetapi juga menghasilkan air asam tambang. Air asam tambang menjadi salah satu sumber masalah lingkungan terbesar yang disebabkan oleh industri pertambangan (Prasad, 2024). Air asam tambang terjadi ketika mineral yang mengandung sulfur, terutama sulfida besi, terpapar udara, kelembaban, dan bakteri pengoksidasi besi. Proses ini menghasilkan asam sulfat, besi terlarut, dan endapan hidroksida besi. Asam sulfat tersebut dapat melarutkan logam berat dari bahan tambang, membentuk larutan dengan pH asam, yang mengandung konsentrasi tinggi arsenik, kadmium, timbal, tembaga, dan sebagainya (Iatan, 2021). Air asam tambang merupakan masalah serius dalam kualitas air karena menurunkan pH air, sehingga logam-logam terlarut menjadi mudah tersedia untuk diserap oleh organisme bentik dan ikan, yang menjadi jalur utama masuknya logam-logam tersebut ke dalam rantai makanan manusia (Edokpayi *et al.*, 2020).

Tabel 3 menunjukkan kandungan logam berat dari beberapa lokasi pertambangan, dari data dapat dilihat bahwa kadar logam Fe, Mn, Cu, dan Zn cenderung lebih tinggi daripada logam Ni, Co, As, Cd, dan Pb. Kandungan logam-logam ini, jika tidak diolah dengan baik, dapat mencemari ekosistem lingkungan. Logam berat bersifat racun bagi makhluk hidup melalui berbagai cara, misalnya, ketika air terkontaminasi oleh logam berat, logam tersebut dapat tersebar ke dalam tubuh manusia dan sebagian dapat terakumulasi. Jika keadaan ini berlanjut dalam jangka waktu yang lama, dapat membahayakan

kesehatan manusia. Selain itu, kontaminasi air oleh logam berat dapat menyebabkan kematian pada ikan dan organisme perairan (Mujiyanti et al., 2016; Rahman et al., 2020).

Tabel 3. Kandungan logam berat pada air asam tambang di beberapa lokasi penambangan

Kandungan Logam (mg/L)	Lokasi		
	Lombong Barat	Sungai Lembing	Lubuk Mandi
Fe	7,14	36,31	2,15
Mn	3,30	7,17	1,12
Cu	11,06	9,19	0,17
Zn	1,58	6,56	0,62
Ni	0,00	0,09	0,21
Co	0,01	0,51	0,19
As	0,01	0,24	0
Cd	0,02	0,05	0
Pb	0,45	0,13	0,01

Sumber: (Hatar et al., 2013)

Remediasi tanah tercemar logam berat

Remediasi tanah tercemar logam berat merupakan tantangan dalam pengelolaan lingkungan, terutama di lokasi-lokasi yang telah mengalami aktivitas pertambangan khususnya area pertambangan tembaga. Tingginya kandungan logam berat dalam tanah dapat menyebabkan berbagai masalah ekologis dan kesehatan manusia. Oleh karena itu, diperlukan upaya-upaya remediasi yang efektif untuk mengurangi tingkat toksisitas dan menciptakan lingkungan yang lebih baik dan berkelanjutan. Salah satu pendekatan yang umum digunakan dalam mengatasi masalah ini adalah dengan mengaplikasikan bahan amelioran dan menggunakan fitoremediasi.

1. Aplikasi Bahan Amelioran

Pengaplikasian bahan amelioran dolomit dan zeolit mampu menurunkan toksisitas logam berat pada tanah melalui imobilisasi logam berat (Vrinceanu *et al.*, 2019). Imobilisasi logam berat dapat terjadi melalui adsorpsi dan pengendapan logam berat yang akan menurunkan ketersediaan logam berat hingga tidak dapat terserap oleh tanaman dan tidak terlarut ke dalam air tanah (Derakhshan Nejad *et al.*, 2018). Zeolit merupakan mineral aluminosilikat dengan struktur berongga yang memiliki KTK sangat tinggi (80-180 meq/100 g) sehingga dapat menjerap logam berat (Siallagan & Suwardi, 2003). Imobilisasi logam berat oleh zeolit umumnya terjadi melalui proses stabilisasi atau solidifikasi (Belviso, 2020). Berdasarkan penelitian Roulia & Vasilatos (2023), zeolit terbukti efisien dalam menurunkan konsentrasi logam berat sebesar 38% Pb, 72% Cd, 61% Zn, 67% Cu, 77% Mn, dan 33% Fe pada tanah terkontaminasi logam berat akibat air asam tambang di area bekas pertambangan Lavrion, Yunani.

Hasil penelitian (Istichori, 2015) menunjukkan bahwa pemberian 1 g zeolit ke dalam 100 ml larutan yang mengandung 10 ppm Fe dapat menurunkan konsentrasi Fe menjadi 1,3 ppm, atau turun sebesar 87%. Selain itu, dengan memberikan 3 g zeolit ke dalam 100 ml larutan yang mengandung 8 ppm Mn, konsentrasi Mn dapat menurun menjadi 3,6 ppm, yang menandakan penurunan sebesar 55%. Kemampuan zeolit dalam menjerap Fe sebesar 0.87 mg/g zeolit, sementara untuk Mn sebesar 0.29 mg/g zeolit pada ukuran < 0.2 mm. Kemampuan zeolit dalam menyerap logam berat, seperti Fe dan Mn, bergantung pada ukuran partikelnya, dimana semakin halus ukuran zeolit, semakin besar kemampuannya dalam menjerap logam berat. Selain itu, penelitian oleh (Sefti et al., 2024) menunjukkan bahwa efektivitas penyisihan logam berat oleh zeolit alam adalah sebesar 93,98%, sementara untuk zeolit hasil sintesis mencapai 98,16%. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa zeolit hasil sintesis memiliki efisiensi adsorpsi yang baik. Zeolit alam dan

zeolit sintetik memiliki potensi besar sebagai bahan yang berkelanjutan dan ekonomis untuk menghilangkan logam berat dari air asam tambang.

Selain itu, menurut Vrînceanu *et al.* (2019), zeolit mampu menurunkan kandungan logam berat pada tanah secara signifikan melalui peningkatan kompleks jerapan, sedangkan dolomit mampu menurunkan kandungan logam berat pada tanah secara signifikan melalui peningkatan pH tanah. Dolomit mengandung unsur hara kalsium oksida (CaO) dan magnesium oksida (MgO) yang dapat menurunkan jumlah kation asam seperti H^+ dan Al^{3+} sehingga mampu meningkatkan pH tanah. Proses penjerapan logam berat akan meningkat seiring dengan peningkatan pH tanah. Adsorpsi logam berat oleh dolomit umumnya terjadi dengan cara adsorpsi kimia melalui transfer elektron. Khoshraftar *et al.* (2023) menjelaskan bahwa dolomit berpotensi tinggi untuk digunakan sebagai adsorben yang sangat efektif dan berbiaya rendah dalam menurunkan konsentrasi logam berat terutama absorpsi Cu. Berdasarkan penelitian Tangviroon *et al.* (2020), pemberian dolomit pada lahan penyimpanan material sisa tambang di Kabwe, Zambia mampu meningkatkan pH dan menurunkan konsentrasi logam berat Pb dan Zn.

Berdasarkan hasil penelitian oleh (Herlina *et al.*, 2014) penggunaan kapur telah terbukti optimal dalam menaikkan pH air asam tambang. Dengan penambahan kapur pada dosis 1,0 g/L, mampu meningkatkan pH air asam tambang dari 4,25 menjadi 8,00. Selain itu, hasil penelitian juga menunjukkan penurunan yang signifikan dalam kandungan logam berat seperti Fe, yang mengalami penurunan sebesar 51,85% dari 0,81 mg/L menjadi 0,39 mg/L, dan Mn, yang mengalami penurunan sebesar 62,54% dari 10,2 mg/L menjadi 3,82 mg/L dalam air asam tambang. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan kapur memiliki potensi yang besar dalam mengurangi pencemaran logam berat dalam lingkungan air tambang.

2. Fitoremediasi

Selain penggunaan bahan amelioran, fitoremediasi juga dapat dimanfaatkan dalam mengatasi masalah toksisitas tanah pada lahan bekas tambang. Fitoremediasi merupakan upaya penurunan tingkat toksisitas pada tanah menggunakan tanaman hiperakumulator melalui penghancuran, inaktivasi atau imobilisasi logam berat menjadi bentuk yang tidak berbahaya. Fitoremediasi adalah teknologi remediasi yang banyak dipilih dan dikembangkan sebab ramah lingkungan dan hemat biaya. Kriteria tanaman fitoremediasi yaitu adaptif, berumur pendek, memiliki biomassa tinggi, serta mampu menyerap, mengikat, dan mengubah kontaminan dalam tanah menjadi tidak toksik (Setiadi *et al.*, 2014). Teknik fitoremediasi secara umum dapat dikelompokkan dalam lima jenis, yaitu fitoekstraksi, fitovolatilisasi, fitodegradasi, fitostabilisasi, rhizofiltrasi (Tsao, 2003). Teknik fitoremediasi yang paling menjanjikan untuk reklamasi lahan bekas tambang adalah fitoekstraksi dan fitostabilisasi.

Berdasarkan penelitian milik Azizi *et al.* (2023), *P. miliaceum* merupakan tanaman yang baik untuk fitostabilisasi Pb, Cd, Cu, V, dan As, sedangkan *S. oppositifolia* merupakan tanaman yang baik untuk fitoekstraksi Zn, Cd, Mn, dan Mo. Kesesuaian tanaman untuk stabilisasi atau ekstraksi logam berat pada lahan bekas tambang bergantung pada jenis logam dan jenis tanah.

Penelitian oleh Napitupulu & Purwanti (2022) menunjukkan bahwa tumbuhan lokal seperti *Limnocharis flava*, *Vetiver zizanioides*, dan *Eichhornia crassipes* memiliki kemampuan fitostabilisasi yang baik, dengan tingkat penyisihan tailing tembaga masing-masing sebesar 95,56%, 95,83%, dan 76,9%. Tumbuhan ini tidak hanya mampu menstabilkan kontaminan dalam tanah, tetapi juga menghasilkan biomassa yang tinggi, menjadikannya pilihan efektif untuk fitostabilisasi. Tanaman yang cocok untuk fitostabilisasi haruslah tumbuhan asli yang toleran terhadap kekeringan, garam, dan logam, serta mampu membatasi akumulasi logam di bagian atas tanaman. Faktor-faktor penting dalam evaluasi akumulasi logam dan masalah toksisitas meliputi kemampuan tanaman

dalam mengikat logam di akar, toleransi terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem, serta kemampuan untuk tumbuh dengan baik dalam kondisi tanah yang terkontaminasi (Mendez & Maier, 2008).

Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh (Darlis et al., 2023) menunjukkan bahwa lima jenis tanaman, yaitu *A. mangium*, *P. falcataria*, *S. macrophylla*, *I. cylindrica*, dan *M. malabathricum*, memiliki potensi dalam menyerap logam berat timbal (Pb) dengan tingkat konsentrasi serapan yang bervariasi dalam proses fitoekstraksi. Pada kelompok semai, perlakuan *A. mangium* menunjukkan serapan timbal (Pb) tertinggi sebesar 6,33 ppm, dengan kandungan logam Pb yang tersisa dalam tanah sebesar 14,18 ppm. Selain itu, tanaman *Celosia plumosa* (Voss) Burv juga telah terbukti efektif dalam fitoremediasi logam berat merkuri (Hg), dengan kemampuan menurunkan kandungan merkuri (Hg) hingga 81,25 – 98,68% (Juhriah & Alam, 2016).

Berdasarkan penelitian oleh Baroroh (2018), tumbuhan akuatik *Pistia stratiotes* dan *Salvinia molesta* menunjukkan kemampuan yang signifikan dalam menurunkan konsentrasi logam berat Cu. *Pistia stratiotes* mampu menurunkan kadar Cu sebesar 94% pada konsentrasi 2 ppm dan 90% pada konsentrasi 5 ppm. Namun, tumbuhan ini mengalami kerusakan berupa klorosis dan nekrosis pada kedua konsentrasi tersebut. Di sisi lain, *Salvinia molesta* menunjukkan efisiensi yang lebih tinggi dengan menurunkan kadar Cu sebesar 96% pada konsentrasi 2 ppm dan 95% pada konsentrasi 5 ppm, tanpa mengalami kerusakan fisik. Oleh karena itu, *Salvinia molesta* lebih efektif dan tahan terhadap paparan logam berat Cu dibandingkan *Pistia stratiotes*. Sebagai tambahan, penelitian (Mahardika, 2018) menunjukkan bahwa penggunaan tanaman hiperakumulator *Helianthus annuus* untuk fitoekstraksi logam berat Cu^{2+} pada tanah tercemar dapat menjadi alternatif yang efektif dalam menyerap logam berat Cu^{2+} sebesar 85,56%, dengan waktu paparan selama 9 minggu. Selain itu, studi oleh (Wilson-Corral et al., 2011) menunjukkan bahwa untuk *Kalanchoe serrata*, konsentrasi tembaga rata-rata meningkat menjadi di atas 4 mg/kg dalam bobot kering tanaman, sementara untuk *Helianthus annuus*, konsentrasi tembaga rata-rata meningkat menjadi 118 mg/kg di akar, 141 mg/kg di batang, dan 119 mg/kg di daun.

Semua tumbuhan memiliki kemampuan menyerap logam, namun dalam jumlah yang bervariasi. Sejumlah tumbuhan dari berbagai famili telah terbukti memiliki sifat hipertoleran, yang berarti mereka mampu mengakumulasi logam dengan konsentrasi tinggi pada jaringan akar dan bagian atas tanaman, sehingga dianggap sebagai hiperakumulator. Sifat ini membuat mereka cocok untuk fitoekstraksi, yaitu proses penyerapan dan akumulasi logam berat. Tanaman hiperakumulator dipilih dalam proses fitoremediasi sebab memiliki kemampuan mengakumulasi zat kontaminan dengan konsentrasi tinggi di bagian akar, batang maupun daun. Karakteristik tanaman hiperakumulator adalah: (1) Tahan terhadap unsur logam dalam konsentrasi tinggi pada jaringan akar dan tajuk; (2) Tingkat laju penyerapan unsur dari tanah yang tinggi dibanding tanaman lain; (3) Memiliki kemampuan mentranslokasi dan mengakumulasi unsur logam dari akar ke tajuk dengan laju tinggi (Hidayati, 2005). Beberapa jenis tanaman yang berpotensi sebagai tanaman hiperakumulator disajikan pada Tabel 4.

Berdasarkan penelitian Malayeri et al. (2008) pada area tambang besi dan tembaga Hame Kasi di Hamedan, Iran, spesies tanaman hiperakumulator *Scariola orientalis*, *Cirsium congestum*, *Chenopodium botrys*, *Cousina* sp., dan *Verbascum speciosum* merupakan tanaman akumulator tinggi untuk Cu. Sementara itu, spesies tanaman akumulator sedang meliputi *Stipa barbata* untuk Fe, Mn, Zn, dan Cu; *Cousinia* sp. dan *Chenopodium botrys* untuk Fe, Mn, dan Zn; *Scariola orientalis* untuk Mn dan Zn; *Acanthophyllum microcephalum* dan *Chondrilla juncea* untuk Mn dan Cu; *Centaurea virgata* untuk Fe dan Cu; *Cirsium congestum* untuk Mn; *Astragalus verus*, *Ziziphora clinopodioides*, *Echinops ritrodes*, *Melica jacquem*, *Cousinia bijarensis*, dan *Helichrysum armenum* untuk Cu; *Euphorbia macroclada* untuk Zn; serta *Verbascum speciosum* untuk Fe. Namun,

pemilihan tanaman hiperakumulator dalam fitoremediasi lahan bekas tambang tembaga perlu disesuaikan dengan kondisi lingkungan, jenis tanah, serta jenis logam berat yang terkandung di dalamnya.

Tabel 4 Jenis tumbuhan berpotensi sebagai hiperakumulator

Jenis Kontaminan	Tumbuhan
Zn (seng)	<i>Thlaspi caerulescens</i> , <i>T. calaminare</i> , <i>Sambucus</i> , <i>Rumex</i>
Cd (kadmium)	<i>Thlaspi caerulescens</i> , <i>Sambucus</i> , <i>Rumex</i> , <i>Mimulus guttatus</i> , <i>Lolium miscanthus</i>
Pb (paladium)	<i>Lolium miscanthus</i> , <i>Thlaspi rotundifolium</i>
Co (kobalt)	<i>Agrostis gigantea</i> , <i>Haumaniastrum robertii</i> , <i>Mimulus guttatus</i>
Cu (tembaga)	<i>Aeolanthus biformifolius</i> , <i>Lolium miscanthus</i>
Mn (mangan)	<i>Alyxia rubricaulis</i>
Ni (nikel)	<i>Alyssum bertolonii</i> , <i>A. lesbiacum</i> , <i>Berkheya coddii</i> , <i>Hybanthus floribundus</i> , <i>Thlaspi goesingense</i> , <i>T. montanum</i> , <i>Senecio coronatus</i> , <i>Lolium miscanthus</i> , <i>Phyllanthus serpentinus</i>
Cs (sesium)	<i>Amaranthus retroflexus</i>
As (arsen)	<i>Reynoutria sachalinensis</i> , <i>Chlamydomonas</i> sp.
Se (selenium)	<i>Astragalus racemosus</i>
Fe (besi)	<i>Poaceae</i>
Hg (raksa)	<i>Arabidopsis thaliana</i>
Salinitas	<i>Atriplex</i> spp., <i>Halosarcia</i> spp., <i>Enneapogon</i> spp.
Minyak bumi	<i>Euphorbia</i> , <i>Cetraria</i> , <i>Amaranthus retroflexus</i>

Sumber: Hidayati, (2005)

KESIMPULAN

Penggunaan bahan amelioran zeolit dapat menurunkan kandungan logam berat pada tanah melalui peningkatan kompleks jerapan, sedangkan dolomit mampu menurunkan kandungan logam berat pada tanah melalui peningkatan pH. Selain itu, fitoremediasi juga dapat digunakan dalam upaya penurunan tingkat toksisitas pada tanah yang terkontaminasi logam berat dengan menggunakan tanaman hiperakumulator melalui penghancuran, inaktivasi atau imobilisasi logam berat menjadi bentuk yang tidak berbahaya. Pendekatan gabungan kedua metode ini menawarkan teknologi efektif dalam remediasi tanah pada lahan bekas tambang tembaga yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aanisa, N. A. I., Rahmawati, R., Tasiman, B. H. A., & Astuti, Y. (2023). Analisis Kualitas dan Tingkat Pencemaran Limbah B3 Terlarut di Aliran Sungai Cideng. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(1), 215–227.
- Azizah, M., & Maslahat, M. (2021). Kandungan Logam Berat Timbal (Pb), Kadmium (Cd), dan Merkuri (Hg) di dalam Tubuh Ikan Wader (*Barbodes binotatus*) dan Air Sungai Cikaniki, Kabupaten Bogor. *Limnotek: perairan darat tropis di Indonesia*, 28(2). <https://doi.org/10.14203/limnotek.v28i2.331>
- Azizi, M., Faz, A., Zornoza, R., Martinez, S., & Acosta, J. A. (2023). Phytoremediation Potential of Native Plant Species in Mine Soils Polluted by Metal(loid)s and Rare Earth Elements. *Plants*, 12(6), 1219. <https://doi.org/10.3390/plants12061219>
- Balai Pengujian Standar Instrumen Tanah dan Pupuk. (2023). *Petunjuk Teknis: Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air, dan Pupuk* (3rd ed.). Balai Penelitian Tanah.
- Belviso, C. (2020). Zeolite for Potential Toxic Metal Uptake from Contaminated Soil: A Brief Review. *Processes*, 8(7), 820. <https://doi.org/10.3390/pr8070820>

- Darlis, V. V., Putriani, C. N., Yoza, D., & Pebriandi, P. (2023). Potensi dan Pertumbuhan Beberapa Jenis Tanaman dalam Penyerapan Logam Berat Timbal (Pb) pada Media Tanah Bekas Tambang Timah Desa Siabu Kecamatan Salo Kabupaten Kampar. *Journal of Tropical Silviculture*, 14(03), Article 03. <https://doi.org/10.29244/j-siltrop.14.03.191-194>
- Derakhshan Nejad, Z., Jung, M. C., & Kim, K.-H. (2018). Remediation of soils contaminated with heavy metals with an emphasis on immobilization technology. *Environmental Geochemistry and Health*, 40(3), 927–953. <https://doi.org/10.1007/s10653-017-9964-z>
- Dusengemungu, L., Mubemba, B., & Gwanama, C. (2022). Evaluation of heavy metal contamination in copper mine tailing soils of Kitwe and Mufulira, Zambia, for reclamation prospects. *Scientific Reports*, 12(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15458-2>
- Edokpayi, J. N., Makungo, R., Mathivha, F., Rivers, N., Volenzo, T., & O. Odiyo, J. (2020). Chapter 5 - Influence of global climate change on water resources in South Africa: Toward an adaptive management approach. In P. Singh, Y. Milshina, K. Tian, D. Gusain, & J. P. Bassin (Eds.), *Water Conservation and Wastewater Treatment in BRICS Nations* (pp. 83–115). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818339-7.00005-9>
- Golia, E. E. (2023). The impact of heavy metal contamination on soil quality and plant nutrition. Sustainable management of moderate contaminated agricultural and urban soils, using low cost materials and promoting circular economy. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 33, 101046. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101046>
- Hardianti, S., & Halim, M. S. (2021). Perencanaan desain disposal area serta sequence timbunan overburden guna mengakomodasi produksi bulan juli tahun 2020 di PT X, Kabupaten Kutai Barat. *Jurnal Pertambangan*, 5(2), Article 2. <https://doi.org/10.36706/jp.v5i2.185>
- Hariyoto, F. (2021). Akumulasi Logam Berat Timbal (Pb), Kadmium (Cd), Seng (Zn) Dan Merkuri (Hg) Di Perairan Beserta Dampaknya Bagi Produk Perikanan Dan Kesehatan Manusia. Vol. 18, 39–46.
- Hatar, H., Abd Rahim, S., Razi, W., & Sahrani, F. (2013). Heavy Metals Content In Acid Mine Drainage at Abandoned and Active Mining Area. *AIP Conference Proceedings*, 1571, 646. <https://doi.org/10.1063/1.4858727>
- Herlina, A., Handayani, H. E., & Iskandar, H. (2014). Pengaruh Fly Ash Dan Kapur Tohor Pada Netralisasi Air Asam Tambang Terhadap Kualitas Air Asam Tambang (Ph, Fe & Mn) di Iup Tambang Air Laya Pt.bukit Asam (Persero),tbk. *Jurnal Ilmu Teknik Sriwijaya*, 2(2), 102629. <https://www.neliti.com/id/publications/102629/>
- Hidayati, N. (2005). Fitoremediasi dan Potensi Tumbuhan Hiperakumulator. *HAYATI Journal of Biosciences*, 12(1), 35–40. [https://doi.org/10.1016/S1978-3019\(16\)30321-7](https://doi.org/10.1016/S1978-3019(16)30321-7)
- Iatan, E.-L. (2021). Chapter 16—Gold mining industry influence on the environment and possible phytoremediation applications. In K. Baudhdh, J. Korstad, & P. Sharma (Eds.), *Phytoremediation of Abandoned Mining and Oil Drilling Sites* (pp. 373–408). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821200-4.00007-8>
- Istichori, E. (2015). Kemampuan Zeolit Untuk Menurunkan Konsentrasi Ion Besi Dan Mangan Dalam Limbah Cair Tambang. <http://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/79714>
- Juhriah, J., & Alam, M. (2016). Fitoremediasi Logam Berat Merkuri (Hg) pada Tanah Dengan Tanaman Celosia Plumosa (Voss) Burv. *Jurnal Administrasi dan Kebijakan Kesehatan Indonesia*, 1(1), 110300. <https://doi.org/10.20956/bioma.v1i1.1349>
- Kementerian ESDM. (2020). *Booklet Tambang Tembaga 2020*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. <https://www.esdm.go.id/id/booklet/booklet-tambang-tembaga-2020>
- Khoshrافتar, Z., Masoumi, H., & Ghaemi, A. (2023). An insight into the potential of dolomite powder as a sorbent in the elimination of heavy metals: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 7, 100276. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100276>
- Mahardika, G. (2018). Fitoekstraksi logam berat tembaga (Cu²⁺) menggunakan tanaman bunga matahari (*helianthus annuus*). *SKRIPSI-2017*. http://repository.trisakti.ac.id/usaktiana/index.php/home/detail/detail_koleksi/0/SKR/judul/00000000000091643/0
- Malayeri, B., Chehregani Rad, A., & Yousefi, N. (2008). Identification of the Hyper Accumulator Plants in Copper and Iron Mine in Iran. *Pakistan Journal of Biological Sciences: PJBS*, 11, 490–492. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2008.490.492>

- Mendez, M. O., & Maier, R. M. (2008). Phytostabilization of Mine Tailings in Arid and Semiarid Environments—An Emerging Remediation Technology. *Environmental Health Perspectives*, *116*(3), 278–283. <https://doi.org/10.1289/ehp.10608>
- Mujiyanti, D. R., Irawati, U., Nurmasari, R., & Risna, M. (2016). PENENTUAN KANDUNGAN TIMBAL, TEMBAGA DALAM AIR-SEDIMEN PADA SALAH SATU LUBANG TAMBANG INTAN DI KELURAHAN SUNGAI TIUNG KOTA BANJARBARU. *Jurnal Berkala Ilmiah Sains Dan Terapan Kimia*, *8*(2), Article 2. <https://doi.org/10.20527/jstk.v8i2.2140>
- Napitupulu, L. S., & Purwanti, I. F. (2022). Kajian Fitostabilisasi Limbah Hasil Tambang Tembaga (Tailing). *Jurnal Teknik ITS*, *11*(3), F99–F104. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v11i3.94358>
- Nuriadi, N., Napitupulu, M., & Rahman, N. (2013). Analisis Logam Tembaga (Cu) pada Buangan Limbah Tromol (Tailing) Pertambangan Poboya. *Jurnal Akademika Kimia*, *2*(2), 90–96. <https://www.neliti.com/id/publications/224107/>
- Paradise, M., & Nurkhamim, N. (2020). Penerapan Konsep Waste Hierarchy Pada Kegiatan Pengolahan Bijih Tembaga-Emas PT. Freeport Indonesia di Mimika Papua. *Prosiding Seminar Teknologi Kebumihan dan Kelautan (SEMITAN)*, *2*(1), 171–176. <https://doi.org/10.31284/j.semitan.2020.1066>
- Prasad, M. N. V. (2024). Mulberry (*Morus* spp.) for phytostabilization of coal mine overburden: Co-generation of economic products. In M. N. V. Prasad (Ed.), *Bioremediation and Bioeconomy (Second Edition)* (pp. 419–432). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-16120-9.00007-8>
- Puradyatmika, P., Prewitt, J. M., Fourie, A. B., & Tibbett, M. (2012). *Tailings reclamation trials at PT Freeport Indonesia in Mimika, Papua, Indonesia*. 173–186. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1208_17_Puradyatmika
- Pusdi Reklamatam IPB. (2021). *Pemantauan Kualitas Tanah di Areal Reklamasi Batu Hijau PT. Amman Mineral Nusa Tenggara, Nusa Tenggara Barat*. Pusat Studi Reklamasi Tambang IPB.
- Rahman, H. A., Akbar, M. F., & Pramudita, R. D. (2020). BIOEKSTRAKSI TEMBAGA DARI AIR ASAM TAMBANG DENGAN METODE PHYTOMINING MENGGUNAKAN TANAMAN EICHHORNIA CRASSIPES (MART.). *Prosiding Temu Profesi Tahunan PERHAPI*, *0*, Article 0. <https://www.prosiding.perhapi.or.id/index.php/prosiding/article/view/199>
- Roulia, M., & Vasilatos, C. (2023). Using Natural and Synthetic Zeolites for Mine Soils Clean-Up. *Materials Proceedings*, *15*(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/materproc2023015020>
- Saeni, M. S. (1989). *Kimia Lingkungan*. Pusat Penelitian Ilmu Hayati.
- Sefti, A., Nursanto, E., & Ernawati, R. (2024). Overview Pengelolaan Air Asam Tambang Dengan Menggunakan Zeolit. *Jurnal Mineral, Energi, dan Lingkungan*, *7*(2), Article 2. <https://doi.org/10.31315/jmel.v7i2.11316>
- Setiadi, Y., Salim, F., & Silmi, Y. (2014). Seleksi Adaptasi Jenis Tanaman pada Tanah Tercemar Minyak Bumi. *Jurnal Silvikultur Tropika*, *5*(3), 160–166.
- Siallagan, D., & Suwardi. (2003). Pengaruh Zeolit Terhadap Logam Berat dan Bahan Kimia Terlarut pada Air Tanah: Studi Kasus Areal Permukiman Darmaga Bogor Jawa Barat. *Jurnal Zeolit Indonesia*, *2*(1), 31–36.
- Sukandarrumidi. (2016). *Geologi Mineral Logam*. Gadjah Mada University Press. <https://ugmpress.ugm.ac.id/id/product/geologi/geologi-mineral-logam>
- Takam Tiamgne, X., Kalaba, F. K., & Nyirenda, V. R. (2021). Land use and cover change dynamics in Zambia's Solwezi copper mining district. *Scientific African*, *14*, e01007. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e01007>
- Tampubolon, O. F. R., Ismanto, A., Suryoputro, A. A. D., Muslim, M., & Indrayanti, E. (2021). Simulasi Pola Sebaran Logam Berat Tembaga (Cu) di Perairan Kota Pekalongan. *Indonesian Journal of Oceanography*, *3*(2), 174–188. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v3i2.11164>
- Tangviroon, P., Noto, K., Igarashi, T., Kawashima, T., Ito, M., Sato, T., Mufalo, W., Chirwa, M., Nyambe, I., Nakata, H., Nakayama, S., & Ishizuka, M. (2020). Immobilization of Lead and Zinc Leached from Mining Residual Materials in Kabwe, Zambia: Possibility of Chemical Immobilization by Dolomite, Calcined Dolomite, and Magnesium Oxide. *Minerals*, *10*(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/min10090763>

- Tsao, D. T. (2003). *Phytoremediation Advance in Biochemical Engineering Biotechnology*. Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-45991-X_1
- Vrînceanu, N. O., Motelică, D. M., Dumitru, M., Calciu, I., Tănase, V., & Preda, M. (2019). Assessment of using bentonite, dolomite, natural zeolite and manure for the immobilization of heavy metals in a contaminated soil: The Copșa Mică case study (Romania). *CATENA*, *176*, 336–342. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.01.015>
- Wilson-Corral, V., Anderson, C., Rodriguez-Lopez, M., Arenas-Vargas, M., & Lopez-Perez, J. (2011). Phytoextraction of gold and copper from mine tailings with *Helianthus annuus* L. and *Kalanchoe serrata* L. *Minerals Engineering*, *24*(13), 1488–1494. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.07.014>
- Zhao, P., Chen, J., Liu, T., Wang, Q., Wu, Z., & Liang, S. (2023). Heavy metal pollution and risk assessment of tailings in one low-grade copper sulfide mine. *Frontiers in Environmental Science*, *11*. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1132268>