

TEKNOLOGI REKLAMASI LAHAN BEKAS TAMBANG BATUBARA TERCEMAR AIR ASAM TAMBANG (AAT)

Reclamation Technology for Coal Post-Mining Land Contaminated by Acid Mine Drainage (AMD)

Suwardi^{1,2*}, Putri Oktariani^{1,2}, Aulya Putri¹, Sara Situmorang¹

¹Pusat Studi Reklamasi Tambang, Lembaga Riset Internasional Bidang Lingkungan dan Perubahan Iklim, Kampus IPB Baranangsiang, 16143

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

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

Received 05 Desember 2024, Revised 09 Desember 2024; Accepted 31 Januari 2025

Abstract

Indonesia, as a major coal producer and exporter, produced 775.2 million tons of coal in 2023, with mining activities concentrated in Kalimantan and Sumatera. Indonesia also holds 37.6 billion tons of coal reserves, ranking sixth globally. However, decades of coal extraction have led to severe environmental degradation, particularly through the formation of acid mine drainage (AMD). AMD is a highly acidic pollutant characterized by low pH and elevated concentrations of dissolved metals, formed when pyrite (FeS_2) and other sulfide minerals exposed during mining, oxidize upon contact with oxygen and water. This process significantly threatens water quality, soil health, and overall ecosystem integrity. To mitigate the environmental impacts of AMD, effective reclamation technologies are crucial. These include the application of ameliorants, the implementation of AMD management systems, and phytoremediation using hyperaccumulator plants. These methods aim to neutralize acidity, reduce metal concentrations, and restore ecosystem functions in coal post-mining land. The study applies a descriptive-analytical methodology to evaluate reclamation strategies implemented both in Indonesia and globally. The findings provide recommendations for effective and sustainable reclamation practices to mitigate AMD, rehabilitate degraded land, and ensure long-term environmental sustainability. Synthetic zeolite shows higher effectiveness in heavy metal adsorption, while natural zeolite is more cost-effective and sustainable. In managing AMD, the application of active and passive technologies combination should be adjusted to the specific characteristics of the site. Phytoremediation using hyperaccumulator plants has proven effective in reducing heavy metal contamination in both soil and water, by considering the type of contaminants and their absorption mediums.

Keywords: Acid mine drainage, Ameliorant, Coal Post-Mining Land, Phytoremediation, Reclamation.



PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara penghasil dan eksportir batubara terbesar di dunia. Produksi batubara domestik pada tahun 2023 tercatat mencapai 775,2 juta ton, dengan nilai ekspor sekitar 34,59 miliar USD (BPS, 2024). Selain itu, Indonesia memiliki cadangan batubara sebesar 37,6 miliar ton, menjadikannya negara dengan cadangan terbesar keenam di dunia, menyumbang 4% dari total cadangan global (ESDM, 2020). Di balik kontribusinya terhadap ekonomi nasional, aktivitas penambangan batubara membawa dampak negatif yang signifikan terhadap lingkungan. Aktivitas penambangan, baik dengan metode tambang terbuka maupun tambang bawah tanah, sering kali meninggalkan kerusakan lingkungan yang serius, termasuk degradasi lahan dan pembentukan air asam tambang.

Eksplorasi dan produksi batubara di Indonesia memiliki sejarah panjang sejak masa kolonial lebih dari 160 tahun lalu. Transformasi besar dalam industri batubara terjadi sejak tahun 1980-an, didukung oleh regulasi tahun 1967 yang mendorong masuknya investasi asing (Friederich & van Leeuwen, 2017). Saat ini, tambang batubara terkonsentrasi di Kalimantan dan Sumatera, dengan Kalimantan Timur sebagai penghasil terbesar hingga 50 juta ton per tahun, sementara Sumatera Selatan berperan penting untuk konsumsi domestik dengan cadangan signifikan.

Air asam tambang (AAT) atau *Acid mine drainage* (AMD) merupakan limbah pencemar lingkungan yang memiliki kandungan logam tinggi dan pH sangat rendah. AAT terbentuk melalui proses oksidasi mineral pirit (FeS_2) dan mineral sulfida lainnya yang tersingkap ke permukaan tanah selama proses penambangan. Mineral sulfida tersebut berinteraksi dengan oksigen dan air sebagai oksidator utama, menghasilkan produk oksidasi yang terlindi oleh air. Proses ini menghasilkan air dengan pH sangat rendah dan kandungan logam berat tinggi, yang mencemari tanah dan air di sekitarnya.

Guna mengatasi permasalahan AAT, diperlukan penerapan teknologi reklamasi yang efektif. Teknologi reklamasi berperan penting dalam memperbaiki kualitas lingkungan bekas tambang termasuk pengelolaan air asam tambang. Pendekatan seperti penggunaan bahan amelioran, penerapan sistem pengelolaan air asam tambang, serta melakukan fitoremediasi dengan tumbuhan hiperakumulator dapat menekan pembentukan AAT sekaligus mengurangi dampaknya terhadap lingkungan. Reklamasi tidak hanya bertujuan untuk memitigasi kerusakan lingkungan, tetapi juga memulihkan fungsi ekosistem untuk menjaga keberlanjutan aktivitas pertambangan dan kualitas lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi teknologi reklamasi yang paling efektif dalam mengurangi dampak AAT dan memulihkan kualitas lingkungan pada lahan bekas tambang batubara.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif analitis dengan pendekatan data sekunder untuk mengkaji pengelolaan air asam tambang melalui teknologi reklamasi. Data diperoleh dari berbagai sumber literatur, termasuk jurnal ilmiah, buku, dan publikasi teknis terkait teknologi reklamasi air asam tambang. Proses analisis dimulai dengan pengumpulan dan penyaringan data untuk memastikan relevansi dan validitas sumber, diikuti oleh deskripsi mekanisme pembentukan AAT yang mencakup reaksi kimia dan faktor lingkungan yang mempengaruhi proses tersebut. Selanjutnya, dilakukan evaluasi terhadap dampak AAT terhadap lingkungan, yang meliputi kerusakan pada tanah, air, dan ekosistem sekitar. Teknologi reklamasi yang telah diterapkan di Indonesia maupun negara lain dengan kondisi serupa dianalisis berdasarkan efektivitasnya dalam mengurangi AAT, efisiensi biaya implementasi, serta kontribusinya terhadap pemulihan lahan bekas tambang. Hasil analisis ini kemudian digunakan untuk merumuskan rekomendasi strategi reklamasi yang efektif, berkelanjutan, dan dapat diadaptasi pada lahan bekas tambang batubara di Indonesia.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Tanah Bekas Tambang Batubara

Tambang terbuka (*open pit mining*) merupakan metode yang umum digunakan dalam penambangan batubara di Indonesia karena memiliki beberapa keunggulan operasional. Metode ini memungkinkan waktu persiapan yang lebih singkat dibandingkan metode bawah tanah, sehingga mendukung pencapaian target produksi yang besar dalam waktu yang lebih cepat. Selain itu, metode ini mempermudah pengendalian aktivitas tambang karena seluruh proses dilakukan di permukaan, memungkinkan efisiensi dalam manajemen dan pengawasan, serta meningkatkan keselamatan kerja karena risiko seperti longsor tambang bawah tanah dapat dihindari (Melbaral & Yulhendra, 2023).

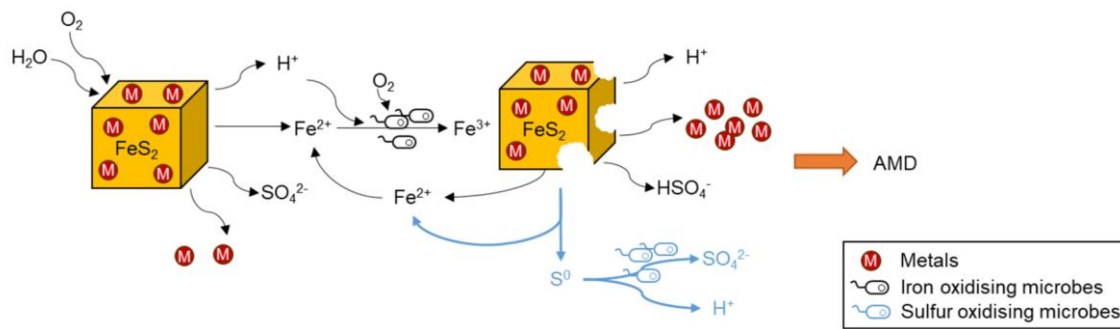
Tambang terbuka memang menguntungkan proses pertambangan batubara, namun membawa dampak negatif yang signifikan terhadap lingkungan. Proses tambang terbuka menyebabkan degradasi lahan akibat hilangnya lapisan tanah atas (*topsoil*), kerusakan struktur tanah akibat pemadatan, serta pencemaran tanah dan air akibat air asam tambang (AAT) yang bersifat toksik. Menurut Widyati (2006), lahan bekas batubara memiliki bobot isi tinggi, total pori rendah, kandungan nitrogen (N) dan fosfor (P) rendah, cadangan kalsium (Ca) dan magnesium (Mg) tinggi, dan populasi mikroba tanah rendah dibandingkan dengan tanah hutan di sekitarnya. Menurut penelitian Pramaditya (2023), tanah bekas tambang batubara memiliki pH rendah akibat tingginya konsentrasi aluminium (Al) dan besi (Fe) yang dihasilkan dari oksidasi mineral sulfida, seperti pirit (FeS_2).

Karakteristik Air Asam Tambang

Air asam tambang (AAT) umumnya terbentuk pada kegiatan pertambangan batubara sebab batubara mengandung senyawa sulfur, terutama dalam bentuk pirit (FeS_2). Ketika batubara terekspos ke udara dan air selama proses penambangan, pirit akan teroksidasi menghasilkan ion sulfat (SO_4^{2-}) yang kemudian membentuk asam sulfat (H_2SO_4), serta melepaskan ion-ion logam terlarut, termasuk besi (Fe), aluminium (Al), mangan (Mn), seng (Zn), dan tembaga (Cu) yang menyebabkan terbentuknya AAT sebagaimana disajikan pada Gambar 1. AAT ditandai oleh karakteristik pH yang sangat rendah, biasanya berkisar antara 2 hingga 5 yang menunjukkan tingkat keasaman tinggi (Sulistiyohadi *et al.*, 2020). Kandungan sulfat dan logam berat pada air asam tambang dapat mencapai konsentrasi tinggi, hingga ratusan ribuan mg/L sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Kisaran konsentrasi logam air asam tambang (Kokkinos *et al.*, 2024)

Parameter	Kisaran Konsentrasi (mg/L)
Al	40-150
Ca	170-590
Cd	0,2-12
Cu	0,5-50
Fe	70-400
Mg	35-220
Mn	3-65
Ni	0,2-3,5
Zn	1,9-359
SO ₄	1500-6600



Gambar 1 Skema sederhana pembentukan air asam tambang (AAT) (Newsome & Falagan, 2021)

Air asam tambang memberikan dampak negatif terhadap lingkungan, terutama pada ekosistem perairan dan tanah. Penurunan pH hingga tingkat yang sangat masam menyebabkan semakin meningkatnya kelarutan dan toksisitas logam berat yang dapat merusak ekosistem (Aanisa *et al.*, 2023). Kandungan logam berat yang tinggi pada tanah dapat menyebabkan terhambatnya aktivitas mikroorganisme tanah, penurunan kesuburan tanah, serta keracunan pada tanaman. Konsentrasi logam berat yang tinggi dalam air juga dapat menyebabkan kematian ikan, plankton, dan makhluk air lainnya. Dalam upaya mengurangi dampak negatif air asam tambang kepada lingkungan, pemerintah telah menetapkan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 113 Tahun 2003 yang mengatur baku mutu air limbah kegiatan penambangan batubara, mencakup pH air pada rentang 6-9, konsentrasi Fe maksimum 7 mg/l, Mn maksimum 4 mg/l, dan residu tersuspensi maksimum 400 mg/l. Implementasi baku mutu ini menuntut perusahaan tambang untuk mengelola air asam tambang secara efektif dan mengoptimalkan kegiatan reklamasi tambang. Hal ini dapat dilakukan melalui penerapan teknologi reklamasi, seperti penggunaan bahan amelioran, penerapan sistem pengelolaan air asam tambang, serta melakukan fitoremediasi dengan tumbuhan hiperakumulator. Dengan langkah-langkah tersebut, dampak negatif air asam tambang terhadap lingkungan diharapkan dapat diminimalkan, sekaligus mendukung keberlanjutan ekosistem di kawasan tambang dan sekitarnya.

Teknologi reklamasi

Bahan amelioran

Amelioran atau pembenah tanah merupakan bahan organik maupun anorganik yang mampu meningkatkan kesuburan tanah melalui perbaikan sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Umumnya bahan amelioran yang digunakan pada lahan bekas tambang batubara merupakan bahan bersifat alkalin, sebab lahan bekas tambang batubara bersifat masam hingga sangat masam akibat paparan air asam tambang. Salah satu bahan amelioran yang sangat baik untuk digunakan dalam proses reklamasi tambang batubara adalah zeolit. Zeolit merupakan mineral aluminosilikat yang memiliki kapasitas tukar kation (KTK) sangat tinggi. Zeolit dengan KTK yang tinggi mampu menjerap unsur hara di dalam tanah dan melepaskannya secara perlahan (*slow release*). Mekanisme ini memungkinkan penyerapan hara oleh tanaman berlangsung lebih efisien, sehingga mendukung pertumbuhan dan produktivitas tanaman secara optimal (Nainggolan *et al.*, 2009). Menurut penelitian Nursanti & Kemala, (2019), aplikasi zeolit sebanyak 200 gram per 10 kg tanah pasca tambang batubara, atau setara dengan 20 ton per hektar, yang diinkubasi selama delapan minggu dapat meningkatkan pH tanah, kandungan N-total, K-dd, P tersedia, serta KTK tanah.

Zeolit juga dapat digunakan sebagai penjerap unsur atau senyawa yang tidak diinginkan seperti logam berat yang banyak ditemukan pada lahan bekas tambang. Zeolit alami berpotensi sebagai material alternatif yang hemat biaya untuk mengelola air asam tambang melalui penyerapan logam berat (Motsi *et al.*, 2009). Menurut penelitian Roulia & Vasilatos (2023), zeolit dapat meningkatkan pH tanah bekas tambang yang sangat masam akibat paparan air asam tambang serta mengurangi perlindungan logam berat.

Sebagaimana disajikan pada Tabel 2, zeolit sintetis Na-P1 lebih efektif dalam mencegah pelepasan logam berat dibandingkan zeolit alami, dengan efisiensi mencapai 38% untuk Pb, 72% untuk Cd, 61% untuk Zn, 67% untuk Cu, 77% untuk Mn, dan 33% untuk Fe. Efektivitas ini menunjukkan bahwa zeolit dapat mengikat ion logam berat dengan baik, sehingga mampu mengurangi risiko pencemaran lingkungan dan meningkatkan kualitas tanah pada lahan bekas tambang.

Tabel 2 Konsentrasi (ppm) logam berat dalam lindi tanah bekas tambang dan yang telah diberi zeolit

Logam	Konsentrasi (ppm)			
	Zeolit sintetis - Na-P1 (ZML)	Zeolit alam - mordenite (MSA)	Zeolit alam - clinoptilolite (CSA)	Tanah bekas tambang
Pb	0,51	0,74	0,75	0,81
Cd	0,20	0,55	0,40	0,72
Zn	91	201	165	230
Cu	0,05	0,09	0,05	0,15
Mn	7	15	10	30
Fe	2	3	3	3

Sumber : Roulia & Vasilatos (2023)

Secara geologi Indonesia berpotensi besar menghasilkan zeolit dengan sumberdaya mencapai 447.490.160 ton (Kusdarto, 2008). Pemanfaatan zeolit alami dapat menjadi solusi yang lebih berkelanjutan dan terjangkau bagi industri pertambangan dalam upaya reklamasi lahan bekas tambang. Selain itu, penggunaan zeolit alami dapat mengurangi ketergantungan pada bahan kimia tambahan, sehingga lebih ramah lingkungan dan sesuai dengan prinsip pertambangan berkelanjutan. Berdasarkan berbagai penelitian, penggunaan zeolit sebagai bahan amelioran dalam reklamasi dan pengelolaan air asam tambang menunjukkan bahwa zeolit sintetis lebih efektif dibandingkan zeolit alami. Namun, dari segi efisiensi, zeolit alami lebih ekonomis sebab tidak memerlukan tambahan bahan kimia secara terus-menerus (Sefti *et al.*, 2024).

Sistem pengelolaan air asam tambang

Pengolahan air asam tambang secara umum dapat dilakukan melalui dua pendekatan utama, yaitu teknologi pengolahan aktif dan teknologi pengolahan pasif. Teknologi pengolahan aktif dilakukan dengan menggunakan bahan kimia atau peralatan mekanis untuk menetralkan keasaman dan menghilangkan logam berat. Proses ini mencakup penambahan bahan kimia alkali seperti CaCO_3 , Ca(OH)_2 , CaO , NaOH , Na_2CO_3 , NH_3 atau aerasi untuk mengoksidasi logam. Teknologi pengelolaan aktif membutuhkan pemantauan dan pemeliharaan jangka panjang sehingga memerlukan biaya yang relatif tinggi. Sebaliknya, teknologi pengolahan pasif mengandalkan proses alami atau rekayasa lingkungan untuk mengurangi dampak air asam tambang. Contoh metode ini meliputi penggunaan lahan basah buatan, kolam sedimentasi, atau bahan organik yang berfungsi menurunkan keasaman dan mengendapkan logam berat. Meskipun hasilnya cenderung lebih lambat, teknologi pasif lebih ekonomis dan berkelanjutan dalam jangka panjang karena memanfaatkan proses biologis dan geokimia alami. Pemilihan teknologi pengolahan yang tepat sangat bergantung pada karakteristik air asam tambang dan kondisi spesifik lokasi tambang.

Pemilihan teknologi yang tepat sangat bergantung pada karakteristik air asam tambang serta kondisi spesifik lokasi tambang. Berdasarkan hasil penelitian Skousen *et al.*, (2019), efisiensi netralisasi logam berat pada air asam tambang beragam mulai dari 30% hingga 100%, sebagaimana disajikan pada Tabel 3. Setiap sumber air asam tambang memiliki karakteristik yang berbeda dan memerlukan penanganan khusus di tiap lokasi tambang. Oleh karena itu, sumber AAT perlu diuji terlebih dahulu

melalui analisis yang komprehensif untuk menentukan bahan kimia yang paling efektif dalam proses pengendapan logam berat. Biaya penanganan AAT sangat dipengaruhi oleh efisiensi proses netralisasi, termasuk penggunaan bahan kimia dan pemeliharaan sistem pengolahan, yang semuanya harus dievaluasi secara cermat untuk memastikan implementasi sistem yang efisien dan ekonomis.

Tabel 3 Efisiensi netralisasi logam berat pada air asam tambang

Nama Umum	Rumus Kimia	Efisiensi Netralisasi
Batu kapur	CaCO ₃	30%
Kapur tohor	Ca(OH) ₂	90%
Batu kapur tohor/Kapur bakar	CaO	90%
Abu soda	Na ₂ CO ₃	60%
Soda kaustik	NaOH	100%
Larutan soda kaustik 20%	NaOH	100%
Larutan soda kaustik 50%	NaOH	100%
Amonia	NH ₃	100%

Sumber: Skousen *et al.*, (2019)

Fitoremediasi

Selain penggunaan bahan amelioran dalam reklamasi tambang, fitoremediasi juga dapat dimanfaatkan dalam mengatasi masalah pencemaran logam berat pada lahan bekas tambang batubara akibat air asam tambang. Fitoremediasi merupakan upaya penurunan tingkat toksisitas pada tanah dan air menggunakan tanaman hiperakumulator melalui penghancuran, inaktivasi atau imobilisasi logam berat menjadi bentuk yang tidak berbahaya. Teknologi fitoremediasi melibatkan melibatkan beberapa proses seperti fitostabilisasi, rhizodegradasi, fitoekstraksi, fitodegradasi, fitoakumulasi dan fitovolatilisasi. Tanaman hiperakumulator memiliki potensi untuk dimanfaatkan dalam proses fitoremediasi karena kemampuannya mengakumulasi zat kontaminan dengan konsentrasi tinggi pada bagian akar, batang, dan daun. Karakteristik utama tanaman hiperakumulator yaitu, tahan terhadap unsur logam dalam konsentrasi tinggi yang terdapat pada jaringan akar dan tajuk, memiliki laju penyerapan unsur logam yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanaman lain, serta mampu mentranslokasi dan mengakumulasi unsur logam dari akar ke tajuk dengan laju yang tinggi (Hidayati, 2005).

Berbagai jenis tanaman hiperakumulator memiliki kemampuan untuk mengakumulasi logam berat dari tanah atau air dalam jumlah signifikan. Tanaman-tanaman tersebut telah di uji dalam berbagai penelitian untuk mengevaluasi efektivitas spesifiknya dalam menyerap jenis logam tertentu (Tabel 4). Untuk kontaminasi tanah, tanaman seperti *Amaranthus spp.*, *Noccaea caerulescens*, *Tithonia diversifolia*, dan *Alyssum bertolonii* efektif menyerap seng (Zn), sementara *Potamogeton crispus L.*, *Spergularia rubra*, dan *Brassica juncea* efektif menyerap kadmium (Cd). Kontaminasi timbal (Pb) dapat diatasi dengan *Solanum nigrum* dan *Brassica juncea*, sedangkan kobalt (Co) dapat diserap oleh *Alyssum murale* dan *Alyssum bertolonii*. Tumbuhan seperti *Euphorbia macroclada*, *Jatropha curcas*, dan *Amaranthus spp.* efektif mengatasi tembaga (Cu). Untuk Mangan (Mn) dapat diserap oleh *Cynodon dactylon* dan *Phytolacca americana*. Untuk nikel (Ni) dapat diserap oleh tanaman seperti *Alyssum lesbiacum*, *Noccaea caerulescens*, dan *Streptanthus polygaloides*, sedangkan sesium (Cs) dapat diatasi dengan *Salix spp.* dan *Amaranthus spp.*. Selain itu, *Pteris vittata* (paku arsenik) dikenal sebagai hiperakumulator arsen (As). *Stanleya pinnata* dan *Astragalus spp.* sangat baik dalam menyerap selenium (Se). Serta tanaman *Avicennia alba* dapat menyerap merkuri (Hg) dari tanah.

Tabel 4 Daftar jenis tumbuhan hiperakumulator untuk fitoremediasi

Jenis Kontaminan	Jenis Tumbuhan	Sumber Literatur
Zn (seng)	<i>Amaranthus</i> spp., <i>Noccaea caerulescens</i> , <i>Tithonia diversifolia</i> (tithonia), <i>Alyssum bertolonii</i>	(Jacobs <i>et al.</i> , 2018; Ogunremi <i>et al.</i> , 2024; Robinson <i>et al.</i> , 1997; Zhou <i>et al.</i> , 2024)
Cd (kadmium)	<i>Potamogeton crispus</i> L., <i>Spergularia rubra</i> , <i>Brassica juncea</i>	(Cheng <i>et al.</i> , 2024; Małecka <i>et al.</i> , 2019; Medina-Díaz <i>et al.</i> , 2024)
Pb (timbal)	<i>Solanum nigrum</i> , <i>Brassica juncea</i>	(Bortoloti & Baron, 2022; Yu <i>et al.</i> , 2015)
Co (kobalt)	<i>Alyssum murale</i> , <i>Alyssum bertolonii</i>	(Konakci <i>et al.</i> , 2023; Malik <i>et al.</i> , 2000; Robinson <i>et al.</i> , 1997)
Cu (tembaga)	<i>Eichhornia crassipes</i> (eceng gondok), <i>Euphorbia macroclada</i> , <i>Jatropha curcas</i> (jarak pagar), <i>Amaranthus</i> spp., <i>Pistia stratiotes</i>	(Chang <i>et al.</i> , 2014; Chehregani <i>et al.</i> , 2009; Dorsey <i>et al.</i> , 2013; Goswami & Das, 2018; VZ Novita <i>et al.</i> , 2019; Zhou <i>et al.</i> , 2024)
Mn (mangan)	<i>Cynodon dactylon</i> , <i>Phytolacca americana</i>	(DeGroot <i>et al.</i> , 2017; Song <i>et al.</i> , 2022)
Ni (nikel)	<i>Alyssum lesbiacum</i> , <i>Noccaea caerulescens</i> , <i>Streptanthus polygaloides</i>	(Robinson <i>et al.</i> , 1997)
Cs (sesium)	<i>Salix</i> spp. (pohon willow), <i>Amaranthus</i> spp.	(Cao <i>et al.</i> , 2022; Lasat <i>et al.</i> , 1998)
As (arsen)	<i>Pteris vittata</i> (paku arsenik)	(Yan <i>et al.</i> , 2019)
Se (selenium)	<i>Stanleya pinnata</i> , <i>Astragalus</i> spp.	(Bhat <i>et al.</i> , 2022; Parker <i>et al.</i> , 2003)
Fe (besi)	<i>Spinacia oleracea</i> (bayam), <i>Eichhornia crassipes</i> (eceng gondok), <i>Echinodorus palaefolius</i> (melati air), <i>Eleocharis dulcis</i> (purun tikus)	(Hasani <i>et al.</i> , 2021; Irshad <i>et al.</i> , 2024; Juswardi <i>et al.</i> , 2023; Sari <i>et al.</i> , 2019)
Hg (merkuri)	<i>Avicennia alba</i> , <i>Eichhornia crassipes</i> (eceng gondok)	(Odjegba & Fasidi, 2007; Qonita <i>et al.</i> , 2021)

Untuk mengatasi kontaminasi pada air, *Eichhornia crassipes* (eceng gondok) merupakan tanaman yang efektif dalam menyerap berbagai logam berat, termasuk tembaga (Cu), besi (Fe), dan merkuri (Hg). Selain itu, *Echinodorus palaefolius* (melati air) dan *Eleocharis dulcis* (purun tikus) juga dapat dimanfaatkan untuk mengatasi kontaminasi besi dalam air. Serta *Pistia stratiotes* dapat digunakan untuk mengatasi kontaminasi tembaga (Cu) dan Mangan (Mn) pada air asam tambang. Selain mengatasi permasalahan logam berat, tanaman air seperti *Ipomea aquatica* (kangkung) juga mampu meningkatkan pH air asam tambang hingga 53% (Herniwanti, 2013). Penggunaan tumbuhan akuatik untuk fitoremediasi pada area terkontaminasi yang luas merupakan metode yang efektif dan menguntungkan, karena tanaman akuatik tumbuh dengan cepat dan memiliki biomassa yang besar, memungkinkan mereka untuk mengakumulasi logam berat dalam jumlah signifikan. Pemilihan tanaman yang tepat, berdasarkan jenis kontaminan dan media penyerapannya, sangat penting untuk memastikan keberhasilan fitoremediasi sebagai solusi ramah lingkungan dalam mengatasi pencemaran logam berat.

KESIMPULAN

Penambangan batubara di Indonesia, khususnya dengan metode tambang terbuka, memberikan dampak signifikan terhadap lingkungan, terutama melalui pembentukan air asam tambang (AAT) yang

merusak kualitas tanah dan air. Teknologi reklamasi yang efektif dan efisien sangat diperlukan untuk mengatasi dampak negatif akibat pencemaran AAT, merehabilitasi lahan terdegradasi, serta memastikan keberlanjutan lingkungan. Penggunaan bahan amelioran seperti zeolit, penerapan sistem pengelolaan AAT, serta melakukan fitoremediasi dengan tumbuhan hiperakumulator terbukti efektif dalam memperbaiki kualitas tanah dan air pada lahan bekas tambang batubara serta mengurangi pencemaran logam berat. Zeolit sintesis menunjukkan efektivitas yang lebih tinggi dalam penyerapan logam berat, sementara zeolit alami lebih ekonomis dan berkelanjutan. Dalam pengelolaan AAT, penerapan kombinasi teknologi aktif dan pasif perlu disesuaikan dengan karakteristik spesifik lokasi. Fitoremediasi dengan tanaman hiperakumulator dapat efektif dalam mengatasi pencemaran logam berat, baik di tanah maupun air, dengan mempertimbangkan jenis kontaminan dan media penyerapannya.

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.
- Bhat, S. A., Bashir, O., Ul Haq, S. A., 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>.
- Bortoloti, G. A., & Baron, D. (2022). Phytoremediation of toxic heavy metals by *Brassica* plants: A biochemical and physiological approach. *Environmental Advances*, 8, 100204. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100204>.
- BPS. (2024). *Ekspor Batu Bara Menurut Negara Tujuan Utama, 2012-2023—Tabel Statistik—Badan Pusat Statistik Indonesia*. <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/1/MTAzNCMx/ekspor-batu-bara-menurut-negara-tujuan-utama--2012-2022.html>.
- Cao, Y., Tan, Q., Zhang, F., Ma, C., Xiao, J., & Chen, G. (2022). Phytoremediation potential evaluation of multiple *Salix* clones for heavy metals (Cd, Zn and Pb) in flooded soils. *Science of The Total Environment*, 813, 152482. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152482>.
- Chang, F.-C., Ko, C.-H., Tsai, M.-J., Wang, Y.-N., & Chung, C.-Y. (2014). Phytoremediation of heavy metal contaminated soil by *Jatropha curcas*. *Ecotoxicology (London, England)*, 23(10), 1969–1978. <https://doi.org/10.1007/s10646-014-1343-2>.
- Chehregani, A., Mohsenzade, F., & Vaezi, F. (2009). Introducing a new metal accumulator plant and the evaluation of its ability in removing heavy metals. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 91(6), 1105–1114. <https://doi.org/10.1080/02772240802541403>.
- Cheng, Y., Yuan, J., Wang, G., Hu, Z., Luo, W., Zhao, X., Guo, Y., Ji, X., Hu, W., & Li, M. (2024). Phosphate-solubilizing bacteria improve the antioxidant enzyme activity of *Potamogeton crispus* L. and enhance the remediation effect on Cd-contaminated sediment. *Journal of Hazardous Materials*, 470, 134305. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134305>.
- DeGroot, K., Mccartha, G., & Pollard, A. (2017). Interactions of the manganese hyperaccumulator *Phytolacca americana* L. with soil pH and phosphate. *Ecological Research*, 33. <https://doi.org/10.1007/s11284-017-1547-z>.
- Dorsey, B. L., Haeverymans, T., Aubriot, X., Morawetz, J. J., Riina, R., Steinmann, V. W., & Berry, P. E. (2013). Phylogenetics, morphological evolution, and classification of *Euphorbia* subgenus *Euphorbia*. *TAXON*, 62(2), 291–315. <https://doi.org/10.12705/622.1>.
- ESDM. (2020). *Kementerian ESDM RI - Booklet Batubara Indonesia*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. <https://www.esdm.go.id/id/booklet/booklet-tambang-batubara-2020>.
- Friederich, M. C., & van Leeuwen, T. (2017). A review of the history of coal exploration, discovery and production in Indonesia: The interplay of legal framework, coal geology and exploration strategy. *International Journal of Coal Geology*, 178, 56–73. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2017.04.007>.
- Goswami, S., & Das, S. (2018). *Eichhornia crassipes* mediated copper phytoremediation and its success using catfish bioassay. *Chemosphere*, 210, 440–448. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.07.044>.

- Hasani, Q., TM Pratiwi, N., Wardiatno, Y., Effendi, H., Nugraha, A., Pirdaus, P., & Wagiran, W. (2021). Phytoremediation of iron in ex-sand mining waters by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 22. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d220238>.
- Herniwanti, H. (2013). *Water Plants Characteristic for Phytoremediation of Acid Mine Drainage Passive Treatment*. 2227–2720.
- 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).
- Irshad, M. K., Lee, J. C., Aqeel, M., Javed, W., Noman, A., Lam, S. S., Naggat, A. E., Niazi, N. K., Lee, H. H., Ibrahim, M., & Lee, S. S. (2024). Efficacy of Fe-Mg-bimetallic biochar in stabilization of multiple heavy metals-contaminated soil and attenuation of toxicity in spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Chemosphere*, 364, 143184. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143184>.
- Jacobs, A., De Brabandere, L., Drouet, T., Sterckeman, T., & Noret, N. (2018). Phytoextraction of Cd and Zn with *Noccaea caerulea* for urban soil remediation: Influence of nitrogen fertilization and planting density. *Ecological Engineering*, 116, 178–187. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.03.007>.
- Juswardi, J., Aulia, H., Tanzerina, N., Junaidi, E., & Wardana, S. (2023). Effectiveness of Waterchestnut (*Eleocharis dulcis* (Burm.f.) Trin. Ex Henschel) in Phytoremediation of Coal Mine Acid Drainage in Constructed Wetlands. 8, 1768.
- Kokkinos, E., Kotsali, V., Tzamos, E., & Zouboulis, A. (2024). Acid Mine Drainage Neutralization by Ultrabasic Rocks: A Chromite Mining Tailings Evaluation Case Study. *Sustainability*, 16(20), Article 20. <https://doi.org/10.3390/su16208967>.
- Konakci, N., Kislioglu, M. S., & Sasmaz, A. (2023). Ni, Cr and Co Phytoremediations by *Alyssum murale* Grown in the Serpentine Soils Around Guleman Cr Deposits, Elazig Turkey. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 110(6), 97. <https://doi.org/10.1007/s00128-023-03736-2>.
- Kusdarto, K. (2008). Potency of zeolite in indonesia. *Jurnal Zeolit Indonesia*, 7(2), 78–87.
- Lasat, M. M., Fuhrmann, M., Ebbs, S. D., Cornish, J. E., & Kochian, L. V. (1998). Phytoremediation of a Radiocesium-Contaminated Soil: Evaluation of Cesium-137 Bioaccumulation in the Shoots of Three Plant Species. *Journal of Environmental Quality*, 27(1), 165–169. <https://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700010023x>.
- Małacka, A., Konkolewska, A., Hanć, A., Barańkiewicz, D., Ciszewska, L., Ratajczak, E., Staszak, A. M., Kmita, H., & Jarmuszkiewicz, W. (2019). Insight into the Phytoremediation Capability of *Brassica juncea* (v. Malopolska): Metal Accumulation and Antioxidant Enzyme Activity. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(18), 4355. <https://doi.org/10.3390/ijms20184355>.
- Malik, M., Chaney, R. L., Brewer, E. P., Li, Y.-M., & Angle, J. S. (2000). Phytoextraction of Soil Cobalt Using Hyperaccumulator Plants. *International Journal of Phytoremediation*, 2(4), 319–329. <https://doi.org/10.1080/15226510008500041>.
- Medina-Díaz, H. L., López-Bellido, F. J., Alonso-Azcárate, J., Fernández-Morales, F. J., & Rodríguez, L. (2024). A new hyperaccumulator plant (*Spergularia rubra*) for the decontamination of mine tailings through electrokinetic-assisted phytoextraction. *Science of The Total Environment*, 912, 169543. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169543>.
- Melbaral, A., & Yulhendra, D. (2023). Estimasi Cadangan Batubara PT. Pancaran Surya Abadi, Kecamatan Muara Badak-Anggana, Kabupaten Kutai Kartanegara, Provinsi Kalimantan Timur. *Jurnal Bina Tambang*, 8(1). <https://ejournal.unp.ac.id/index.php/mining/article/view/122190/0>
- Motsi, T., Rowson, N. A., & Simmons, M. J. H. (2009). Adsorption of heavy metals from acid mine drainage by natural zeolite. *International Journal of Mineral Processing*, 92(1), 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.02.005>.
- Nainggolan, G., Suwardi, S., & Darmawan, D. (2009). Pola pelepasan nitrogen dari pupuk tersedia lambat (*slow release fertilizer*) urea-zeolit-asam humat. *Jurnal Zeolit Indonesia*. 8(2), 89-96.
- Newsome, L., & Falagan, C. (2021). The microbiology of metal mine waste: bioremediation applications and implications for planetary health. *GeoHealth*, 5. <https://doi.org/10.1029/2020GH000380>.
- Nursanti, I., & Kemala, N. (2019). Peranan Zeolit dalam Peningkatan Kesuburan Tanah Pasca Penambangan. *Jurnal Media Pertanian*, 4, 88. <https://doi.org/10.33087/jagro.v4i2.84>

- Odjegba, V. J., & Fasidi, I. O. (2007). Phytoremediation of heavy metals by *Eichhornia crassipes*. *The Environmentalist*, 27(3), 349–355. <https://doi.org/10.1007/s10669-007-9047-2>.
- Ogunremi, O., Amubieya, O., Ogunkunle, C., & Fatoba, P. (2024). *Efficacy of biochar on the phytoremediation potential of Tithonia diversifolia on spent oil-contaminated soil*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4629528/v1>.
- Parker, D. R., Feist, L. J., Varvel, T. W., Thomason, D. N., & Zhang, Y. (2003). Selenium phytoremediation potential of *Stanleya pinnata*. *Plant and Soil*, 249(1), 157–165. <https://doi.org/10.1023/A:1022545629940>.
- Pramaditya, D. A. (2023). Karakterisasi Sifat Fisik Dan Kimia Tanah Pada Lahan Bekas Tambang Batubara Yang Telah Direklamasi. *Jurnal Mineral, Energi, dan Lingkungan*, 6(2), Article 2. <https://doi.org/10.31315/jmel.v6i2.8022>.
- Qonita, A. Z., Titah, H. S., & Luthtansa, U. M. (2021). Phytoremediation dynamic model of heavy metal mercury (Hg) in mangrove (*Avicennia alba*) at Wonorejo River Estuary. *Malaysian Journal of Biochemistry and Molecular Biology*, 24, 1–9.
- Robinson, B. H., Chiarucci, A., Brooks, R. R., Petit, D., Kirkman, J. H., Gregg, P. E. H., & De Dominicis, V. (1997). The nickel hyperaccumulator plant *Alyssum bertolonii* as a potential agent for phytoremediation and phytomining of nickel. *Journal of Geochemical Exploration*, 59(2), 75–86. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(97\)00010-1](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(97)00010-1).
- 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>.
- Sari, M. O. S. K., Hastuti, E., & Darmanti, S. (2019). Potential of Water Jasmine (*Echinodorus palaefolius*) In Phytoremediation of Fe in Leachate Jatibarang Landfill. *Bioremediation Journal*, 7, 55–61. <https://doi.org/10.15294/biosaintifika.v11i1.17447>.
- 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>.
- Skousen, J. G., Ziemkiewicz, P. F., & McDonald, L. M. (2019). Acid mine drainage formation, control and treatment: Approaches and strategies. *The Extractive Industries and Society*, 6(1), 241–249. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.09.008>.
- Song, X., Li, C., & Chen, W. (2022). Phytoremediation potential of Bermuda grass (*Cynodon dactylon* (L.) pers.) in soils co-contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons and cadmium. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 234, 113389. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113389>.
- Sulistiyohadi, Y., Garniwa, I., Moersidik, S., & Aziz, M. (2020). Acid mine drainage: Why don't we look at it as energy? *AIP Conference Proceedings*, 2223(1), 050002. <https://doi.org/10.1063/5.0000911>.
- VZ Novita, SS Moersidik, & CR Priadi. (2019). *Phytoremediation Potential of Pistia stratiotes to Reduce High Concentration of Copper (Cu) in Acid Mine Drainage—IOPscience*. *Sci. 355 012063*. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/355/1/012063>.
- Widyati, E. (2006). *Bioremediasi tanah bekas tambang batubara dengan sludge industri kertas untuk memacu revegetasi lahan*. <http://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/46957>.
- Yan, H., Gao, Y., Wu, L., Wang, L., Zhang, T., Dai, C., Xu, W., Feng, L., Ma, M., Zhu, Y.-G., & He, Z. (2019). Potential use of the *Pteris vittata* arsenic hyperaccumulation-regulation network for phytoremediation. *Journal of Hazardous Materials*, 368, 386–396. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.01.072>.
- Yu, C., Peng, X., Yan, H., Li, X., Zhou, Z., & Yan, T. (2015). Phytoremediation Ability of *Solanum nigrum* L. to Cd-Contaminated Soils with High Levels of Cu, Zn, and Pb. *Water, Air, & Soil Pollution*, 226(5), 157. <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2424-4>.
- Zhou, Y., Lan, W., Yang, F., Zhou, Q., Liu, M., Li, J., Yang, H., & Xiao, Y. (2024). Invasive *Amaranthus* spp. for heavy metal phytoremediation: Investigations of cadmium and lead accumulation and soil microbial community in three zinc mining areas. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 285, 117040. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117040>.