

Studi literatur: Efektivitas Fitoremediasi Menggunakan Tanaman Lokal dalam Menyerap Logam Berat Tembaga (Cu) dan Besi (Fe) di Lahan Bekas Tambang Batu Bara

Dina Hayati Putri¹, Alyssa Amanda Utama¹, Alya Nindityas Utami^{1*}, Dewi Rahmawati¹

¹ Prodi Ilmu Lingkungan Universitas Mulawarman, Jl Barong Tongkok. Gn Kelua, Kec. Samarinda Ulu, Kota Samarinda, Kalimantan Timur 75242, (email: alyanindityas@fmipa.unmul.ac.id)

ABSTRACT

Mining activities in Indonesia are a sector that contributes to productive economic needs. According to data from the Ministry of Energy and Mineral Resources (ESDM), as of the end of 2024, total national coal reserves were 36.28 billion tons. Despite its economic contribution, mining activities cause environmental pollution, particularly acid mine drainage containing heavy metals such as iron (Fe) and copper (Cu). Phytoremediation is an environmentally friendly solution that utilizes plants capable of absorbing these metals. This article is a literature study obtained from journals, books, and related websites using the literature review method. The literature sources were obtained from the Google Scholar database and the Harzing's Publish or Perish application with several keywords such as (1) phytoremediation, (2) heavy metals copper (Cu) and iron (Fe), (3) phytoremediation with local plants, and (4) phytoremediation in ex-mining ponds. Various studies have shown that local plant phytoremediation plants such as croton cultivars (*Codiaeum variegatum*), cat's tail (*Typha angustifolia*), water lettuce (*Pistia stratiotes* (L.)), kiambang (*Salvinia molesta* Mitchell), mouse purun (*Eleocharis dulcis*), fragrant root (*Chryzophogon zizanioides* (L.)), gumitir (*Tagetes erecta* L.), spear leaf (*Sagittaria lancifolia*), and water rose (*Echinodorus palaefolis*). The highest effectiveness of iron (Fe) metal absorption was obtained by kiambang (*Salvinia molesta*) and apu wood (*Pistia stratiotes*) plants with an efficiency of more than 90%, and the highest absorption of copper (Cu) metal levels was obtained by *Chryzophogon zizanioides* (84%). These plants grow quite a lot in Indonesia so that their use is utilized to reduce heavy metals, although some experience stress due to metal accumulation. Therefore, an integrated approach is needed to optimize phytoremediation on land. post-mining.

Keywords: Phytoremediation, heavy metals, iron (Fe), copper (Cu)

This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Article History

Received 2025-05-09

Revised 2025-08-28

Accepted 2026-02-11

Keywords

Phytoremediation

Heavy metals

Iron (Fe)

Copper (Cu)

Pendahuluan

Kegiatan pertambangan di Indonesia menjadi sektor yang berkontribusi untuk kebutuhan ekonomi yang produktif. Berdasarkan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) per akhir 2024 total cadangan batu bara secara nasional sebesar 36,28 miliar ton. Banyaknya potensi sumber daya batu bara tersebut sejalan dengan dampak yang dihasilkan oleh pertambangan. Dampak tersebut dapat memberikan hasil yang positif yakni kemajuan ekonomi yang bergantung pada sektor pertambangan, tetapi juga memberikan dampak negatif yang tidak bisa dihindari terutama lingkungan hidup, yakni meningkatnya pencemaran air maupun tanah. Pencemaran tersebut terjadi karena aktivitas pertambangan tidak menerapkan pemanfaatan kembali sehingga meninggalkan lubang-lubang bekas tambang [1].

Dampak yang ditimbulkan dari lubang-lubang bekas tambang adalah pencemaran air yang ada pada kolam-kolam pasca tambang, umumnya kolam tersebut mengandung logam berat beracun dengan massa jenis lebih dari 5 g/cm³. Beberapa logam berat yang ada pada lahan bekas tambang berasal dari material yang mengandung Besi (Fe) dan Tembaga (Cu) [2] dalam penelitiannya menjelaskan Penambangan dengan metode open mining mengakibatkan hilangnya lapisan tanah atas beserta bahan organik. Kondisi ini membuat lapisan batuan yang mengandung sulfur terbuka sehingga terjadi oksidasi mineral sulfida mengubah sifat

kimia secara signifikan, ditandai dengan penurunan pH air (<4,5) serta meningkatnya konsentrasi logam terlarut seperti Al, Fe, Mn, Cd, Cu, Sn, Zn, As, dan Hg, yang pada kadar tertentu dapat membahayakan lingkungan. [3] juga menambahkan bahwa dampak air asam tambang meliputi penurunan kesuburan tanah dan potensi gangguan kesehatan bagi masyarakat sekitar. Beberapa logam berat tersebut seperti (Fe) dan tembaga (Cu) terjadi ketika lapisan batuan yang mengandung sulfida (FeS_2 , CuFeS_2) terbuka akibat open mining, mineral tersebut bereaksi dengan oksigen dan air, membentuk asam sulfat (H_2SO_4) dan melepaskan ion logam terlarut. Sehingga tingginya konsentrasi logam berat tersebut dapat mengurangi kesuburan tanah, mengganggu kesehatan masyarakat sekitar yakni endapan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ dapat menyelimuti dasar sungai, menurunkan kualitas habitat ikan, sehingga mengurangi sumber protein masyarakat.

bahwa Logam berat (Fe) bermanfaat pada kadar rendah bagi fungsi biota tanah, namun pada konsentrasi tinggi dapat bersifat racun. Keberadaan logam berat dapat mengubah atau menurunkan kualitas tanah, menjadikannya kurang subur, dan berpotensi beracun bagi tanaman, yang pada akhirnya memengaruhi keberlanjutan kualitas tanah dalam proses reklamasi lahan bekas tambang. Kemudian, oleh [4] dalam penelitiannya bahwa keberadaan tembaga (Cu) dikhawatirkan masuk kedalam perairan kolam bekas tambang. Kemudian, limbah pertambangan berupa tailing yang dibuang ke dataran atau badan air dapat menyebarkan Cu di lingkungan, terutama di wilayah tropis di mana pelapukan kimiawi dan aktivitas biokimia mempercepat mobilisasi unsur beracun ini. Sifat Cu yang berbahaya bagi manusia, hewan, tanaman, dan ekosistem, ditambah dengan keragaman bentuk serta kandungannya yang menyulitkan pengolahan limbah, menjadikan fitoremediasi sebagai metode penting untuk mengendalikan pencemaran

Logam berat tersebut menjadi unsur penyebab pembentukan air asam tambang melalui proses oksidasi mineral yang mengandung unsur besi dan sulfur sehingga bereaksi dengan oksigen dan air. Reaksi ini menghasilkan air dengan tingkat keasaman tinggi (pH antara 2 hingga 4), yang dapat menurunkan kualitas air permukaan [5]

Salah satu metode yang ramah lingkungan dan efektif dalam memperbaiki kontaminan tanah, dan air permukaan dengan memanfaatkan tanaman yang memiliki kemampuan menyerap, mengakumulasi, dan menstabilkan polutan adalah fitoremediasi. Melalui metode fitoremediasi dapat digunakan untuk meminimalisir tingginya kadar logam berat pada air bekas tambang. Fitoremediasi bekerja melalui beberapa mekanisme di akar (rizosfer), antara lain fitostimulasi, rhizofiltrasi, dan fitostabilisasi. Selain itu, efektivitasnya sangat dipengaruhi oleh ketersediaan nutrisi, matahari, suhu, dan kelembapan yang memadai. Sehingga, dibutuhkan tanaman yang mampu beradaptasi dalam keadaan ekstrem [6]. Beberapa spesies tanaman yang dinilai mampu mengurangi kandungan logam berat pada air asam tambang adalah tanaman akar wangi (*Chryzophogon zizanioides* (L.) Roberty) [7] dalam penelitian menggunakan tanaman ini dengan sistem perakaran yang kuat dan tebal sehingga tanaman ini dapat mengakumulasi logam berat di lingkungan perairan, penelitian lainnya [8] kultivar puring merupakan tumbuhan Indonesia yang persebarannya cukup banyak. Selain itu, dalam penelitian [9] menggunakan purun tikus (*Eleocharis dulcis*) spesies yang mudah dijumpai karena pertumbuhannya yang tidak memerlukan musim dan waktu di berbagai wilayah, termasuk mudah tumbuh di sekitar rawa gambut khususnya area anak Sungai Mahakam di Kalimantan Timur. Tujuan dari artikel studi literatur ini adalah untuk melihat perkembangan penelitian terkait pemanfaatan tanaman-tanaman lokal dalam mengendalikan logam berat seperti besi (Fe) dan tembaga (Cu) yang diharapkan tinjauan literatur ini menjadi dasar dalam pencarian topik-topik terkini terkait fitoremediasi di lahan bekas tambang batu bara kedepannya.

Metode

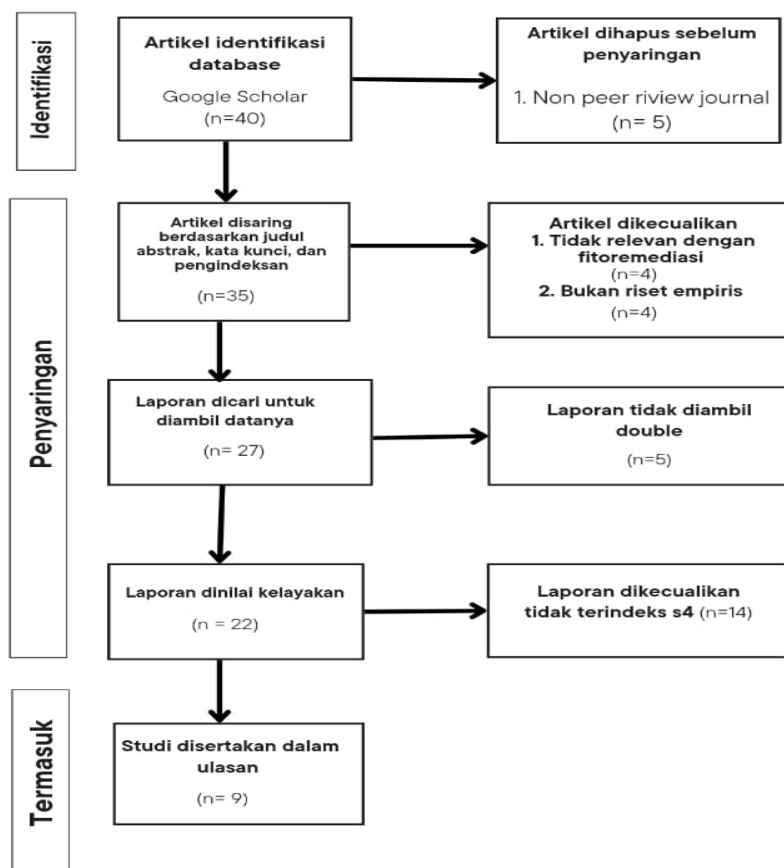
Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan studi literatur sistematis yang bertujuan untuk menganalisis, mengidentifikasi, dan mengevaluasi hasil-hasil penelitian terdahulu melalui proses sintesis data sekunder. Prosedur ini melibatkan telaah kritis terhadap studi

yang dipilih untuk memastikan kredibilitas informasi. Pencarian literatur dilakukan menggunakan aplikasi Harzing’s Publish or Perish dengan mengakses database Google Scholar. Penelitian ini mengulas penelitian-penelitian sebelumnya mengenai fitoremediasi menggunakan tanaman-tanaman lokal di Indonesia, sehingga pencarian literatur mengacu pada kriteria sebagai Tabel 1. berikut :

Tabel 1. Kriteria inklusi dan Eksklusi

Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Diterbitkan antara tahun 2015	Diterbitkan sebelum tahun 2015
Artikel merupakan jurnal peer review	Artikel bukan jurnal peer review
Jurnal minimal terindeks Sinta 4	Indeks jurnal lebih rendah dari Sinta 4
Ditulis dalam bahasa indonesia atau bahasa inggris	Teks tidak ditulis dalam Bahasa Indonesia atau Inggris
Terkait fitoremediasi dengan fokus logam berat tembaga (Cu) dan besi (Fe)	Tidak berkaitan dengan fitoremediasi dengan fokus logam berat tembaga (Cu) dan besi (Fe)
Penelitian empiris	Bukan penelitian empiris

Kata kunci yang digunakan secara terpisah dalam Bahasa Indonesia dan Inggris meliputi: (1) fitoremediasi, (2) logam berat tembaga (Cu) dan besi (Fe), (3) fitoremediasi dengan tanaman lokal, dan (4) fitoremediasi pada kolam bekas tambang. Dari pencarian tersebut, diperoleh 40 artikel yang diseleksi berdasarkan kriteria tertentu, dengan mempertimbangkan judul, abstrak, dan isi artikel secara keseluruhan. Proses seleksi dilakukan secara manual melalui tahapan pengkodean, ekstraksi data, dan analisis, yang kemudian dicatat yang mengacu pada kriteria yang telah ditentukan pada Tabel 1. Dan proses lengkap terkait pemilihan artikel disajikan pada Gambar 1 berikut ini:



Gambar 1. Diagram prisma

Berdasarkan proses seleksi (Gambar 1), diperoleh 9 artikel yang dilanjutkan ke tahap analisis. Penelitian ini menggunakan teknik analisis tematik yang meliputi enam tahap, yaitu: memahami data, menyusun kode data, mencari tema, mengkaji tema, mendefinisikan serta memberi nama tema, dan menghasilkan laporan yang relevan dengan literatur sebelumnya.

Hasil Dan Pembahasan

Berdasarkan penelitian sebelumnya, dalam pengelolaan lahan pasca tambang memerlukan tanaman yang dipadukan dengan bahan penetral dapat membantu menaikkan pH tanah agar sesuai dengan standar kualitas lingkungan. Adapun pengelolaan lahan pasca tambang khususnya untuk menurunkan logam berat seperti besi (Fe) dan tembaga (Cu) yang ditemukan mencemari lingkungan. Melalui metode fitoremediasi, yaitu teknik pemulihan lingkungan dengan memanfaatkan tanaman. Menurut [10] terdapat jenis tanaman lokal telah diteliti dan terbukti mampu menyerap logam berat di area bekas tambang. Berikut tabel 1. menyediakan beberapa jenis tanaman telah terbukti efektif menyerap tembaga dan besi.

Tabel 2. Jenis Tanaman Fitoremediasi

Nama peneliti	Jenis tanaman	Logam yang diserap	Efektivitas Penyerapan
Fajar, H, N., Agustina, C., & Ramadhani, D.	Kultivar Puring (<i>Codiaeum variegatum</i>)	Tembaga (Cu)	<0,50 ppm
Habibullah, A., Khamidah, N., & Saputra, A, R.	Ekor kucing (<i>Typha angustifolia</i>)	Besi (Fe)	(10g, 15g, 20g) + FMA (12 g) sebanyak 57,93%
Putri, D., & Juswardi	Kayu apu (<i>Pistia stratiotes</i> (L.) dan Kiambang (<i>Salvinia molesta Mitchell</i>)	Besi (Fe)	50g sebanyak 93,49%
Wulan, N, S., Apriadi, T., & Melani, W, R.	Purun tikus (<i>Eleocharis dulcis</i>)	Besi (Fe)	250g & 500g Sebanyak 80,1%
Priantoro, E, A., Suryaatmana, P., & Sumiarsa, D.	Akar Wangi (<i>Chryzophogn zizanioides</i> (L.)	Besi (Fe) dan Tembaga (Cu)	23% dan 40%
Lestari, N, D., & Pratama, N, R.	Tanaman rami (<i>Boehmeria nivea</i>)	Tembaga (Cu)	9,920 µg/tanaman (125 ppm)
Siaka, I, M., Wcijayanthi, I, A, G, S., & Ratnayani, O.	Gumitir (<i>Tagetes erecta</i> L)	Tembaga (Cu)	13,82% (<50%)
Afifudin, A, F, M, & Irawanto, R.	Daun Tombak (<i>Sagittaria lancifolia</i>)	Tembaga (Cu)	5mg/L
Pratiwi, C, M., Kriswardana, F., & Wardoyo I, R, E.	Mawar Air (<i>Echinodorus palaefolis</i>)	Besi (Fe)	8,8 mg/L atau 93,81%

Berdasarkan hasil analisa diperoleh tabel 2. jenis tanaman yang telah diteliti oleh peneliti sebelumnya. Hasil tersebut diketahui waktu penyerapan kadar logam, jumlah pemberian tanaman, dan penurunan kandungan logam besi (Fe) dan tembaga (Cu) saat remediasi berlangsung. Hal tersebut merujuk pada beberapa penelitian sebelumnya oleh [10] menjelaskan pemanfaatan beberapa kultivar puring (*Codiaeum variegatum*). Akalifa pink, Teri, Sakura, dan Akalifa hijau yang digunakan sebagai agen fitoremediasi logam tembaga (Cu).

Perlakuan dilakukan dengan pemberian larutan logam Cu (tembaga) 25 ppm pada tiga kultivar (Akalifa pink, Teri, dan Sakura), sedangkan Akalifa hijau berperan sebagai kontrol tanpa perlakuan. Proses penyerapan Cu berlangsung melalui akar, kemudian logam ditranslokasikan ke jaringan tanaman, yang berdampak signifikan terhadap luas daun dan tinggi tanaman ($p < 0,05$), namun tidak memengaruhi jumlah daun hingga hari ke-30. Analisis konsentrasi Cu menunjukkan kultivar Teri memiliki toleransi tertinggi, mampu mengakumulasi hingga 126,399 ppm logam Cu, serta menstabilkan logam di dalam jaringan. Sementara itu, Akalifa pink dan Akalifa hijau tergolong kurang toleran, ditandai luas daun yang tetap akibat hambatan fotosintesis dan pertumbuhan. Temuan ini mengindikasikan bahwa kultivar puring, khususnya Teri, berpotensi tinggi dimanfaatkan dalam upaya fitoremediasi lahan atau lingkungan tercemar Cu, apalagi mengingat ketersediaannya yang cukup melimpah di Indonesia [8]

Penelitian lainnya yang dilakukan [3] fitoremediasi menggunakan tanaman ekor kucing (*Typha angustifolia*) yang merupakan yang ditambahkan dengan perlakuan FMA pada metode fitoremediasi untuk meningkatkan efektivitas penurunan kandungan logam besi (Fe). Menurut [11] tanaman ini banyak ditemukan pada area tanggul lumpur lapindo, Desa Renokenongo, Jawa timur, Indonesia. Hasil penelitian ini diketahui sebelum percobaan air asam tambang mengandung besi (Fe) mengandung 1,70 ppm. Pemberian FMA (Fungi Mikoriza Arbuskular) sebanyak (12g FMA/ember) lebih meningkatkan tinggi tanaman, memperbanyak bulu akar, sehingga akar semakin mampu menyerap unsur hara. *Typha angustifolia* berlangsung melalui penyerapan ion Fe dan Mn dari air asam tambang oleh rambut akar melalui pertukaran ion dan difusi, kemudian diangkut ke batang dan daun via xilem. Akar melepaskan oksigen ke rhizosfer, mengoksidasi Fe^{2+} dan Mn^{2+} menjadi bentuk kurang larut yang mengendap di sekitar akar atau media. Penelitian lainnya menjelaskan [12] bahwa *Typha angustifolia* memiliki sistem perakaran yang luas dan kuat, sehingga mampu menyerap logam berat seperti Fe dan Mn dari air. Logam diserap dari larutan melalui rambut akar, lalu ditranslokasikan ke jaringan tanaman. Fe dan Mn berperan sebagai mikronutrien, sehingga tanaman ini memiliki toleransi dan kemampuan akumulasi tinggi (hyperaccumulator).

Penelitian lain yang dilakukan oleh [13] menggunakan tumbuhan air seperti ki apu (*Pistia stratiotes*) dapat menurunkan kadar besi (Fe) dari 1,51 mg/L menjadi 1,06 mg/L, dan kiambang (*Salvinia molesta* Mitchell) mampu menurunkannya menjadi 0,15 mg/L. Kedua tanaman ini dapat diartikan untuk menyerap Fe. Proses ini menunjukkan bahwa telah terjadi proses transportasi dan akumulasi logam besi (Fe). Menurut penelitian [14]tanaman ki apu (*Pistia stratiotes*) merupakan tanaman terapung yang mampu hidup di daerah tropis, seperti di Indonesia yang memiliki temperatur hangat. Kemudian menurut penelitian lain [15] kiambang (*Salvinia molesta* Mitchell) biasanya hidup di daerah yang tenang seperti sungai, ataupun danau di daerah tropis seperti di negara Indonesia

Dalam penelitian yang dilakukan oleh [16] menemukan bahwa tumbuhan purun tikus (*Eleocharis dulcis*) mampu menurunkan kadar logam berat besi (Fe) dengan perlakuan yang dilakukan dalam kurun waktu 30 hari biomassa purun tikus (*Eleocharis dulcis*) sebanyak 500g mampu menyerap 80,1% kandungan Fe dari air tambang, jauh lebih tinggi dibandingkan biomassa 250g yang hanya menyerap 17,1%. Adapun penyerapannya menurut penelitian [17] dimulai dengan proses rhizofiltration, yaitu akar menyerap ion Fe^{2+} dan Mn^{2+} dari air atau sedimen. Ion Fe^{2+} kemudian dioksidasi menjadi Fe^{3+} di area akar dan diendapkan. Selain itu, keberadaan senyawa pengkelat (chelates) pada akar dan batang membantu tanaman bertoleransi terhadap kadar Fe yang tinggi. [9] menambahkan bahwa biomassa purun tikus (*Eleocharis dulcis*) sebanyak 500g mampu menyerap 80,1% kandungan Fe dari air tambang, jauh lebih tinggi dibandingkan biomassa 250g yang hanya menyerap 17,1%. Selain itu, pertumbuhannya yang tidak memerlukan musim dan waktu di berbagai wilayah, termasuk mudah tumbuh di sekitar rawa gambut khususnya area anak Sungai Mahakam di Kalimantan Timur

Dalam penelitian [7] menunjukkan bahwa tumbuhan akar wangi (*Chryzophogn zizanioides* (L.) mampu mengakumulasi hingga 84% logam Cu dan Fe tanpa menunjukkan gejala keracunan. Sistem akar horizontal dan tahan terhadap kondisi air asam menjadikan akar

wangi (*Chryzophogn zizanioides* (L.) sangat potensial untuk fitoremediasi di lahan bekas tambang. Mekanisme penyerapan logam ada tiga proses utama dalam mengakumulasi logam berat di dalam organ. Pertama adalah bioavailabilitas dan serapan logam berat dari lingkungan melalui akar, kedua adalah translokasi logam berat dari akar ke pucuk melalui pembuluh xylem dan ketiga adalah penyerapan dan penyimpanan (sekuestrasi) logam berat di daun terutama di vakuola. Pertumbuhan tanaman (*Chryzophogn zizanioides* (L.) menurut [18] (memiliki potensi pertumbuhan yang luas, salah satunya di daerah Jawa Barat melakukan budidaya akar wangi (*Chryzophogn zizanioides* (L.) lebih dari 2.400 ha

Penelitian yang dilakukan oleh [19] melakukan analisis terhadap tanaman rami (*Boehmeria nivea*) mengidentifikasi bahwa tanaman rami mampu mengakumulasi Cu sebesar 125 ppm, dengan konsentrasi tertinggi pada akar mencapai 9,920 µg. tanaman rami (*Boehmeria nivea*) sebagai tanaman tahunan yang tumbuh liar, cocok dikembangkan sebagai tanaman fitoremediator di tanah terkontaminasi Cu. Serapan logam tembaga (Cu) yang ada di dalam tanah akan terakumulasi ke dalam bagian akar dan tajuk dari tanaman rami. Organ yang paling banyak terakumulasi logam berat tembaga (Cu) adalah akar tanaman rami, Penyerapan dan translokasi tembaga (Cu) pada tanaman rami tergantung pada tingkat ketersediaan Cu dalam tanah dan kondisi pertumbuhan dari tanaman itu sendiri. Hasil ini menunjukkan bahwa akumulasi tembaga (Cu) paling banyak terdapat pada akar. Penyerapan logam oleh tanaman ini melibatkan sel akar, jaringan xylem, translokasi, detoksifikasi (menimbun logam di dalam organ tertentu seperti buah, daun, dan akar tanaman) dan sekuestrasi pada keseluruhan tanaman

Penelitian yang dilakukan [20] yang melakukan penelitian mengenai efektivitas tanaman gumitir (*Tagetes erecta* L.) dalam mengurangi kandungan tembaga (Cu) pada tanah tercemar tergolong rendah. Hal ini terlihat dari nilai efektivitas rendah dalam menyerap Cu, melalui mekanisme pembentukan senyawa kelat pada tanaman dapat memacu ketersediaan dan transfer logam dari akar ke seluruh bagian tanaman, dengan perkiraan mekanisme yaitu unsur logam diserap tanaman akan membentuk ikatan sulfida pada sistein dan membentuk senyawa kompleks, sehingga logam lebih mudah diserap oleh akar dan di translokasikan ke seluruh bagian tanaman melalui sel jaringan xylem. Selain itu, faktor pendukung yang menyebabkan penyerapan logam berat Cu oleh tanaman gumitir pada tanah kontrol dan tanah tercemar saat panen (60 hari) menurun adalah terdapatnya beberapa mikroorganisme yang dapat berinteraksi dengan logam Cu sehingga terjadi kompetisi dengan tanaman gumitir dalam penyerapan Cu dengan efektivitas penyerapan tertinggi hanya 13,82%. Nilai BCF < 1 (0,11–0,14) menunjukkan tanaman ini tidak efektif untuk fitoremediasi logam tembaga (Cu). Tanaman gumitir (*Tagetes erecta* L.) banyak ditemukan di Indonesia, khususnya Provinsi Bali yang menggunakan untuk keperluan agama dan adat.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan [21] melakukan upaya fitoremediasi pada logam berat tembaga (Cu) menggunakan tumbuhan daun tombak *Sagittaria lancifolia* dengan tingkat toleransi hingga 5 mg/L. Dalam proses penyerapannya menurut [22] pada proses fitoremediasi, *Sagittaria lancifolia* menyerap ion Cu^{2+} melalui akar, di mana ion tersebut menempel pada dinding sel (adsorpsi) dan masuk ke sel akar melalui transporter ion logam. Selanjutnya, Cu^{2+} diikat oleh protein pengkelat untuk mengurangi toksisitas, lalu dialirkan melalui pembuluh xilem menuju batang dan daun. Di organ tanaman, Cu disimpan dalam vakuola atau diikat senyawa pengkelat sehingga aman bagi sel. Mekanisme ini membuat *Sagittaria lancifolia* mampu bertahan dan tetap sehat meski terpapar logam Cu hingga konsentrasi 3 mg/L selama 4 minggu. Namun, setelah 14 hari paparan, tanaman mulai menunjukkan gejala stres seperti kerusakan akar dan layu, yang menunjukkan batas toleransi fisiologis tanaman terhadap logam berat telah tercapai.

Menurut [23] yang memanfaatkan tanaman mawar air (*Echinodorus palaefolius*) dalam menurunkan kadar besi (Fe), tanaman ini memiliki rongga antar sel yang berfungsi sebagai saluran oksigen dari udara ke akar, dengan hasil yang diperoleh, yakni menurunkan kadar Fe dari 9,38 mg/L menjadi 0,58 mg/L dengan efektivitas 93,81% dalam 14 hari. Namun, akumulasi logam menyebabkan stres pada tanaman, ditandai dengan daun yang menguning

dan rontok, sehingga perlu ditindaklanjuti dengan proses filtrasi lanjutan agar air benar-benar aman digunakan.

Berikut disajikan tabel 3. kelebihan dan kekurangan dari masing-masing tanaman dalam penyerapan logam besi (Fe) dan tembaga di lahan bekas tambang.

Tabel 3. Kelebihan dan kekurangan

Tanaman	Kelebihan	Kekurangan
Kultivar puring (<i>Codiaeum variegatum</i>)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mampu mengakumulasi logam tembaga (Cu) hingga 126,399 ppm di akar. Ini menunjukkan kapasitas tinggi dalam menyerap Cu dari tanah tercemar. 2. Tumbuhan hias yang mudah diperoleh dan tidak memerlukan biaya mahal. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Translokasi Cu rendah ke bagian atas tanaman lebih cocok untuk fitostabilisasi daripada fitoekstraksi. 2. Respons pertumbuhan bisa terganggu tergantung pada kultivar dan konsentrasi Cu.
Ekor kucing (<i>Typha angustifolia</i>)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mampu menurunkan kadar Fe secara signifikan di lingkungan air tercemar. 2. Tahan terhadap kondisi ekstrem (pH rendah dan logam tinggi). 3. Akar berbulu banyak memperbesar luas serapan logam. 	Butuh waktu dan perlakuan khusus dalam pemeliharaan di sistem terkontrol.
Kayu apu (<i>Pistia stratiotes</i> (L.) dan Kiambang (<i>Salvinia molesta</i> Mitchell)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kombinasi keduanya sangat efektif dalam menyerap logam Fe dan Mn dari air asam tambang: 2. Kombinasi sangat efektif dalam mengurangi kadar Fe di air tercemar. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Pistia stratiotes</i> bisa mengalami stres (klorosis, nekrosis) pada logam tinggi. 2. <i>Salvinia molesta</i> berpotensi menjadi tanaman invasif jika tidak dikendalikan.
Purun tikus (<i>Eleocharis dulcis</i>)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Efektif menyerap logam Fe dalam sistem lahan basah buatan. 2. Tanaman asli lahan rawa yang tahan terhadap genangan dan logam. 3. Potensi besar dalam aplikasi pada tambang pasca-produksi. 	Purun tikus cenderung memiliki laju pertumbuhan yang lebih lambat, sehingga waktu remediasi yang dibutuhkan bisa lebih panjang.
Tanaman Akar Wangi (<i>Chryzophogon zizanioides</i> (L.))	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mampu menyerap berbagai logam berat seperti Cu, Fe, Zn, Ni, Cr 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sebagian besar logam terakumulasi di akar, sehingga efisiensi

	<ol style="list-style-type: none"> Memiliki akar yang panjang dan tebal sehingga efektif menyerap polutan dalam air dan tanah Tahan terhadap asam, genangan, serta air lindi 	<p>fitoekstraksi ke tajuk lebih rendah</p> <ol style="list-style-type: none"> Tidak semua tanaman akar wangi (<i>Chryzophogon zizanioides</i> (L.) bisa tumbuh di air limbah yang sangat pekat tanpa pengenceran terlebih dahulu
Tanaman rami (<i>Boehmeria nivea</i>)	<ol style="list-style-type: none"> Mampu bertahan hidup dalam kondisi yang tercemar Cu hingga 125 ppm Indeks Bioremediasi (IBR) mencapai 89,2% yakni sangat efisien dalam menyerap Cu dari tanah. Memfokuskan penyerapan di akar sehingga cocok untuk fitostabilisasi 	<ol style="list-style-type: none"> Pertumbuhan tinggi dan jumlah daun berkurang ketika konsentrasi Cu tinggi Serapan tertinggi di tajuk hanya 1,778 µg/tanaman, jauh lebih kecil dibandingkan serapan di akar (9,920 µg/tanaman)
Tanaman Gomitir (<i>Tagetes erecta</i> L)	<ol style="list-style-type: none"> Ketersediaan yang melimpah karena tanaman ini banyak dibudidayakan di Bali untuk keperluan budaya Tanaman ini tidak dikonsumsi manusia atau hewan, sehingga aman untuk fitoremediasi 	<ol style="list-style-type: none"> Efektivitas penyerapan terhadap logam berat tembaga (Cu) hanya 13,82% masih dibawah 50% yang tergolong kurang efektif Nilai BCF <1 dapat dikategorikan sebagai tanaman kurang cocok sebagai fitoremediator
Kangkung Air (<i>Ipomoea aquatica</i>)	<ol style="list-style-type: none"> Mampu menyerap fe hingga 2392,82 ppm dalam 4 minggu Efektivitas penyerapan Fe mencapai 22,34% pada perlakuan 10 benih 	<ol style="list-style-type: none"> Tanaman dapat digunakan sebagai hasil pangan sehingga berpotensi sebagai tanaman beracun jika dikonsumsi Penyerapan Kadar besi (Fe) mengalami penurunan setelah minggu ke 4
Mangrove (<i>Rhizophora mucronata</i>)	<ol style="list-style-type: none"> Mangrove dapat mengakumulasi logam berat di akar dan mengeluarkannya melalui proses ekslusi 	<p>Pertumbuhan mangrove bisa terhambat jika paparan Cu berlangsung lama</p>

		untuk mencegah keracunan pada bagian atas tanaman	
		2. Mampu mentoleransi logam berat dengan menyimoannya di jaringan yang tidak aktif	
Daun Tombak (<i>Sagittaria lancifolia</i>)		1. Memiliki toleransi logam dengan kemampuan bertahan pada konsentrasi Cu hingga 5 mg/L	1. Terdapat indikasi keracunan pada tanaman, yaiitu menunjukkan klorosis dan nekrosis
		2. Tanaman liar sehingga mudah ditemukan di alam dan tidak dikonsumsi sehingga aman untuk fitoremediasi	2. Efektivitas yang terbatas karena tidak efektif untuk konsentrasi Cu yang lebih tinggi
			3. Terdapat perubahan fisik yakni akar rusak, daun layu akibat akumulasi
Tanaman Mawar Air (<i>Echinodorus palaefolius</i>)		1. Mampu menurunkan kadar besi (Fe) dengan efektivitas diatas 90% yakni sebesar 93,81%	1. Penurunan kadar Fe setelah hari ke-8 tidak signifikan karena tanaman mencapai titik jenuh
		2. Kadar Fe mencapai baku mutu (1 mg/L) dalam 4 hari	2. Daun yang menguning dan akar rusak akibat akumulasi logam berat

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis studi literatur ditemukan bahwa terdapat berbagai jenis tanaman yang berpotensi digunakan sebagai agen fitoremediasi logam berat tembaga (Cu) dan besi (Fe) di lahan bekas tambang. Tanaman yang menunjukkan potensi dalam menyerap logam Cu antara lain adalah kultivar puring (*Codiaeum variegatum*), akar wangi (*Chryzophogon zizanioides*), tanaman rami (*Boehmeria nivea*), gumitir (*Tagetes erecta L.*), dan daun tombak (*Sagittaria lancifolia*). Sementara itu, tanaman yang efektif dalam menyerap logam Fe meliputi ekor kucing (*Typha angustifolia*), kayu apu (*Pistia stratiotes*), kiambang (*Salvinia molesta*), purun tikus (*Eleocharis dulcis*), akar wangi (*Chryzophogon zizanioides*), serta mawar air (*Echinodorus palaefoolius*). Efektivitas tertinggi dalam penyerapan besi (Fe) dicapai oleh *Salvinia molesta* dan *Pistia stratiotes* dengan efisiensi lebih dari 90%, diikuti oleh *Eleocharis dulcis* (80,1%) dan *Echinodorus palaefoolius* (93,81%). Untuk Cu, akumulasi tertinggi terdapat pada, *Chryzophogon zizanioides* (84%), *Codiaeum variegatum* (<0,50 ppm). Sebaliknya, efektivitas terendah tercatat pada *Tagetes erecta L.* dengan serapan hanya 13,82% dan BCF < 1, serta *Rhizophora mucronata* dan *Sagittaria lancifolia* yang memiliki keterbatasan dalam akumulasi dan toleransi Cu. Pada logam Fe, *Typha angustifolia* memiliki efektivitas yang lebih rendah dibandingkan tanaman lainnya, yakni sebesar 57,93%.

Referensi

- [1] F. Azwari and Triyono, "Fitoremediasi Logam Fe dalam Air Asam Tambang Menggunakan Eceng Gondok (*Eichhornia Crassipes*)," *Buletin LUOPE*, vol. 15, no. 2, pp. 42-45, 2019.
- [2] K. F. A. K. A. M. I and M. Sumaryono, "kandung Logam Berat Besi (Fe), Timbal (Pb) dan Mangan (Mn) pada Air Sungai Santan," *Jurnal Penelitian Ekosistem Dipterokarpa*, vol. 4, no. 1, pp. 49-56, 2018.
- [3] H. A, K. N and S. R, A, "Pemanfaatan *Thypha angustifolia* dan Fungi Mikoriza Arbuskular untuk Fitoremediasi Air Asam Tambang," *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, vol. 17, no. 2, pp. 95-105, 2021.
- [4] M. A. D. Permata , A. I. S. purwiyanto and G. Diansyah, "Kandungan logam Berat Cu (Tembaga) dan Pb (Timbal) pada Air dan sedimen di Kawasan Industri teluk Lampung, Provinsi Lampung," *Journal of Tropical Marine Science*, vol. 1, no. 1, pp. 7-14, 2018.
- [5] Kiswanto, Wintah and R. L. N, "Analisis Logam Berat (Mn, Fe, Cd), sianida dan Nitrit pada Air Asam Tambang Batu Bara," *Jurnal LITBANG Kota Pekalongan*, vol. 18, no. 1, pp. 20-26, 2020.
- [6] P. M and F. M, "Fitoremediasi dengan berbagai jenis tumbuhan: Riview," *Journal of Global forest and Enviromental Science*, vol. 4, no. 1, pp. 12-15, 2024.
- [7] P. E. A, S. P, Sumiarsa, Widyanani, B. E. S. B and Sembring, "Fitoremediasi Logam Berat Sistem Lahan Basah terapung Menggunakan Tanaman Akar Wangi (*Chryphogon zizanioides* (L.) roberthy) sebagai Hiperkumulator," *Jurnal Teknologi Lingkungan* , vol. 26, no. 1, pp. 114-127, 2025.
- [8] K. S. Y, K. K and S. M, "Keragaman Kultivar Puring (*Codiaeum variegatum* (L.) rumph exc A. Juss) dan Pemanfaatannya di Kampung Tablanusu Distrik Depapre Kabupaten Jayapura Papua," *Jurnal Novaeguinea*, vol. 15, no. 1, pp. 272-281, 2024.
- [9] D. D, P. P, N. A. E, S. A, I. K and K. O. F, "Eksplorasi dan identifikasi Purun Danau (*Lepironia articulata*) lokal sebagai adsorben alami pada iklim tropika lembab di Kalimantan Timur (Exploration and identification of local Purun Danau (*Lepironia articulata*) as a natural adsorbent in a humid tropica," *Jurnal Agroteknologi*, vol. 13, no. 1, pp. 9-16, 2022.
- [10] F. N. H, A. C, R. D, S. A, H. R, R. P.D. S, R. V, F. B, R. A. B and I. R, "Potensi beberapa kultivar puring (*Codiaeum variegatum*) sebagai fitoremediasi pada tanah tercemar logam berat tembaga (Cu)," *Jurnal Pendidikan Biologi dan Sains*, vol. 4, no. 2, pp. 292-302, 2021.
- [11] Irmayani, F. S. P and K. I, "Strategi Design Lanskap *Typha Latifolia* Berbasis Fitoremediasi Terhadap Recovery Lahan Lumpur Lapindo dan Eko-Wisata Sidoarjo.," *RESEARCH ARTICLE*, vol. 10, no. 1, pp. 35-43, 2022.
- [12] R. Ibrahim, A. Zubair, M. Selintung and A. R. Dwirachma, "Phytoremediation of Fe and Mn Metal in acid Mine Drainage Using *thypha Angustifolia*," *The 3rd EPI International Conference on science and Engineering* , vol. 1, no. 1, pp. 899-1757, 2019.
- [13] D. Putri and Juswardi , "Efektivitas kombinasi *Pistia stratiotes* L. dan *Salvinia molesta* Mitchell dalam Fitoremediasi Air Asam Tambang Batubara," *Sriwijaya Bioscientia*, vol. 4, no. 1, pp. 32-37, 2023.
- [14] K. M, M. A. D and P. R. S, "Analisis Perbedaan Tanaman Kayu Apu (*Pistia stratiotes*) sebagai fitoremediasi Merkuri (Hg) pada Air.," *Sanitasi: Jurnal Kesehatan Lingkungan* , vol. 9, no. 3, pp. 105-110, 2018.
- [15] P. R. N, Z. B and Purwono, "Pengaruh Luas Penutupan Kiambang (*Salvinia molesta*) Terhadap penurunan COD, Amonia, Nitrit, dan Nitrat pada Limbah Cair Domestik (Grey water) Dengan Sistem Kontinyu.," *Jurnal Teknik Kimia*, vol. 5, no. 4, pp. 1-10, 2016.
- [16] S. N. Wulan , T. Apriadi and W. R. Melani, "Studi Fitoremediasi serapan Besi (Fe) dari Kolam Bekas Tambang Bauksit Menggunakan Purun (*Eleocharis* sp.)," *LIMNOTEK Perairan Darat Tropis di Inonesia* , vol. 27, no. 2, pp. 67-78, 2020.

- [17] Juswardi, H. Aulia, N. Tanzerina, E. Junaidi and S. Triwardana, "Effectiveness of Waterchestnut (*Eleocharis dulcis*(Burm.f.) Trin. ex Henschel) in Phytoremediation of Coal Mine Acid Drainage in Constructed Wetlands," *International Journal of Scientific Development and Research (IJSDR)*, vol. 8, no. 6, pp. 1768-1772, 2023.
- [18] T. M. D and W. F.K, "Pertumbuhan Tanaman Akar Wangi (*Vetiver zizanioides* L.) di Tanah Salin dengan perlakuan Aam Salisilat dan Funi Mikoriza Arbuskular," *Jurnal UMSU*, vol. 22, no. 3, pp. 167-171, 2020.
- [19] L. N. D and P. N, R, "Potensi Tanaman Rami (*Boehmeria nivea*) untuk Fitoremediasi tanah tercemar tembaga," *Jurnal tanah dan Sumberdaya Lahan*, vol. 7, no. 2, pp. 291-297, 2020.
- [20] I. M. Siaka, A. G. S. I. Wijayanthi and O. Ratnayani, "Fitoremediasi tanah Tercemar Logam Berat Tembaga (Cu) dengan Tanaman Gunitir (*Tagetes erecta*)," *Jurnal Kimia*, vol. 18, no. 1, pp. 41-50, 2024.
- [21] A. F. M. Afifuddin and R. Irwanto, "Estimating The Ability of Lanceleaf Arrowhead (*Sagittaria lancifolia*) in Phytoremedition of Heavy Metal Copper," *BERKALA SAINSTEK*, vol. 9, no. 3, pp. 125-130, 2021.
- [22] A. F. M. Afifudin and I. Rony, "Translocation Mechanisme of Lanceleaf Arrowhead (*sagittaria lancifolia*) on copper (Cu) and Phytoremediation Ability," *Enviroment Asia*, vol. 15, no. 3, pp. 84-94, 2022.
- [23] C. Pratiwi, F. Kriswardana and I. R. E. Wardoyo, "efektivitas *Pistia stratiotes* L. dan *Echinodorus palaefolius* dalam penyerapan Ferrum (Fe) dalam Air Sumur Menggunakan Metode Fitoremediasi," *GEMA Lingkungan Kesehatan*, vol. 20, no. 2, pp. 124-132, 2022.
- [24] K. K. F. A and M. Sumaryono, "Kandungan Logam Berat Besi (Fe), Timbal (Pb) dan Mangan (Mn) pada Air Sungai Santan," *Jurnal Penelitian Ekosistem Dipterokarpa*, vol. 4, no. 1, pp. 49-56, 2018.
- [25] M. Khasanah, A. D. Moelyaningrum and R. S. Pujiati, "Analisis Perbedaan Tanaman Kayu Apu (*Pistia stratiotes*) sebagai fitoremediasiMerkuri (Hg) pada air," *Sanitasi: Jurnal Kesehatan Lingkungan*, vol. 9, no. 3, pp. 105-110, 2018.
- [26] N. D. Lestari and N. R. Pratama, "Potensi Tanaman Rami (*Boehmeria nivea*) untuk Fitoremediasi Tanah Tercemar Tembaga," *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, vol. 7, no. 2, pp. 291-297, 2020.