



Kinerja Fitoremediasi *Typha angustifolia* L dalam Menurunkan Konsentrasi Timbal dan Tembaga di Sungai Silugonggo Juwana

^{1*}Safira Asanu Lestari, ²Maria Ulfah, ³Endah Rita Sulistiya Dewi

^{1,2,3}Program Studi Pendidikan Biologi, Fakultas Matematika, Ilmu Pengetahuan Alam, dan Teknologi Informasi, Universitas PGRI Semarang, Semarang, Indonesia.

*Corresponding Author e-mail: safiraasanu45@gmail.com

Received: November 2025; Revised: November 2025; Accepted: December 2025; Published: December 2025

Abstrak: Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas *Typha angustifolia* L sebagai agen fitoremediasi dalam menurunkan kadar Pb dan Cu pada air sungai. Penelitian dilakukan menggunakan metode *true experiment* dengan Rancangan Acak Lengkap (RAL) tiga perlakuan biomassa, yaitu 0 g, 80 g, dan 160 g, masing-masing tiga ulangan, pada dua stasiun pengamatan yang diperlakukan terpisah. Inkubasi dilakukan selama tujuh hari dengan pengukuran kadar logam pada hari ke-0, ke-3, dan ke-7 menggunakan AAS. Hasil menunjukkan bahwa perlakuan biomassa 160 g memberikan efektivitas tertinggi. Pada hari ke-7, kadar Pb menurun sebesar 98,87% di Stasiun 1 dan 98,13% di Stasiun 2, sedangkan kadar Cu menurun sebesar 91,76% di Stasiun 1 dan 94,88% di Stasiun 2. Analisis ANOVA dan uji Tukey menunjukkan pengaruh perlakuan yang signifikan ($p < 0,05$). Disimpulkan bahwa *Typha angustifolia* L efektif sebagai agen fitoremediasi, dengan efektivitas yang meningkat seiring bertambahnya biomassa dan waktu kontak, sehingga berpotensi diaplikasikan sebagai solusi ramah lingkungan pengendalian pencemaran logam berat.

Kata Kunci: Fitoremediasi; *Typha angustifolia* L; timbal; tembaga; Sungai Silugonggo

Abstract: This study aimed to evaluate the effectiveness of *Typha angustifolia* L. as a phytoremediation agent in reducing Pb and Cu concentrations in river water. The research employed a true experimental method using a completely randomized design with three biomass treatments (0 g, 80 g, and 160 g), each conducted in triplicate at two independently treated observation stations. The incubation period lasted seven days, during which metal concentrations were measured on days 0, 3, and 7 using atomic absorption spectrophotometry (AAS). The results demonstrated that the 160 g biomass treatment achieved the highest remediation efficiency. On day 7, Pb concentrations were reduced by 98.87% at Station 1 and 98.13% at Station 2, while Cu concentrations decreased by 91.76% and 94.88% at Stations 1 and 2, respectively. Statistical analysis using ANOVA followed by Tukey's post hoc test indicated a significant effect of treatment on metal reduction ($p < 0.05$). It can be concluded that *Typha angustifolia* L. is effective as a phytoremediation agent, with remediation efficiency increasing with greater biomass and longer contact time, highlighting its potential application as an environmentally friendly solution for heavy metal pollution control.

Keywords: Phytoremediation; *Typha angustifolia* L; lead; copper; silugonggo river

How to Cite: Lestari, S. A., Ulfah, M., & Dewi, E. R. S. (2025). Kinerja Fitoremediasi *Typha angustifolia* L dalam Menurunkan Konsentrasi Timbal dan Tembaga di Sungai Silugonggo Juwana. *Bioscientist: Jurnal Ilmiah Biologi*, 13(4), 3165–3174. <https://doi.org/10.33394/bioscientist.v13i4.19383>



<https://doi.org/10.33394/bioscientist.v13i4.19383>

Copyright© 2025, Lestari et al
This is an open-access article under the CC-BY-SA License.



PENDAHULUAN

Pencemaran lingkungan, khususnya pencemaran air, merupakan permasalahan serius yang dihadapi Indonesia. Air dikatakan tercemar apabila mengandung zat pencemar organik maupun anorganik yang melebihi baku mutu yang telah ditetapkan. Kerugian ekonomi akibat pencemaran air di Indonesia diperkirakan mencapai puluhan triliun rupiah per tahun, yang mencakup peningkatan biaya kesehatan masyarakat, penurunan produktivitas, serta kerugian pada sektor perikanan dan pariwisata (KLHK, 2020). Selain dampak ekonomi, pencemaran air juga berpengaruh negatif terhadap keseimbangan ekosistem dan kesehatan organisme perairan (Alfin Fatwa M Afifudin et al., 2024). Polutan yang sering dijumpai di perairan meliputi limbah deterjen serta logam berat seperti timbal (Pb), tembaga (Cu), merkuri (Hg), dan kromium (Cr) yang bersifat toksik dan sulit terurai. Logam berat dikategorikan sebagai polutan prioritas

karena bersifat persisten di lingkungan, mudah terakumulasi dalam jaringan organisme (bioakumulasi), mengalami biomagnifikasi sepanjang rantai makanan, serta berisiko tinggi terhadap kesehatan manusia melalui konsumsi organisme perairan (Jaishankar *et al.*, 2014).

Sungai Silugonggo di Kabupaten Pati, Jawa Tengah, merupakan salah satu perairan yang mengalami pencemaran logam berat akibat aktivitas industri di sekitar daerah aliran sungai. Jenis industri yang berpotensi menjadi sumber Pb dan Cu antara lain industri pengolahan logam dan bengkel kapal skala kecil, industri pengecatan kapal dan pelapisan logam, serta industri tekstil yang menggunakan bahan kimia berbasis logam dalam proses produksinya. Penelitian menunjukkan bahwa kadar Pb dan Cu di sungai ini telah melampaui baku mutu air kelas II, yaitu standar kualitas air yang ditetapkan pemerintah untuk peruntukan rekreasi air, budidaya ikan air tawar, peternakan, dan irigasi, sehingga berpotensi menimbulkan dampak toksik bagi organisme perairan dan kesehatan manusia (Aina *et al.*, 2017). Kondisi serupa juga terjadi di negara berkembang seperti India dan Bangladesh, sementara negara maju telah menerapkan teknologi ramah lingkungan seperti *constructed wetlands* dan fitoremediasi untuk menurunkan pencemaran logam berat (Ali *et al.*, 2019).

Upaya pengendalian pencemaran air di berbagai negara, termasuk Indonesia, hingga saat ini masih banyak mengandalkan metode konvensional seperti pengendapan dan filtrasi, yang umumnya memerlukan biaya tinggi, konsumsi energi besar, serta kurang berkelanjutan dalam jangka panjang (Afifudin *et al.*, 2024). Dalam konteks global, keterbatasan metode konvensional tersebut mendorong berkembangnya pendekatan berbasis alam (*nature-based solutions*), salah satunya fitoremediasi, yang memanfaatkan kemampuan alami tumbuhan air dalam menyerap, mentranslokasikan, dan mengakumulasi logam berat dari perairan tercemar (Ali *et al.*, 2019). *Typha angustifolia* L dilaporkan memiliki toleransi tinggi terhadap kondisi lingkungan tercemar serta kemampuan akumulasi logam berat yang baik, sehingga berpotensi digunakan sebagai agen fitoremediasi (Basile *et al.*, 2012). Namun demikian, kajian mengenai efektivitas *Typha angustifolia* L pada kondisi sungai tropis di Indonesia, khususnya di Sungai Silugonggo, masih terbatas, terutama yang mengkaji pengaruh variasi biomassa tanaman terhadap penurunan kadar Pb dan Cu secara berkala. Oleh sebab itu, penelitian ini bertujuan menganalisis kemampuan *Typha angustifolia* L dengan variasi biomassa dalam menurunkan konsentrasi Pb dan Cu pada air Sungai Silugonggo selama periode pengamatan hari ke-0, ke-3, dan ke-7, sehingga diharapkan dapat menyediakan bukti ilmiah penerapan fitoremediasi pada sungai lokal, menjadi dasar pengelolaan daerah aliran sungai (DAS), serta memberikan rekomendasi biomassa tanaman yang efektif untuk mitigasi pencemaran logam berat.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode *true experiment* untuk menguji efektivitas *Typha angustifolia* L. dalam menurunkan kadar timbal (Pb) dan tembaga (Cu) pada air Sungai Silugonggo, Kecamatan Juwana, Kabupaten Pati. Penelitian dilaksanakan pada dua stasiun pengamatan, yaitu Stasiun 1 di Desa Bajomulyo dan Stasiun 2 di Desa Doropayung, yang diperlakukan secara terpisah. Rancangan penelitian yang digunakan adalah Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan tiga perlakuan biomassa tanaman, yaitu P0 (0 g), P1 (80 g), dan P2 (160 g), masing-masing dengan tiga ulangan. Unit percobaan berupa ember plastik berkapasitas 15 L yang masing-masing diisi 10 L air sungai, sehingga terdapat sembilan unit percobaan pada setiap stasiun

dan total 18 unit percobaan. Setiap unit diinkubasi bersama tanaman selama tujuh hari.

Sampel air sungai diambil berdasarkan penentuan stasiun pengamatan (*purposive sampling*), dengan pertimbangan karakteristik aktivitas di sekitar lokasi. Pengambilan sampel dilakukan pada hari ke-0, ke-3, dan ke-7 perlakuan. Tanaman *Typha angustifolia* L diambil dari habitat alaminya, dipilih yang sehat, berukuran relatif seragam, dan bebas kontaminan. Total biomassa tanaman yang digunakan sebanyak 1.200 g sesuai kebutuhan seluruh perlakuan. Analisis kadar Pb dan Cu dilakukan menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) setelah sampel air melalui tahap pengawetan dan preparasi sesuai prosedur standar APHA (2017). Efisiensi penurunan kadar logam dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Efisiensi penurunan (\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

Dengan C_0 sebagai konsentrasi awal logam (hari ke-0) dan C_t sebagai konsentrasi logam pada waktu pengamatan (hari ke-3 atau ke-7). Data konsentrasi logam dianalisis secara deskriptif dan statistik. Sebelum analisis inferensial, data diuji normalitas dan homogenitas. Pengaruh perlakuan biomassa terhadap penurunan kadar Pb dan Cu pada masing-masing waktu pengamatan dianalisis menggunakan One-Way ANOVA, kemudian dilanjutkan dengan uji Tukey apabila terdapat perbedaan nyata ($p < 0,05$). Analisis dilakukan terpisah untuk setiap stasiun pengamatan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran awal kadar Pb dan Cu Sungai Silugonggo yang disajikan pada Tabel 1 menunjukkan bahwa konsentrasi logam berat pada kedua stasiun berada jauh di atas baku mutu perairan kelas II. Pada Stasiun 1, kadar Pb mencapai 2,3 mg/L dan Cu sebesar 1,17 mg/L, sedangkan pada Stasiun 2 kadar Pb tercatat 1,28 mg/L dan Cu 0,86 mg/L. Jika dibandingkan dengan ambang batas baku mutu yang ditetapkan PP No. 22 Tahun 2021, yaitu 0,03 mg/L untuk Pb dan 0,02 mg/L untuk Cu, Kadar Timbal dan Tembaga di Sungai Silugonggo stasiun 1 dan 2 dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kadar awal Pb dan Cu di Sungai Silugonggo Stasiun 1 dan 2

Stasiun	Parameter	Satuan	Hasil Uji	Baku Mutu*
1	Pb	mg/L	2,3	0,03
	Cu	mg/L	1,17	0,02
2	Pb	mg/L	1,28	0,03
	Cu	mg/L	0,86	0,02

Sumber: *PP No 22 Tahun 2021

Tabel 1 menggambarkan besarnya tekanan pencemaran logam berat yang kemungkinan berasal dari aktivitas industri, perkapalan, serta pembuangan limbah domestik di sekitar kawasan sungai. Oleh karena itu, karakteristik awal ini menjadi acuan penting dalam mengevaluasi kinerja fitoremediasi menggunakan Tumbuhan *Typha angustifolia* L. Adapun biomassa tanaman Ekor Kucing yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu 0 gram (P0), 80 gram (P1), dan 160 gram (P2). Adanya perbedaan biomassa tersebut bertujuan untuk mengetahui kinerja biomassa tumbuhan *Typha angustifolia* L dalam menurunkan kadar Logam Berat Timbal dan Tembaga. Data penurunan timbal pada Stasiun 1 setelah diberikan perlakuan fitoremediasi menggunakan tumbuhan *Typha angustifolia* L dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Data penurunan Pb stasiun 1

Perlakuan	Hari Perlakuan	Rataan Kadar Awal	Rataan Kadar Akhir	Penurunan (%)
P0	H3	2,3	2,3	0
	H7		1,84	20
P1	H3		2,093	9
	H7		0,317	86,22
P2	H3		2,197	4,48
	H7		0,026	98,87

Data hasil penelitian terlebih dahulu diuji normalitas dan homogenitas. Hasil pengujian menunjukkan bahwa data penurunan kadar Pb pada hari ke-3 dan ke-7 di Stasiun 1 berdistribusi normal dan memiliki varians yang homogen, sehingga memenuhi asumsi untuk dilakukan analisis statistik parametrik. Selanjutnya dilakukan Uji Sidik Ragam (ANOVA) diperoleh hasil pada hari-3 diketahui $f_{hitung}(0,147) < f_{tabel}(5,143)$ pada perlakuan, artinya H_0 diterima dan H_1 ditolak sehingga tidak perlu dilakukan uji lanjutan, sedangkan pada hari-7 $f_{hitung}(2193,467) > f_{tabel}(5,143)$ pada perlakuan, artinya H_0 ditolak dan H_1 diterima sehingga perlu dilakukan uji lanjutan. Hasil Uji Sidik Ragam hari -7 Pb Stasiun 1 menunjukkan bahwa pemberian perlakuan berpengaruh secara signifikan, maka akan dilakukan Uji Lanjutan. Hasil uji lanjut Tukey pada taraf kepercayaan 95% menunjukkan bahwa seluruh perlakuan (P0, P1, dan P2) berada pada kelompok huruf yang berbeda, yaitu A, B, dan C. Hal ini menandakan bahwa setiap perlakuan berbeda nyata satu sama lain. Selanjutnya, Data penurunan timbal pada Stasiun 2 setelah diberikan perlakuan fitoremediasi menggunakan tumbuhan *Typha angustifolia* L dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Data penurunan Pb stasiun 2

Perlakuan	Hari Perlakuan	Rataan Kadar Awal	Rataan Kadar Akhir	Penurunan (%)
P0	H3	1,28	1,22	4,69
	H7		1,06	17,19
P1	H3		0,83	35,16
	H7		0,229	82,11
P2	H3		0,729	43,05
	H7		0,024	98,13

Data hasil penelitian terlebih dahulu diuji homogenitas. Hasil pengujian menunjukkan bahwa data penurunan kadar Pb pada hari ke-3 dan ke-7 di Stasiun 2 memiliki varians yang homogen, sehingga memenuhi asumsi homogenitas untuk analisis statistik parametrik. Selanjutnya dilakukan Uji Sidik Ragam (ANOVA) diperoleh hasil pada hari-3 diketahui $f_{hitung}(0,200) < f_{tabel}(5,143)$ pada perlakuan, artinya H_0 diterima dan H_1 ditolak sehingga tidak perlu dilakukan uji lanjutan, Sedangkan pada hari-7 diketahui $f_{hitung}(268,902) > f_{tabel}(5,143)$ pada perlakuan, artinya H_0 ditolak dan H_1 diterima sehingga perlu dilakukan uji lanjutan. Hasil uji lanjut Tukey pada taraf kepercayaan 95% menunjukkan bahwa perlakuan P0, P1, dan P2 berada pada kelompok huruf yang berbeda, yaitu A, B, dan C. Hal ini menunjukkan bahwa setiap perlakuan berbeda nyata satu sama lain.

Berikut ini adalah data penurunan tembaga pada Stasiun 1 setelah diberikan perlakuan fitoremediasi menggunakan tumbuhan *Typha angustifolia* L dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Data penurunan Cu stasiun 1

Perlakuan	Hari Perlakuan	Rataan Kadar Awal	Rataan Kadar Akhir	Penurunan (%)
P0	H3	1,17	1,12	4,27
	H7		1,09	6,84
P1	H3		0,592	49,40
	H7		0,308	73,68
P2	H3		0,499	57,35
	H7		0,0964	91,76

Berdasarkan data tersebut, perlakuan fitoremediasi menggunakan tanaman pada Stasiun 1 menunjukkan variasi efektivitas dalam menurunkan kadar Cu. Data selanjutnya diuji homogenitas, dan hasil pengujian menunjukkan bahwa data penurunan kadar Cu pada hari ke-3 dan ke-7 memiliki varians yang homogen, sehingga memenuhi asumsi homogenitas untuk analisis statistik parametrik. Selanjutnya, dilakukan Uji Sidik Ragam (ANOVA) diperoleh hasil pada hari-3 $f_{hitung} (0,903) < f_{tabel}(5,143)$ pada perlakuan, artinya H_0 diterima dan H_1 ditolak sehingga tidak perlu dilakukan uji lanjutan. Sedangkan pada hari-7 diketahui $f_{hitung} (17,086) > f_{tabel}(5,143)$ pada perlakuan, artinya H_0 ditolak dan H_1 diterima sehingga perlu dilakukan uji lanjutan. Hasil uji lanjut Tukey pada taraf kepercayaan 95% menunjukkan bahwa perlakuan P0 berada pada kelompok huruf A, sedangkan perlakuan P1 dan P2 berada pada kelompok huruf B. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan P0 berbeda nyata terhadap P1 dan P2, sementara perlakuan P1 dan P2 tidak menunjukkan perbedaan yang nyata. Selanjutnya, Data penurunan tembaga pada Stasiun 2 setelah diberikan perlakuan fitoremediasi menggunakan tumbuhan *Typha angustifolia* L dapat dilihat pada Tabel 5.

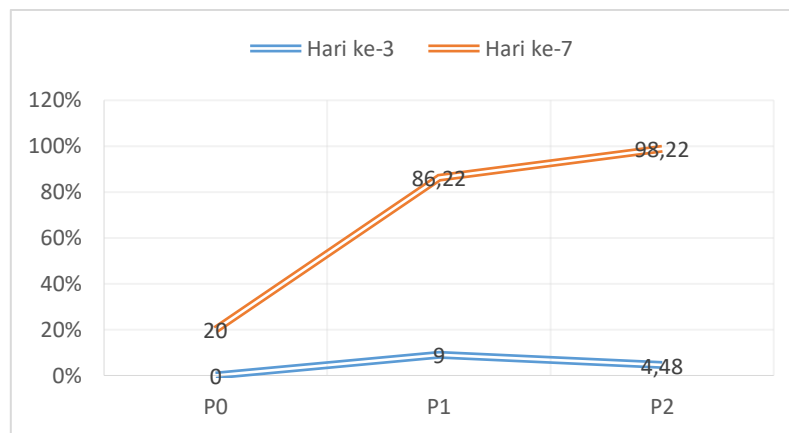
Tabel 5. Data penurunan Cu stasiun 2

Perlakuan	Hari Perlakuan	Rataan Kadar Awal	Rataan Kadar Akhir	Penurunan (%)
P0	H3	0,86	0,66	23,26
	H7		0,59	31,40
P1	H3		0,394	54,19
	H7		0,248	71,16
P2	H3		0,187	78,26
	H7		0,044	94,88

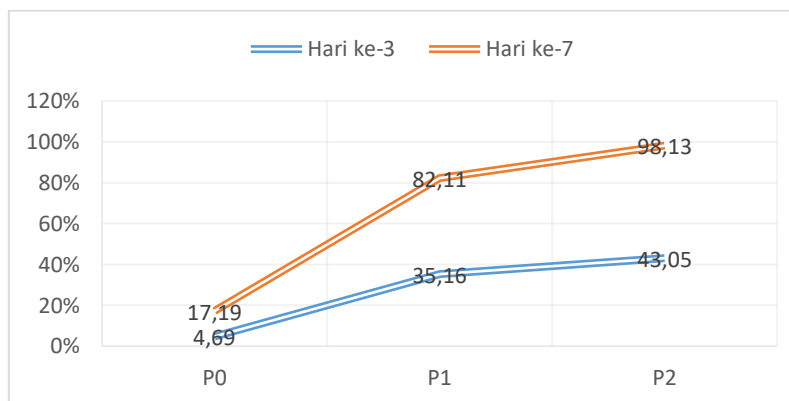
Data hasil penelitian selanjutnya diuji homogenitas. Hasil pengujian menunjukkan bahwa data penurunan kadar Cu pada hari ke-3 dan ke-7 di Stasiun 2 memiliki varians yang homogen, sehingga memenuhi asumsi homogenitas untuk analisis statistik parametrik. Selanjutnya, dilakukan Uji Sidik Ragam (ANOVA) diperoleh hasil pada hari-3 $f_{hitung} (1,880562041) < f_{tabel}(5,143)$ pada perlakuan, artinya H_0 diterima dan H_1 ditolak sehingga tidak perlu dilakukan uji lanjutan. Sedangkan pada hari-7 diketahui $f_{hitung} (43,96684732) > f_{tabel}(5,143)$ pada perlakuan, artinya H_0 ditolak dan H_1 diterima sehingga perlu dilakukan uji lanjutan.

Hasil uji lanjut Tukey pada taraf kepercayaan 95% menunjukkan bahwa perlakuan P0 berada pada kelompok huruf A, sedangkan perlakuan P1 dan P2 berada pada kelompok huruf B. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan P0 berbeda nyata terhadap P1 dan P2, sedangkan perlakuan P1 dan P2 tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan.

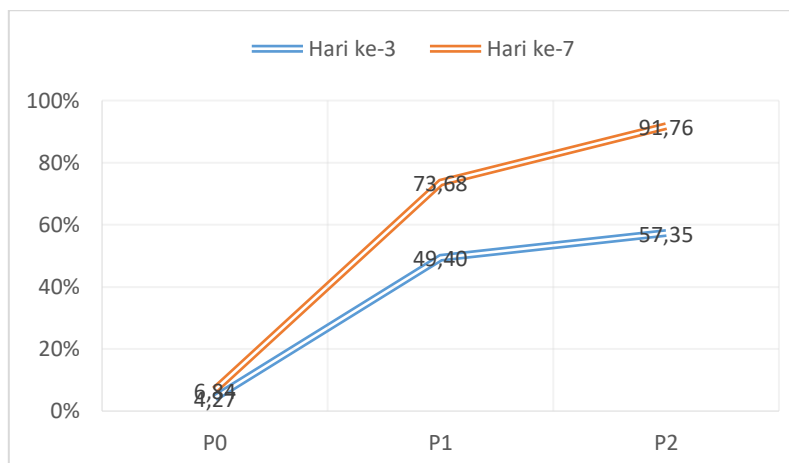
Perkembangan penurunan kadar timbal (Pb) dan tembaga (Cu) selama tujuh hari perlakuan fitoremediasi pada masing-masing stasiun pengamatan disajikan pada Gambar 1–4.



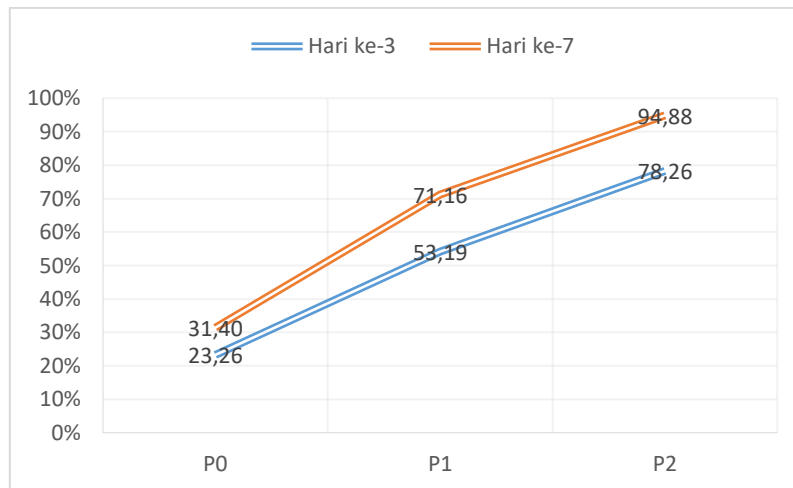
Gambar 1. Persentase penurunan kadar Pb stasiun 1



Gambar 2. Presentase penurunan kadar Pb stasiun 2



Gambar 3. Presentase penurunan kadar Cu stasiun 1



Gambar 5. Presentase penurunan kadar Cu stasiun 2

Berdasarkan grafik hasil penelitian, terlihat bahwa efektivitas fitoremediasi meningkat seiring bertambahnya durasi perlakuan dan biomassa tanaman. Pada hari ke-7 (H7), perlakuan P2 menunjukkan penurunan kadar Pb yang sangat signifikan, yaitu mencapai 98,87% pada Stasiun 1 dan 98,13% pada Stasiun 2. Pola serupa juga ditunjukkan oleh logam Cu, di mana perlakuan P2 mampu menurunkan konsentrasi Cu hingga 91,76% di Stasiun 1 dan 94,88% di Stasiun 2. Hasil ini menegaskan bahwa durasi kontak dan biomassa tanaman merupakan faktor utama yang menentukan keberhasilan fitoremediasi logam berat di perairan tercemar (Ali *et al.*, 2019).

Meskipun demikian, perlakuan kontrol (P0) juga menunjukkan adanya penurunan kadar Pb dan Cu, namun dengan persentase yang jauh lebih rendah dibandingkan perlakuan yang melibatkan tanaman. Penurunan ini terjadi akibat proses fisik-kimia alami, seperti pengendapan partikel logam ke dasar wadah, adsorpsi ion logam pada dinding ember percobaan, serta presipitasi logam menjadi senyawa yang kurang larut selama masa inkubasi (Yadav, 2010). Proses-proses tersebut bersifat pasif dan memiliki kapasitas terbatas dalam menurunkan logam berat secara berkelanjutan.

Perbedaan efektivitas antara perlakuan P1 dan P2 menunjukkan bahwa peningkatan biomassa *Typha angustifolia* L berpengaruh langsung terhadap kapasitas fitoremediasi. Biomassa yang lebih tinggi menghasilkan sistem perakaran dan rimpang yang lebih berkembang, sehingga memperluas permukaan adsorpsi logam berat dan meningkatkan intensitas proses rizofiltrasi (Yan *et al.*, 2020). Kondisi ini menjelaskan mengapa perlakuan P2 secara konsisten menunjukkan penurunan Pb dan Cu yang lebih besar dibandingkan P1.

Perbedaan respons antara hari ke-3 (H3) dan hari ke-7 (H7) menunjukkan bahwa fitoremediasi merupakan proses bertahap yang memerlukan waktu adaptasi fisiologis tanaman. Pada fase awal (H3), tanaman masih menyesuaikan diri terhadap cekaman logam dan lingkungan baru, sehingga aktivitas penyerapan dan stabilisasi logam belum berlangsung optimal (Ali *et al.*, 2019). Seiring bertambahnya waktu hingga H7, sistem perakaran menjadi lebih aktif dan kondisi rizosfer terbentuk secara stabil, yang meningkatkan efisiensi fitoremediasi (Khatoon *et al.*, 2024).

Pembentukan kondisi rizosfer yang stabil berperan penting dalam memperkuat mekanisme fitostabilisasi. Eksudat akar *Typha angustifolia* L, seperti asam sitrat, asam malat, dan asam oksalat, dapat berinteraksi dengan ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} sehingga membentuk kompleks atau memicu presipitasi logam dalam bentuk yang kurang larut (Shahid *et al.*, 2017). Selain itu, pelepasan oksigen oleh akar ke sedimen (radial

oxygen loss) dapat mendorong perubahan kondisi redoks yang menguntungkan bagi imobilisasi logam berat di zona rizosfer (Sukono et al., 2020).

Pada logam Pb, mekanisme fitoremediasi yang dominan adalah rizofiltrasi dan fitostabilisasi, dengan fitoekstraksi yang berlangsung secara terbatas. Ion Pb^{2+} diadsorpsi secara kuat pada permukaan akar yang kaya gugus karboksil, hidroksil, dan fosfat, kemudian sebagian ditahan di jaringan akar melalui pengikatan oleh fitokelatin dan metallothionein sebagai bagian dari mekanisme detoksifikasi internal (Bah et al., 2011). Pb sebagai logam non-esensial tidak memiliki jalur homeostasis yang ketat, sehingga cenderung terakumulasi lebih besar di akar dibandingkan di bagian tanaman lainnya.

Sebaliknya, penurunan Cu menunjukkan karakteristik yang lebih bersifat regulatif. Cu merupakan unsur mikro esensial yang dibutuhkan tanaman dalam jumlah terbatas, sehingga *Typha angustifolia* L memiliki sistem homeostasis yang mengatur serapan, translokasi, dan penyimpanannya melalui transporter spesifik dan mekanisme pengikatan internal (Xu et al., 2024). Oleh karena itu, mekanisme fitoremediasi Cu lebih didominasi oleh fitostabilisasi dan fitoekstraksi terbatas dibandingkan akumulasi agresif, yang membedakannya secara mekanistik dari fitoremediasi Pb. Akibatnya, mekanisme fitoremediasi Cu lebih didominasi oleh fitostabilisasi dan fitoekstraksi terbatas dibandingkan akumulasi agresif seperti pada Pb. Dengan demikian, hasil penelitian ini menegaskan bahwa *Typha angustifolia* L sangat efektif sebagai agen fitoremediasi pencemaran Pb, sementara perannya terhadap Cu lebih dominan dalam menurunkan dan menstabilkan konsentrasi logam di perairan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa air Sungai Silugonggo pada kondisi awal telah tercemar logam berat Pb dan Cu dengan konsentrasi yang melampaui baku mutu air kelas II sesuai PP No. 22 Tahun 2021, dan penerapan fitoremediasi menggunakan *Typha angustifolia* L. terbukti efektif dalam menurunkan konsentrasi kedua logam tersebut. Perlakuan biomassa 160 g (P2) menunjukkan kinerja paling optimal, dengan kemampuan menurunkan kadar Pb hingga 98,87% dan 98,13% pada Stasiun 1 dan 2, serta kadar Cu sebesar 91,76% dan 94,88% pada hari ke-7. Analisis statistik melalui uji ANOVA menunjukkan pengaruh perlakuan yang signifikan ($p < 0,05$), yang diperkuat oleh uji lanjut Tukey bahwa P2 menghasilkan konsentrasi logam akhir terendah. Peningkatan efektivitas fitoremediasi seiring bertambahnya biomassa dan waktu kontak mengindikasikan bahwa proses penyerapan logam berat berlangsung secara bertahap melalui sistem perakaran tanaman, sehingga *Typha angustifolia* L. berpotensi tinggi sebagai agen fitoremediasi untuk perairan tercemar Pb, sementara perannya terhadap Cu lebih bersifat sebagai pengendali dan penstabil konsentrasi logam di lingkungan perairan.

REKOMENDASI

Penelitian selanjutnya direkomendasikan menggunakan biomassa *Typha angustifolia* L yang lebih tinggi, yaitu ≥ 160 gram per unit perlakuan, karena pada penelitian ini biomassa 160 gram menunjukkan efektivitas tertinggi dalam menurunkan kadar Pb dan Cu. Selain itu, waktu pengamatan disarankan diperpanjang hingga 14–21 hari untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai dinamika penyerapan dan stabilisasi logam berat oleh tanaman. Perpanjangan durasi penelitian diharapkan dapat memperjelas fase optimum fitoremediasi serta potensi kejenuhan penyerapan logam pada sistem perakaran. Hambatan yang perlu diperhatikan dalam

penelitian lanjutan meliputi fluktuasi kondisi fisik-kimia perairan, seperti pH dan suhu, serta kemungkinan stres fisiologis tanaman akibat paparan logam berat dalam jangka waktu yang lebih lama, yang dapat memengaruhi kinerja fitoremediasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan kontribusi dalam pelaksanaan penelitian ini, baik secara akademik, teknis, maupun administratif. Apresiasi juga disampaikan kepada institusi dan pihak terkait yang telah memfasilitasi kegiatan penelitian hingga penyusunan naskah ini dapat diselesaikan dengan baik. Dukungan dan kerja sama yang diberikan sangat berarti bagi kelancaran dan keberhasilan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfin Fatwa M Afifudin, Adelia Wulandari, & Rony Irawanto. (2024). *Pencemaran Logam Berat di Air, Sedimen, dan Organisme pada Beberapa Sungai di Pulau Jawa, Indonesia: Tinjauan Literatur*. 4(April), 959–971. <https://doi.org/https://doi.org/10.58954/epj.v4i1.183>
- Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2019). Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, 2019(Cd). <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
- Bah, A. M., Dai, H., Zhao, J., Sun, H., Cao, F., Zhang, G., & Wu, F. (2011). Effects of cadmium, chromium and lead on growth, metal uptake and antioxidative capacity in *Typha angustifolia*. *Biological Trace Element Research*, 142(1), 77–92. <https://doi.org/10.1007/s12011-010-8746-6>
- Basile, A., Sorbo, S., Conte, B., Castaldo Cobianchi, R., Trinchella, F., Capasso, C., & Carginale, V. (2012). Toxicity, accumulation, and removal of heavy metals by three aquatic macrophytes. *International Journal of Phytoremediation*, 14(4), 374–387. <https://doi.org/10.1080/15226514.2011.620653>
- Chauro Aina, L., Rita S.D., E., & Kaswinarni, F. (2017). Biomonitoring Pencemaran Sungai Silugonggo Kecamatan Juwana Berdasarkan Kandungan Logam Berat (Pb) Pada Ikan Lundu. *Bioma: Jurnal Ilmiah Biologi*, 5(2). <https://doi.org/10.26877/bioma.v5i2.1498>
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 7(2), 60–72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>
- Khatoon, Z., Orozco-Mosqueda, M. del C., & Santoyo, G. (2024). Microbial Contributions to Heavy Metal Phytoremediation in Agricultural Soils: A Review. *Microorganisms*, 12(10), 1–20. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12101945>
- Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Schreck, E., Xiong, T., & Niazi, N. K. (2017). Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *Journal of Hazardous Materials*, 325, 36–58. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.063>
- Sukono, G. A. B., Hikmawan, F. R., Evitasari, E., & Satriawan, D. (2020). Mekanisme Fitoremediasi: Review. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*, 2(2), 40–47. <https://doi.org/10.35970/jppl.v2i2.360>
- Xu, E., Liu, Y., Gu, D., Zhan, X., Li, J., Zhou, K., Zhang, P., & Zou, Y. (2024). Molecular Mechanisms of Plant Responses to Copper: From Deficiency to Excess. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(13). <https://doi.org/10.3390/ijms25136993>

- Yadav, S. K. (2010). Heavy metals toxicity in plants: An overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants. *South African Journal of Botany*, 76(2), 167–179. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2009.10.007>
- Yan, A., Wang, Y., Tan, S. N., Mohd Yusof, M. L., Ghosh, S., & Chen, Z. (2020). Phytoremediation: A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land. *Frontiers in Plant Science*, 11(April), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00359>