

Fitoremediasi *In Vitro* Logam Pb dan Cu Menggunakan Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes*): Strategi Ramah Lingkungan dan Berkelanjutan

Siti Mahmudha^{1*}, Fajar Nugraha², Muhammad Idris³, Imas Masriah⁴, Devi Lestari⁵

^{1*,4,5}Teknologi Rekayasa Kimia Industri, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan, Medan, Indonesia

²Jurusan Kimia, FMIPA, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, Indonesia

³Magister Kimia, FMIPA, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

Email: ^{1*}sitimahmudha@polmed.ac.id, ²fajarn0061@gmail.com, ³mesut.idris@mail.ugm.ac.id,

⁴imasmariasia@polmed.ac.id, ⁵devilestari@polmed.ac.id

Abstract

Heavy metal contamination, especially by lead (Pb) and copper (Cu), is a major environmental issue in aquatic ecosystems caused by industrial, mining, and agricultural activities. These metals are toxic, persistent, and bioaccumulative, posing risks to aquatic life and human health. Various remediation methods have been developed, including physical, chemical, and biological approaches; however, their effectiveness on a large scale remains limited. This study explores the potential of *Eichhornia crassipes* (water hyacinth) for *in vitro* phytoremediation of Pb and Cu. Plants were grown in Hoagland solution containing 100 mg/L of each metal. Metal accumulation in plant tissues was measured using Atomic Absorption Spectroscopy (AAS), and chlorophyll content was analyzed with a UV-Vis spectrophotometer. The results showed that Pb primarily accumulated in the roots, while Cu was more translocated to the leaves. Chlorophyll levels decreased more significantly in Cu-treated plants, indicating higher stress. These findings suggest that *E. crassipes* is a promising, cost-effective, and environmentally friendly option for the remediation of heavy metal-contaminated waters. The implementation of this technology could contribute to improving environmental quality and reducing the risk of heavy metal exposure to both ecosystems and human health.

Keywords: Phytoremediation, *Eichhornia Crassipes*, *In Vitro*.

Abstrak

Pencemaran logam berat, khususnya timbal (Pb) dan tembaga (Cu), merupakan permasalahan lingkungan yang serius di ekosistem perairan akibat aktivitas industri, pertambangan, dan pertanian. Logam-logam ini bersifat toksik, persisten, dan dapat terakumulasi dalam rantai makanan, sehingga menimbulkan dampak negatif bagi organisme akuatik maupun kesehatan manusia. Beragam metode remediasi telah dikembangkan, termasuk pendekatan fisik, kimia, dan biologis, namun efektivitasnya dalam skala besar masih terbatas. Penelitian ini menawarkan pendekatan fitoremediasi secara *in vitro* dengan memanfaatkan tanaman eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) sebagai agen penyerap logam Pb dan Cu. Tanaman ditumbuhkan dalam larutan Hoagland yang mengandung Pb dan Cu masing-masing sebesar 100 mg/L. Konsentrasi logam dalam jaringan tanaman dianalisis menggunakan Spektroskopi Serapan Atom (SSA), sedangkan kadar klorofil dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa logam Pb cenderung terakumulasi di akar, sedangkan Cu menunjukkan tingkat translokasi yang lebih tinggi ke bagian daun. Penurunan kadar klorofil lebih signifikan ditemukan pada media Cu, mengindikasikan stres fisiologis yang lebih kuat dibandingkan Pb. Temuan ini menguatkan potensi *Eichhornia crassipes* sebagai agen fitoremediasi yang efektif, ekonomis, dan ramah lingkungan untuk mengatasi pencemaran logam berat di perairan. Penerapan teknologi ini diharapkan dapat berkontribusi dalam meningkatkan kualitas lingkungan serta mengurangi risiko kontaminasi logam berat terhadap ekosistem dan kesehatan manusia.

Kata Kunci: Fitoremediasi, *Eichhornia Crassipes*, *In Vitro*.

1. PENDAHULUAN

Pencemaran logam berat seperti timbal (Pb) dan tembaga (Cu) terus menjadi ancaman serius bagi ekosistem perairan akibat aktivitas manusia, mulai dari industri hingga pertanian. Logam-logam ini dikenal sangat toksik, sulit terurai, dan mampu menumpuk dalam rantai makanan, sehingga membahayakan organisme akuatik dan bahkan manusia yang bergantung pada sumber daya air tersebut (R. et al., 2022). Berbagai metode remediasi telah dikembangkan untuk mengatasi masalah ini, meliputi pendekatan fisik, kimia, dan biologis. Namun, kenyataannya setiap metode memiliki keterbatasan yang tidak mudah diatasi.

Metode fisik seperti adsorpsi dengan karbon aktif atau zeolit memang efektif menyerap logam berat, tetapi biaya yang tinggi dan kesulitan dalam mengembalikan atau meregenerasi bahan penyerap membatasi penggunaannya secara luas (C et al., 2023). Proses filtrasi modern, seperti *reverse* osmosis dan ultrafiltrasi, mampu menghilangkan logam dengan tingkat efisiensi yang tinggi, tetapi permasalahan *fouling* membran dan konsumsi energi yang besar sering menjadi kendala untuk penerapan skala besar (Wang & Chadwick, 2024).

Sementara itu, metode kimiawi dengan menggunakan pengendap seperti hidroksida dan sulfida dapat mengendapkan logam berat dengan cepat. Namun, hasilnya berupa lumpur beracun yang harus dikelola secara hati-hati agar tidak menimbulkan masalah baru (Vardhan et al., 2019). Selain itu, penggunaan agen kimia pereduksi, seperti natrium borohidrida, memiliki risiko pencemaran sekunder dan membutuhkan pengendalian kondisi reaksi yang sangat ketat (Kapepula & Luis, 2024).

Dalam ranah biologi, penggunaan mikroorganisme seperti *Pseudomonas* dan *Bacillus* menawarkan pendekatan yang menjanjikan dengan mekanisme biosorpsi dan biopresipitasi. Namun, penerapan mikroba ini di lingkungan alam menghadapi tantangan besar karena populasi mikroorganisme sering tidak stabil dan sangat bergantung pada kondisi lingkungan yang sulit dikontrol (C et al., 2023).

Di tengah tantangan tersebut, fitoremediasi dengan tanaman air seperti eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) muncul sebagai solusi yang lebih alami, ramah lingkungan, dan hemat biaya. Tanaman ini memiliki kemampuan luar biasa dalam menyerap logam Pb dan Cu melalui sistem akar dan daun secara signifikan (R. et al., 2022). Selain itu, pertumbuhan *Eichhornia crassipes* yang cepat dan toleransi terhadap kondisi lingkungan yang tercemar menjadikannya kandidat ideal untuk remediasi dalam berbagai kondisi tanpa perlu perawatan intensif (Raji et al., 2023). Keunggulan lainnya, metode ini tidak memerlukan bahan kimia tambahan sehingga tidak menghasilkan limbah berbahaya yang memerlukan pengolahan khusus (Noman et al., 2022).

Meski demikian, fitoremediasi konvensional masih menghadapi kendala dalam mengendalikan pertumbuhan tanaman dan optimalisasi kondisi lingkungan agar kapasitas penyerapannya maksimal. Untuk itu, pendekatan *in vitro* diperkenalkan sebagai inovasi yang memungkinkan pengendalian parameter lingkungan secara lebih akurat, seperti pH, suhu, dan konsentrasi logam, demi meningkatkan efisiensi akumulasi logam oleh tanaman (Monroy-Licht et al., 2024).

Metode ini juga memungkinkan pemantauan pertumbuhan tanaman dan akumulasi logam berat secara *real-time* menggunakan teknologi analisis laboratorium, seperti spektrofotometri serapan atom (Kapepula & Luis, 2024). Dengan pengaturan yang lebih terkontrol, variabilitas dari faktor lingkungan luar seperti gangguan organisme lain dan perubahan kualitas air dapat dieliminasi (Aryal, 2024).

Melalui simulasi *Eichhornia crassipes* dalam media cair yang mengandung logam Pb dan Cu dengan berbagai konsentrasi, kondisi pertumbuhan dan akumulasi logam dapat diamati secara sistematis. Dengan begitu, kondisi optimal untuk remediasi yang efektif dapat diidentifikasi dan diaplikasikan (Wang & Chadwick, 2024).

Pendekatan ini tidak hanya menawarkan metode remediasi yang lebih efisien, tetapi juga memberikan harapan untuk solusi berkelanjutan dan aplikatif dalam menangani pencemaran logam berat di perairan. Penelitian ini diharapkan dapat mendorong pengembangan teknologi fitoremediasi yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis, sekaligus memberikan kontribusi nyata dalam pelestarian ekosistem perairan (AL-Janabi et al., 2021).

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas tanaman eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) dalam remediasi logam berat timbal (Pb) dan tembaga (Cu) menggunakan metode *in vitro* dalam sistem larutan *Hoagland*. Larutan *Hoagland* digunakan sebagai media tumbuh karena mengandung unsur hara esensial yang mendukung pertumbuhan tanaman dan telah banyak digunakan dalam penelitian fitoremediasi (R. et al., 2022). Kontaminasi logam berat dilakukan dengan menambahkan Pb dan Cu ke dalam larutan dengan konsentrasi masing-masing 100 mg/L, yang disiapkan dari senyawa standar larutan logam (Noman et al., 2022).

Tanaman *Eichhornia crassipes* yang digunakan diperoleh dari kolam genangan air di Desa Wedomartani, Sleman, Yogyakarta. Pemilihan tanaman dilakukan berdasarkan keseragaman morfologi, meliputi berat tanaman (60–70 gram), jumlah daun, dan densitas akar, guna memastikan homogenitas dalam percobaan (Ayaz et al., 2020). Sebelum digunakan dalam eksperimen, tanaman menjalani proses aklimasi selama 6 hari dalam dua tahap: tahap pertama dilakukan dengan merendam tanaman dalam air selama 3 hari tanpa pergantian air untuk memungkinkan adaptasi awal, sedangkan tahap kedua dilakukan dengan menumbuhkan tanaman dalam larutan *Hoagland* selama 3 hari guna meningkatkan stabilitas fisiologisnya sebelum terpapar logam berat (Wang & Chadwick, 2024).

Eksperimen fitoremediasi dilakukan dalam reaktor berbahan kaca dengan berdimensi panjang 40 cm, lebar 25 cm dan tinggi 30 cm yang berisi larutan *Hoagland* yang telah ditambahkan Pb dan Cu diperoleh dari $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ dan CuSO_4 sebagai precursor. Siklus pencahayaan dalam reaktor diatur selama 18 jam terang dan 6 jam gelap, rentang pH 5.5–6.0 dipilih untuk mengoptimalkan adsorpsi dan bioakumulasi Pb dan Cu, sejalan dengan toleransi fisiologis *Eichhornia crassipes* (Monroy-Licht et al., 2024). Sebagai kontrol *Eichhornia crassipes* ditanam dalam kondisi serupa tanpa penambahan logam berat untuk mengidentifikasi pengaruh spesifik logam terhadap proses fitoremediasi. Percobaan berlangsung selama 7 hari dengan pemantauan harian terhadap perubahan konsentrasi logam dalam larutan untuk menilai efisiensi remediasi (Ansari et al., 2020).

Analisis sampel dilakukan untuk mengukur kandungan klorofil, koefisien bioakumulasi (KB) dan faktor translokasi (FT), serta konsentrasi logam dalam jaringan tanaman. Kandungan klorofil ditentukan melalui ekstraksi menggunakan pelarut organik (aseton) dan dianalisis dengan spektrofotometer pada panjang gelombang tertentu untuk mengukur kandungan klorofil a dan b (Aziz et al., 2023). Koefisien bioakumulasi dihitung berdasarkan rasio konsentrasi logam di akar terhadap konsentrasi di air, sedangkan faktor translokasi ditentukan dari rasio konsentrasi logam di daun terhadap akar, guna mengevaluasi sejauh mana logam berat berpindah dalam jaringan tanaman (Rai, 2008). Untuk analisis kandungan logam dalam tanaman, sampel tanaman kering didigesti secara

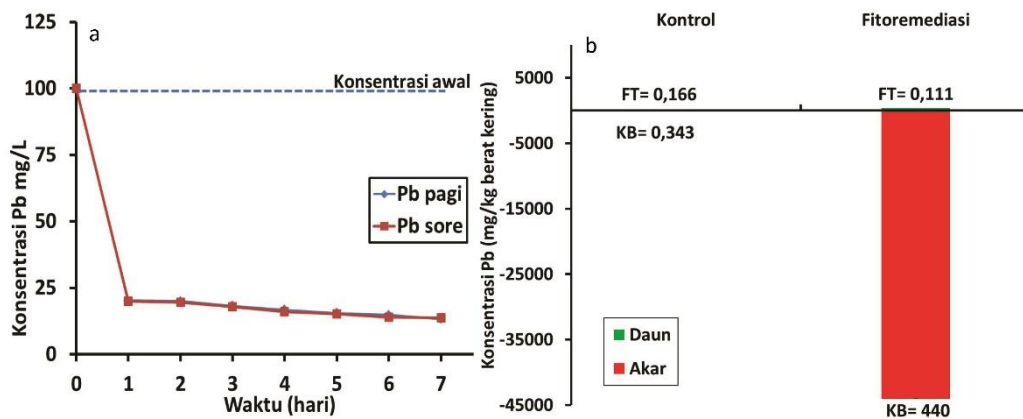
asam menggunakan HNO_3 pekat dengan pemanasan hingga mineralisasi sempurna, kemudian diencerkan dan difiltrasi untuk persiapan analisis AAS (Novita et al., 2019).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini mengkaji efektivitas penyerapan logam berat, khususnya timbal (Pb) dan tembaga (Cu), oleh tanaman eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) dengan menggunakan pendekatan fitoremediasi secara *in vitro*. Analisis konsentrasi logam yang terserap oleh tanaman dilakukan menggunakan spektroskopi serapan atom (SSA), yang telah terbukti sebagai metode yang akurat dalam mendeteksi logam berat dalam sampel biologis (Raji et al., 2023). Selain itu, untuk mengevaluasi dampak paparan logam berat terhadap kondisi fisiologis tanaman, kandungan klorofil diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis *double beam*, yang memungkinkan kuantifikasi pigmen fotosintesis secara presisi melalui panjang gelombang tertentu (Aziz et al., 2023). Dengan kombinasi kedua teknik analisis ini, penelitian ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai mekanisme akumulasi dan respons fisiologis *Eichhornia crassipes* terhadap kontaminasi Pb dan Cu, serta mengevaluasi efektivitas metode *in vitro* dalam meningkatkan kapasitas fitoremediasi tanaman tersebut (Odjegba & Fasidi, 2007).

3.1 Fitoremediasi

Fitoremediasi merupakan teknik bioremediasi yang menggunakan tanaman untuk menyerap, mentranslokasikan, atau menstabilkan kontaminan dalam lingkungan perairan dan tanah. Dalam penelitian ini, *Eichhornia crassipes* digunakan sebagai agen fitoremediasi untuk menyerap logam berat timbal (Pb) dan tembaga (Cu) dari limbah cair (Flafel et al., 2024). Proses migrasi ion logam dalam sistem fitoremediasi dianalisis melalui pengambilan sampel air dari reaktor pada satu titik dalam dua waktu berbeda setiap hari selama tujuh hari percobaan. Hasil akumulasi Pb dan Cu dalam tanaman disajikan pada Gambar 1(a) dan 1(b). Efisiensi fitoremediasi bergantung pada tiga mekanisme utama, yaitu penyerapan oleh akar, translokasi logam ke bagian lain tanaman, serta lokalisasi logam dalam sel tertentu untuk menimalisir toksisitas yang dapat menghambat proses metabolisme tanaman (Noman et al., 2022).



Gambar 1. Migrasi ion logam (a), penyerapan logam Pb (b).

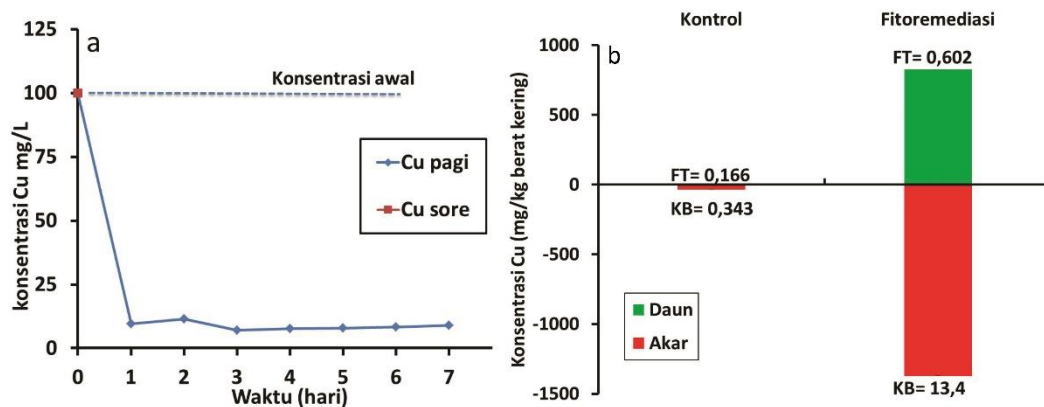
Gambar 1(a) menunjukkan pola migrasi ion Pb selama proses fitoremediasi menggunakan *Eichhornia crassipes*. Pada 24 jam pertama waktu kontak, terjadi penurunan konsentrasi ion Pb sebesar lebih dari 75%, dari konsentrasi awal 100 mg/L menjadi sekitar 23–25 mg/L, sebagaimana ditunjukkan pada grafik. Penurunan tajam ini

diakibatkan oleh pengendapan Pb^{2+} menjadi $Pb(OH)_2$ akibat penambahan larutan NaOH 16 N, yang efektif menurunkan toksisitas ion logam berat serta mempertahankan viabilitas tanaman dalam sistem fitoremediasi (Chen et al., 2024).

Pada hari-hari berikutnya, laju penyerapan Pb oleh tanaman cenderung melambat, menunjukkan ada kejenuhan hingga hari ke-7. Perpindahan ion Pb dari media tanam ke jaringan tanaman ditandai dengan perubahan morfologi, yaitu munculnya daun muda dengan tulang daun berwarna kekuningan, yang mengindikasikan adanya stres akibat akumulasi logam berat dalam jaringan tanaman (Raji et al., 2023)

Koefisien Biokumulasi (KB) dihitung sebagai rasio konsentrasi logam dalam jaringan tanaman terhadap konsentrasi dalam larutan, sedangkan Faktor Translokasi (FT) merupakan rasio konsentrasi logam di daun terhadap di akar; nilai KB menunjukkan kemampuan akumulasi, dan FT mencerminkan efisiensi transportasi logam dalam tanaman (Eid et al., 2021).

Gambar 1(b) menunjukkan distribusi logam berat dalam tanaman, dengan perbedaan tingkat akumulasi antara akar dan daun. Hasil analisis menunjukkan bahwa akumulasi ion Pb pada akar lebih tinggi dibandingkan dengan daun, mengindikasikan bahwa *Eichhornia crassipes* lebih efektif dalam menyerap dan menahan logam berat pada sistem akar dibandingkan dengan transpor ke jaringan daun (Eid et al., 2021). Fenomena ini sejalan dengan mekanisme eksklusi dan fitostabilisasi yang sering terjadi pada tanaman hiperakumulator dalam sistem fitoremediasi (Aryal, 2024).



Gambar 2. Migrasi ion logam (a), penyerapan logam Cu (b).

Gambar 2(a) menunjukkan pola penyerapan ion Cu oleh *Eichhornia crassipes* dalam proses fitoremediasi. Pada 24 jam pertama, terjadi penurunan konsentrasi Cu yang signifikan, yaitu sebesar 57,22% pada pengambilan sampel pukul 08:00 dan 59,28% pada pukul 16:00. Namun, pada 24 jam berikutnya, terjadi fluktuasi, dengan peningkatan konsentrasi Cu sebesar 1,8 mg/L pada pagi hari, sementara pada sore hari hanya mengalami sedikit penurunan sebesar 0,16 mg/L.

Tren fluktuatif ini berlanjut hingga hari ke-7, fluktuasi penyerapan Cu setelah 24 jam disebabkan oleh jenuh situs adsorpsi, adaptasi fisiologis tanaman, perubahan spesiasi kimia logam, pelepasan kembali Cu, serta aktivitas mikroorganisme di media tanam (Ansari et al., 2020). NaOH digunakan untuk menaikkan pH, namun pH di atas 6,5 dapat menyebabkan pembentukan endapan yang berfungsi mencegah kematian tanaman (Cui et al., 2024)

Gambar 2(b) menunjukkan distribusi logam Cu dalam tanaman, dengan tingkat akumulasi yang lebih tinggi pada akar dibandingkan daun. Hal ini tercermin dari nilai koefisien bioakumulasi (KB) yang lebih tinggi di akar, sedangkan faktor translokasi (FT) menunjukkan bahwa hanya sedikit Cu yang berpindah ke daun. Cu sebagai logam esensial

memiliki kecenderungan membentuk kompleks dengan asam amino seperti sistein, asam glutamat, dan glisin, serta berikatan dengan gugus sulfhidril (-SH), karboksil (-OH), dan amina (-NH₂), yang membantu detoksifikasi dalam jaringan tanaman (Yruela, 2009).

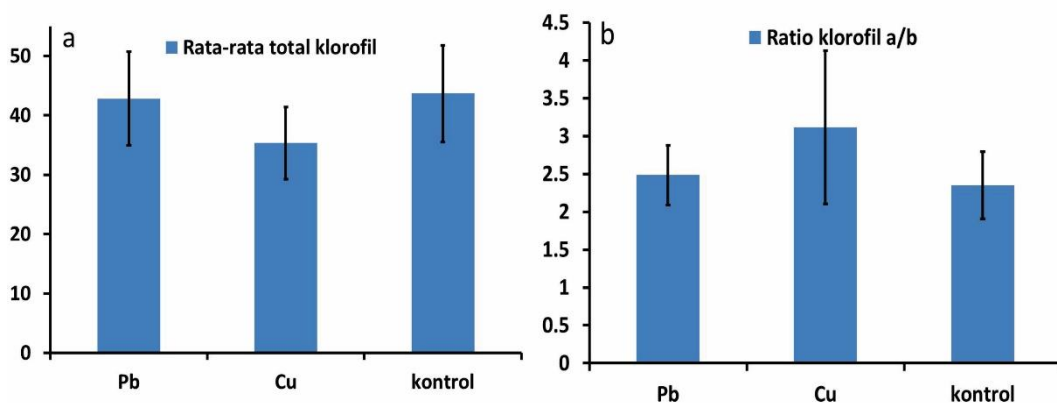
Perbedaan sifat antara Pb dan Cu berkontribusi terhadap pola akumulasi yang berbeda dalam tanaman. Pb, sebagai logam berat non-esensial, memiliki daya larut rendah dan kecenderungan untuk terikat kuat dalam jaringan akar melalui interaksi dengan lignin dan selulosa, sehingga translokasinya ke jaringan lain sangat terbatas (Odjegba & Fasidi, 2007). Sebaliknya, Cu memiliki tingkat translokasi yang lebih tinggi, mendukung pertumbuhan jaringan tanaman, terutama daun, yang berperan dalam fotosintesis (Aryal, 2024).

Selain itu, Cu juga berfungsi sebagai kofaktor enzim dalam kloroplas dan mitokondria, sehingga dibutuhkan dalam jumlah tertentu untuk aktivitas metabolisme tanaman (Yruela, 2009). Logam Pb cenderung terakumulasi lebih tinggi di akar karena mekanisme eksklusi dan fitostabilisasi yang membatasi pergerakannya ke bagian tanaman lain, sedangkan Cu memiliki faktor translokasi yang lebih tinggi ke daun akibat perannya sebagai unsur esensial dan kemampuannya membentuk kompleks dengan asam amino yang memudahkan transport melalui jaringan xilem (Yilwa et al., 2023).

3.2 Toleransi Stress pada Tanaman Eceng Gondok (*Eichhornia Crassipes*)

Kekurangan air berdampak signifikan pada pertumbuhan tanaman, memengaruhi proses fisiologis, biokimia, anatomi, dan morfologi. Salah satu respons fisiologis utama terhadap defisit air adalah penurunan konsentrasi klorofil daun, yang dapat disebabkan oleh gangguan sintesis klorofil, penurunan aktivitas enzim Rubisco, serta terhambatnya penyerapan nutrisi esensial seperti nitrogen dan magnesium yang berperan dalam pembentukan klorofil (Aziz et al., 2023). Klorofil berperan dalam menyerap cahaya untuk fotosintesis, sehingga penurunan kadar klorofil secara langsung memengaruhi efisiensi fotosintesis dan pertumbuhan tanaman secara keseluruhan (Grajek et al., 2020).

Studi sebelumnya menunjukkan bahwa kekurangan air pada kelapa kerdil hijau Brazilia (*Cocos nucifera L. nana*) mengakibatkan penurunan konsentrasi klorofil per satuan luas daun, yang berdampak pada efisiensi fotosintesis tanaman (Gomes & Prado, 2007). Selain itu, klorofil daun sering digunakan sebagai indikator ketidakseimbangan metabolisme dan gangguan fotosintesis akibat stres lingkungan, termasuk paparan logam berat. Logam berat diketahui dapat menghambat fotosintesis dengan merusak struktur klorofil, yang merupakan pusat utama gangguan metabolisme akibat polutan (Zulfiqar et al., 2019). Hasil analisis kandungan klorofil dalam penelitian ini ditampilkan pada Gambar 3(a) untuk klorofil total dan Gambar 3(b) untuk rasio klorofil a/b.



Gambar 3. Hasil analisis klorofil total (a), rasio klorofil a/b *Eichhornia crassipes* (b)

Pb merupakan logam berat dengan kelarutan rendah, bersifat pasif, dan memiliki daya translokasi yang terbatas dari akar ke jaringan tanaman lainnya (Monroy-Licht et al., 2024). Gambar 3(a) menunjukkan bahwa konsentrasi klorofil total pada media Cu lebih rendah dibandingkan media Pb dan kontrol, dengan nilai masing-masing 35,34 mg/mL, 42,84 mg/mL, dan 43,68 mg/mL. Penurunan kadar klorofil pada media Cu menunjukkan bahwa logam ini lebih berdampak negatif pada proses fisiologis tanaman dibandingkan Pb, yang sejalan dengan temuan sebelumnya bahwa penurunan klorofil total berkaitan dengan meningkatnya cekaman kekeringan dan penurunan aktivitas fotosintesis (Noman et al., 2022).

Tembaga (Cu) merupakan unsur mikro yang esensial bagi tumbuhan, namun dalam konsentrasi berlebih dapat bersifat toksik dan mengganggu proses fotosintesis. Toksisitas Cu terjadi melalui beberapa mekanisme, antara lain penggantian ion Mg^{2+} dalam struktur klorofil yang menyebabkan disfungsi penyerapan cahaya, induksi stres oksidatif melalui pembentukan reactive oxygen species (ROS) yang merusak membran tilakoid dan kloroplas, serta penghambatan aktivitas enzim Rubisco akibat gangguan pada struktur aktifnya. Selain itu, Cu juga mengganggu rantai transport elektron pada fotosistem II dengan menonaktifkan protein penting seperti plastosianin dan feredoksin, sehingga menurunkan efisiensi produksi ATP dan NADPH yang krusial bagi proses fiksasi karbon.

Kombinasi mekanisme ini menyebabkan penurunan kadar klorofil dan gangguan signifikan pada performa fotosintetik tanaman (Cruz et al., 2022). Gambar 3(b) menunjukkan bahwa rasio klorofil a/b pada media Cu sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan media Pb dan kontrol, menunjukkan respons adaptif tanaman untuk meminimalisir dampak stres dengan mengalokasikan asimilat baru ke akar dan mengatur derajat pembukaan stomata untuk mengurangi kehilangan air melalui transpirasi (Rodríguez et al., 2018).

Meskipun secara visual terjadi penurunan kadar klorofil total pada perlakuan Cu dibanding kontrol, dan peningkatan rasio klorofil a/b, interpretasi ini belum dapat dinyatakan signifikan secara statistik karena belum dilakukan uji ANOVA. Besarnya error bar pada perlakuan Cu juga menunjukkan variabilitas biologis yang tinggi, kemungkinan akibat respon stres yang tidak seragam antar tanaman satu dengan lainnya (Wang et al., 2025). Peningkatan rasio klorofil a/b pada media Cu mengindikasikan stres fisiologis yang memicu perubahan komposisi pigmen fotosintetik sebagai bentuk adaptasi tanaman untuk mempertahankan fungsi fotosintesis dalam kondisi lingkungan yang toksik (Pluciński et al., 2023).

Mekanisme adaptasi ini mendukung pertumbuhan akar yang lebih signifikan dibandingkan tajuk, sehingga meningkatkan kapasitas tanaman dalam menyerap air dan mengurangi laju transpirasi selama periode stres (Zulfiqar et al., 2019). Temuan ini memperkuat peran penting klorofil sebagai indikator ketidakseimbangan metabolisme akibat paparan logam berat, sekaligus menunjukkan potensi tanaman *Eichhornia crassipes* dalam mengatasi stres lingkungan melalui mekanisme fisiologis dan morfologis (Ali et al., 2020).

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa metode *in vitro* dengan menggunakan *Eichhornia crassipes* efektif dalam menyerap dan menurunkan konsentrasi logam berat timbal (Pb) dan tembaga (Cu) dalam lingkungan perairan. Dibandingkan dengan metode remediasi lainnya, fitoremediasi menggunakan *Eichhornia crassipes* menawarkan metode yang lebih ekonomis, ramah lingkungan, dan berkelanjutan dengan mekanisme penyerapan yang dominan terjadi pada akar serta terbatasnya translokasi logam ke

jaringan daun. Selain itu, hasil penelitian juga mengonfirmasi bahwa logam Cu memiliki dampak lebih signifikan terhadap gangguan fisiologis tanaman dibandingkan Pb, yang tercermin dari penurunan kadar klorofil total dan respons adaptif tanaman dalam mengatur distribusi asimilat serta pembukaan stomata untuk mengurangi cekaman lingkungan. Dengan adanya optimasi kondisi lingkungan dalam metode *in vitro*, efisiensi fitoremediasi dapat ditingkatkan melalui pengendalian pH, suhu, dan konsentrasi logam berat, sehingga meningkatkan kapasitas bioakumulasi tanaman.

Sebagai langkah pengembangan lebih lanjut, penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada optimasi parameter lingkungan seperti komposisi nutrisi dalam media tumbuh serta kombinasi dengan mikroorganisme yang berpotensi meningkatkan efisiensi bioakumulasi. Selain itu, studi lebih lanjut diperlukan untuk mengevaluasi efektivitas metode ini dalam skala lapangan, termasuk kajian terhadap biodegradasi tanaman setelah remediasi untuk memastikan keberlanjutan sistem pengolahan limbah berbasis fitoremediasi. Implementasi teknologi berbasis nano-material atau rekayasa genetik dalam meningkatkan daya serap *Eichhornia crassipes* terhadap logam berat juga dapat menjadi arah penelitian yang prospektif dalam meningkatkan efektivitas dan efisiensi fitoremediasi di masa depan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Kimia, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, yang telah memberikan fasilitas dan dukungan teknis dalam pelaksanaan penelitian ini. Penulis juga mengapresiasi bimbingan dan kontribusi dari para dosen, teknisi laboratorium, serta rekan-rekan peneliti yang turut serta dalam proses eksperimen dan analisis data. Dukungan ini sangat berperan dalam kelancaran penelitian dan penyelesaian studi ini.

REFERENCES

- Ali, S., Abbas, Z., Rizwan, M., Zaheer, I. E., Yavaş, İ., Ünay, A., Abdel-DAIM, M. M., Bin-Jumah, M., Hasanuzzaman, M., & Kalderis, D. (2020). Application of Floating Aquatic Plants in Phytoremediation of Heavy Metals Polluted Water: A Review. *Sustainability*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/su12051927>
- AL-Janabi, Q. A. A., Al-Kalidy, S. K. A., & Hameed, Z. B. (2021). Effects of heavy metals on physiological status for *Schoenoplectus litoralis* & *Salvinia natans* L. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 722(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/722/1/012012>
- Ansari, A. A., Naeem, M., Gill, S. S., & AlZuaibr, F. M. (2020). Phytoremediation of contaminated waters: An eco-friendly technology based on aquatic macrophytes application. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 46(4), 371–376. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejar.2020.03.002>
- Aryal, M. (2024). Phytoremediation strategies for mitigating environmental toxicants. *Heliyon*, 10(19), e38683. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38683>
- Ayaz, T., Khan, S., Khan, A. Z., Lei, M., & Alam, M. (2020). Remediation of industrial wastewater using four hydrophyte species: A comparison of individual (pot experiments) and mix plants (constructed wetland). *Journal of Environmental Management*, 255, 109833. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109833>
- Aziz, R. A., Yiwen, M., Saleh, M., Salleh, M. N., Gopinath, S. C. B., Giap, S. G. E., Chinni, S. V., & Gobinath, R. (2023). Bioaccumulation and Translocation of Heavy Metals in Paddy (*Oryza sativa* L.) and Soil in Different Land Use Practices. *Sustainability*, 15(18). <https://doi.org/10.3390/su151813426>

- C, F. C., Kamalesh, T., Kumar, P. S., & Rangasamy, G. (2023). A Critical Review on the Sustainable Approaches for the Removal of Toxic Heavy Metals from Water Systems. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(22), 8575–8601. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c00709>
- Chen, F., Zhang, S., Chen, Z., Zhang, Y., & Cao, B. (2024). Phytoremediation of Toxic Lead from Contaminated Soil Using *Neyraudia reynaudiana*: Soil of Xuzhou as a Case Study. *Agronomy*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/agronomy14010118>
- Cruz, F. J. R. J. R., Cruz Ferreira, R. L. da, Conceição, S. S., Ugulino Lima, E., Oliveira Neto, C. F. de, Galvão, J. R., da Cunha Lopes, S., & Matos Viegas, I. de J. (2022). Copper Toxicity in Plants: Nutritional, Physiological, and Biochemical Aspects. In J. N. Kimatu (Ed.), *Advances in Plant Defense Mechanisms*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.105212>
- Cui, H., Xu, Z., Guo, T., Hu, S., Xia, R., Zhang, S., Wang, Y., & Zhou, J. (2024). Calcium Hydroxide–Phosphate-Modified Fly Ash Enhances the Adsorption and Stabilization of Soil Lead and Cadmium. *Agronomy*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/agronomy14122905>
- Eid, E. M., Shaltout, K. H., Almuqrin, A. H., Aloraini, D. A., Khedher, K. M., Taher, M. A., Alfarhan, A. H., Picó, Y., & Barcelo, D. (2021). Uptake prediction of nine heavy metals by *Eichhornia crassipes* grown in irrigation canals: A biomonitoring approach. *Science of The Total Environment*, 782, 146887. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146887>
- Flafel, H. M., Rafatullah, M., Lalung, J., Kapoor, R. T., Siddiqui, M. R., & Qutob, M. (2024). Enhancing the efficiency of phytoremediation using water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for 2,4-dichlorophenoxyacetic acid removal with modified biochar as an assisted agent. *Chemosphere*, 367, 143591. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143591>
- Gomes, F. P., & Prado, C. H. B. A. (2007). Ecophysiology of coconut palm under water stress. In *Braz. J. Plant Physiol* (Vol. 19, Issue 4).
- Grajek, H., Rydzynski, D., Piotrowicz-Cieślak, A., Herman, A., Maciejczyk, M., & Wieczorek, Z. (2020). Cadmium ion-chlorophyll interaction – Examination of spectral properties and structure of the cadmium-chlorophyll complex and their relevance to photosynthesis inhibition. *Chemosphere*, 261, 127434. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127434>
- Kapepula, V. L., & Luis, P. (2024). Removal of heavy metals from wastewater using reverse osmosis. In *Frontiers in Chemical Engineering* (Vol. 6). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fceng.2024.1334816>
- Monroy-Licht, A., Carranza-Lopez, L., De la Parra-Guerra, A. C., & Acevedo-Barrios, R. (2024a). Unlocking the potential of *Eichhornia crassipes* for wastewater treatment: phytoremediation of aquatic pollutants, a strategy for advancing Sustainable Development Goal-06 clean water. In *Environmental Science and Pollution Research* (Vol. 31, Issue 31, pp. 43561–43582). Springer. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33698-9>
- Monroy-Licht, A., Carranza-Lopez, L., De la Parra-Guerra, A. C., & Acevedo-Barrios, R. (2024b). Unlocking the potential of *Eichhornia crassipes* for wastewater treatment: phytoremediation of aquatic pollutants, a strategy for advancing Sustainable Development Goal-06 clean water. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(31), 43561–43582. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33698-9>
- Noman, M. A., Feng, W., Zhu, G., Hossain, Mb. B., Chen, Y., Zhang, H., & Sun, J. (2022). Bioaccumulation and potential human health risks of metals in commercially important fishes and shellfishes from Hangzhou Bay, China. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08471-y>
- Novita, V. Z., Moersidik, S. S., & Priadi, C. R. (2019). Phytoremediation Potential of *Pistia stratiotes* to Reduce High Concentration of Copper (Cu) in Acid Mine Drainage. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 355(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/355/1/012063>
- 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>

- Pluciński, B., Nowicka, B., Waloszek, A., Rutkowska, J., & Strzałka, K. (2023). The role of antioxidant response and nonphotochemical quenching of chlorophyll fluorescence in long-term adaptation to Cu-induced stress in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(25), 67250–67262. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27175-y>
- R., J., Gurunathan, B., K. S., Varjani, S., Ngo, H. H., & Gnansounou, E. (2022). Advancements in heavy metals removal from effluents employing nano-adsorbents: Way towards cleaner production. *Environmental Research*, 203, 111815. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111815>
- Rai, P. K. (2008). Heavy Metal Pollution in Aquatic Ecosystems and its Phytoremediation using Wetland Plants: An ecosustainable approach. *International Journal of Phytoremediation*, 10(2), 133–160. <https://doi.org/10.1080/15226510801913918>
- Raji, Z., Karim, A., Karam, A., & Khalloufi, S. (2023). Adsorption of Heavy Metals: Mechanisms, Kinetics, and Applications of Various Adsorbents in Wastewater Remediation—A Review. *Waste*, 1(3), 775–805. <https://doi.org/10.3390/waste1030046>
- Rodríguez, F. E., Laporte, D., González, A., Mendez, K. N., Castro-Nallar, E., Meneses, C., Huidobro-Toro, J. P., & Moenne, A. (2018). Copper-induced increased expression of genes involved in photosynthesis, carotenoid synthesis and C assimilation in the marine alga *Ulva compressa*. *BMC Genomics*, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s12864-018-5226-4>
- Vardhan, K. H., Kumar, P. S., & Panda, R. C. (2019). A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives. *Journal of Molecular Liquids*, 290, 111197. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111197>
- Wang, Y., & Chadwick, M. A. (2024). The Assessment of Heavy Metal Accumulation and Risks in Urban Rivers and Sediments of China's Nine Major River Systems: A Meta-Analysis. *Environmental Processes*, 11(3), 43. <https://doi.org/10.1007/s40710-024-00720-8>
- Wang, Y., Chen, X., & Chen, J. (2025). Advances of the mechanism for copper tolerance in plants. *Plant Science*, 350, 112299. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2024.112299>
- Yilwa, V. M., Tochukwu, N. C., Chika, E. M., Ojodale, A. P., & Barde, D. T. (2023). Phytoremediation Indices of Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) Growing in Panteka Stream, Kaduna, Nigeria. *Asian Journal of Biology*, 19(3), 21–31. <https://doi.org/10.9734/ajob/2023/v19i3369>
- Yruela, I. (2009). Copper in plants: acquisition, transport and interactions. *Functional Plant Biology*, 36(5), 409–430. <https://doi.org/10.1071/FP08288>
- Zulfiqar, U., Farooq, M., Hussain, S., Maqsood, M., Hussain, M., Ishfaq, M., Ahmad, M., & Anjum, M. Z. (2019). Lead toxicity in plants: Impacts and remediation. *Journal of Environmental Management*, 250, 109557. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109557>