



**POTENSI *Echinodorus palaefolius* SEBAGAI AGEN FITOREMEDIASI
DALAM MENURUNKAN KADAR LOGAM MANGAN PADA AIR
ASAM TAMBANG BATUBARA**

*The Potential of Echinodorus palaefolius as a Phytoremediation Agent in Reducing
Manganese Levels in Coal Acid Mine Drainage*

Chalista Devi Lestari^{1*}, Shally Yanova², Fernando Mersa Putra³

¹²³Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Jambi, Jl. Jambi – Muara Bulian No.KM. 15,
Mendalo Darat, Kec. Jambi Luar Kota, Kabupaten Muaro Jambi.

Jambi 36361

*Email: chalistalestari23@gmail.com

Article Info		Abstract
Article History Received: 10-12-2025 Revised: 18-12-2025 Published: 31-12-2025		<i>This study examined the potential of water jasmine (Echinodorus palaefolius) in reducing manganese levels in Coal Acid Mine Drainage (AMD) using an artificial wetland system. The study was conducted experimentally with time variations of 0, 3, 6, and 9 days, where the manganese concentration was analyzed using Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). The results showed that the initial manganese concentration of 9.75 mg/L, which exceeded the quality standard of the Minister of Environment Decree No. 113 of 2003 (4 mg/L), decreased significantly to 3.94 mg/L on the 3rd day and reached 1.002 mg/L on the 9th day with an effectiveness of 89.73%. An independent t-test showed a significant difference ($p < 0.05$) between with and without plants. The BCF value of 7.028 classifies E. palaefolius as a highly effective accumulator, while the TF value of 0.6 indicates the presence of a phytostabilization mechanism. Research has proven that water jasmine is effective as an environmentally friendly solution for coal-fired wastewater management with the ability to neutralize pH from 4.28 to 6.53 and reduce manganese concentrations below quality standards in a short time.</i>
Keywords: Phytoremediation; Echinodorus Palaefolius; Acid Mine Drainage; Constructed Wetland.		
Informasi Artikel		Abstrak
Sejarah Artikel Diterima: 10-12-2025 Direvisi: 18-12-2025 Dipublikasi: 31-12-2025		<i>Penelitian ini mengkaji potensi tanaman melati air (Echinodorus palaefolius) dalam menurunkan kadar mangan pada Air Asam Tambang (AAT) batubara menggunakan sistem constructed wetland. Penelitian dilakukan secara eksperimental dengan variasi waktu 0, 3, 6, dan 9 hari, dimana konsentrasi mangan dianalisis menggunakan Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). Hasil menunjukkan konsentrasi awal mangan 9,75 mg/L yang melebihi baku mutu Kepmen LH No.113 Tahun 2003 (4 mg/L) turun signifikan menjadi 3,94 mg/L pada hari ke-3 dan mencapai 1,002 mg/L pada hari ke-9 dengan efektivitas 89,73%. Uji independent t-test menunjukkan perbedaan signifikan ($p < 0,05$) antara dengan dan tanpa tanaman. Nilai BCF sebesar 7,028 mengklasifikasikan Echinodorus palaefolius sebagai akumulator sangat efektif, sedangkan nilai TF sebesar 0,6 mengindikasikan mekanisme fitostabilisasi. Penelitian membuktikan bahwa melati air efektif sebagai solusi ramah lingkungan untuk pengelolaan</i>
Kata Kunci: Fitoremediasi; Echinodorus Palaefolius; Air Asam Tambang; Constructed Wetland.		

AAT batubara dengan kemampuan menetralkan pH dari 4,28 menjadi 6,53 dan mengurangi konsentrasi mangan di bawah baku mutu dalam waktu singkat.

Sitasi:

PENDAHULUAN

Air Asam Tambang (AAT) terbentuk ketika mineral sulfida dalam tanah penutup tambang terpapar udara dan air hujan selama proses pengupasan lapisan tanah, menghasilkan air limbah dengan pH rendah yang memerlukan penanganan khusus sebelum dilepaskan ke lingkungan (Ashari *et al.*, 2015). Air asam tambang dicirikan oleh pH yang rendah dan tingginya kandungan senyawa logam tertentu seperti besi (Fe), mangan (Mn), kadmium (Cd), aluminium (Al), sulfat (SO_4). Pirit (FeS_2) merupakan asam sulfida yang sering ditemukan pada lokasi pertambangan (Hidayat, 2017). Meskipun metode konvensional seperti netralisasi dengan kapur telah umum digunakan, metode ini masih memiliki keterbatasan karena menghasilkan lumpur yang membutuhkan penanganan lebih lanjut (Herniwanti, 2021).

Hasil uji pendahuluan pada sampel Air Asam Tambang di kolam *Settling Under Mining Pond* (SUMP) PT. Gea Lestari, menunjukkan konsentrasi logam mangan (Mn) sebesar 9,75 mg/L, hasil ini melebihi ambang batas yang ditetapkan dalam Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 113 Tahun 2003 tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha dan atau Kegiatan Pertambangan Batubara (Kementerian Negara Lingkungan Hidup, 2003). Tingginya kadar mangan dalam air limbah tambang menimbulkan berbagai dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan. Selain menyebabkan air menjadi keruh, berwarna kecokelatan, dan berbau logam (Yulianti *et al.*, 2016), kontaminasi mangan juga dapat mengakibatkan pencemaran ekosistem akuatik melalui akumulasi dalam sedimen dan proses bioakumulasi dalam rantai makanan. Kondisi ini dapat mengganggu keseimbangan ekosistem dan berpotensi membahayakan kesehatan organisme air maupun manusia (Soegianto, 2023).

Fitoremediasi menggunakan tanaman melati air (*Echinodorus palaefolius*) muncul sebagai alternatif yang menjanjikan untuk mengatasi permasalahan tersebut. Metode ini dipilih karena sifatnya yang ramah lingkungan, berkelanjutan, dan memiliki nilai estetika (Caroline & Moa, 2015; Fridtriyanda *et al.*, 2022). Penelitian sebelumnya telah menunjukkan efektivitas berbagai tanaman air

dalam meremediasi logam berat, termasuk eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) (Saha *et al.*, 2017), purun tikus (Putri *et al.*, 2023), dan lemna (*Lemna sp.*) (Saputra *et al.*, 2021). Khususnya untuk melati air, penelitian terdahulu menunjukkan kemampuannya menyisihkan logam Merkuri (Hg) hingga 91,84% dalam waktu 3 hari (Prasetya *et al.*, 2020), Logam Timbal (Pb) dalam waktu 16 hari hingga 89,59% (Prasetya *et al.*, 2020), logam aluminium (Al) hingga 86% dalam waktu 11 hari (Kasman *et al.*, 2019). dan nilai *Total Suspended Solid* (TSS) hingga 89% dalam waktu 7 hari (Ramadhani *et al.*, 2023). Meskipun demikian, penelitian mengenai kemampuan melati air dalam meremediasi logam mangan masih terbatas, menciptakan peluang untuk penulis eksplorasi lebih lanjut.

Implementasi fitoremediasi dengan melati air di PT. Gea Lestari tidak hanya berpotensi memberikan solusi efektif untuk penurunan kadar mangan dalam AAT, tetapi juga sejalan dengan upaya perusahaan dalam memenuhi regulasi lingkungan dan meningkatkan citra sebagai perusahaan yang bertanggung jawab terhadap lingkungan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan metode pengelolaan AAT yang lebih efektif dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

1) Lokasi Penelitian

Tempat pengambilan sampel berlokasi di Tambang Batubara, PT. Gea Lestari, yang berlokasi di Desa Tanjung Pauh, km. 32, Kecamatan Mestong, Kabupaten Muaro Jambi, Provinsi Jambi. Penelitian ini dilakukan selama 3 bulan dimulai dari bulan Juli hingga September 2025.

2) Alat dan Bahan Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS), pH meter, gelas ukur, *beaker glass*, *erlenmeyer*, neraca analitik, bak reaktor kaca, *coolbox*, labu takar 500 ml, pipet tetes, *hotplate*. Bahan yang digunakan meliputi tanaman melati air (*Echinodorus palaefolius*), sampel Air Asam Tambang (AAT), *handscoon*, air bebas mineral, asam nitrat (HNO₃), larutan standar logam mangan (Mn), kertas saring *whatman*, kerikil dan tanah

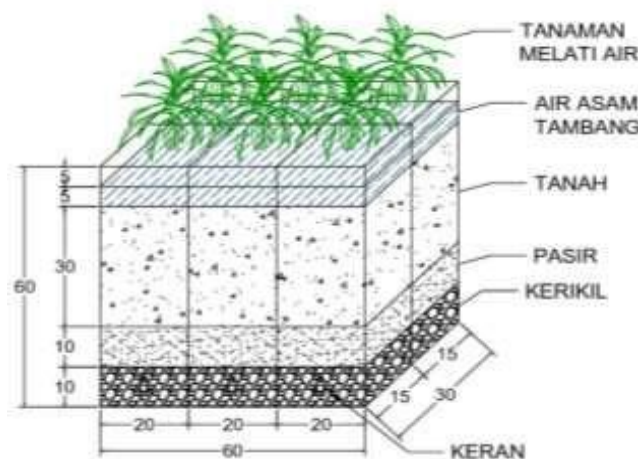
3) Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain eksperimen dengan kelompok *constructed wetland* dengan tanaman dan kelompok *constructed wetland* tanpa tanaman untuk mengevaluasi efektivitas *Echinodorus palaefolius* dalam menurunkan konsentrasi mangan pada Air Asam Tambang. Sampel air diambil dari kolam SUMP PT. Gea Lestari. Pengukuran konsentrasi mangan dilakukan pada hari ke-0, 3, 6 dan 9 dalam tiga pengulangan menggunakan AAS berdasarkan SNI 06-6989.5-2004 dan

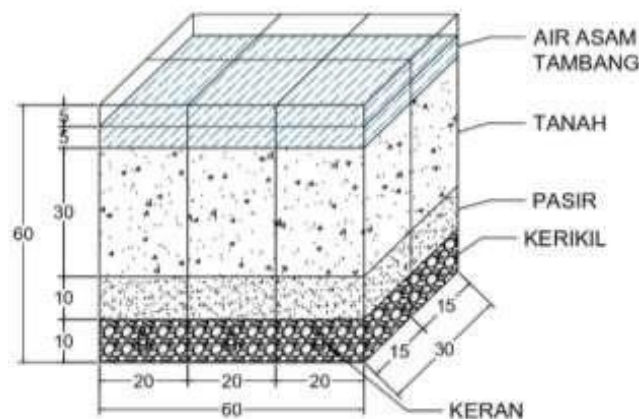
dilakukan pengukuran pH. Sebagai standar pembanding, penelitian ini menggunakan baku mutu yang diukur menurut Kepmen LH No. 113 Tahun 2003 tentang baku mutu air limbah bagi usaha dan atau kegiatan pertambangan batubara. Penelitian ini menggunakan dua unit *Constructed Wetland* (CW) berbahan kaca berukuran 60

X 30 X 60 cm, yang diisi media tanam berlapis terdiri dari kerikil 10 cm (dasar), pasir 10 cm (tengah), dan tanah 30 cm (atas). Tanaman *Echinodorus palaefolius* yang digunakan pada penelitian ini merupakan hasil budidaya yang telah berumur \pm 3 bulan. Tanaman melati air yang digunakan dalam penelitian ini dipilih dengan kriteria berat basah yang relatif seragam dengan berat rata-rata 111,4 gram per tanaman untuk meminimalkan variabilitas hasil. Penimbangan dilakukan sebelum tanaman dipindahkan ke dalam *Constructed Wetland*.

Setiap sekatan dalam reaktor berisi satu tanaman dengan volume AAT sebanyak 5 liter. Tanaman diaklimatisasi selama 7 hari, kemudian tanaman dipindahkan ke dalam CW yang telah berisi media tanam. Setiap CW dibagi menjadi enam sekatan yang terpisah untuk memfasilitasi pengambilan sampel pada hari ke-0, 3, 6 dan 9 dengan efisien. Desain reaktor yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 1** dan **Gambar 2**.



Gambar 1 Desain CW Dengan Tanaman



Gambar 2 Desain CW Tanpa Tanaman

Parameter air asam tambang yang digunakan mengacu pada Kepmen LH No. 113 Tahun 2003 tentang baku mutu air limbah bagi usaha dan atau kegiatan pertambangan batubara (**Tabel 1**).

Tabel 1. Kepmen LH No. 113 Tahun 2003

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum
pH		6-9
Residu Tersuspensi	mg/L	200
Besi (Fe) Total	mg/L	7
Mangan (Mn) Total	mg/L	4

Sumber: Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 113 Tahun 2003

Setelah penelitian dilakukan, data dianalisis menggunakan SPSS dengan uji normalitas *Shapiro-Wilk* (kriteria: $p > 0,05$) dan uji homogenitas *Levene's test* sebelum melakukan *independent t-test* pada $\alpha = 0,05$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Identifikasi Kadar Mangan (Mn) pada Air Asam Tambang

Hasil pengujian awal kadar logam Mn didapat sebesar 9,75 mg/L, dari hasil uji tersebut diketahui bahwa kadar logam Mn pada AAT melebihi baku mutu air limbah bagi usaha dan atau kegiatan pertambangan batubara menurut Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 113. Tahun 2003 yaitu 4 mg/L. Berdasarkan data tersebut menjadi dasar bagi penulis dalam melakukan penelitian ini guna melihat potensi *Echinodorus palaefolius* dalam meningkatkan kualitas AAT dengan menggunakan teknik fitoremediasi. Hasil pengujian konsentrasi awal Mn dapat dilihat pada **Tabel 2** berikut:

Tabel 2 Konsentrasi logam Mangan (Mn) dan pH air sebelum fitoremediasi

No	Parameter	Satuan	Hasil Data
1.	Mn	mg/L	9,75
2.	pH		4,28

Pengukuran pH pada AAT juga menunjukkan bahwa air tersebut dalam kondisi asam dengan nilai pH 4,28. Keasaman ini terjadi karena keberadaan mineral-mineral sulfida dalam batuan tambang yang teroksidasi ketika terpapar air dan udara, menghasilkan asam sulfat yang menyebabkan penurunan pH air secara signifikan.

2. Uji Fitoremediasi Melati Air (*Echinodorus palaefolius*)

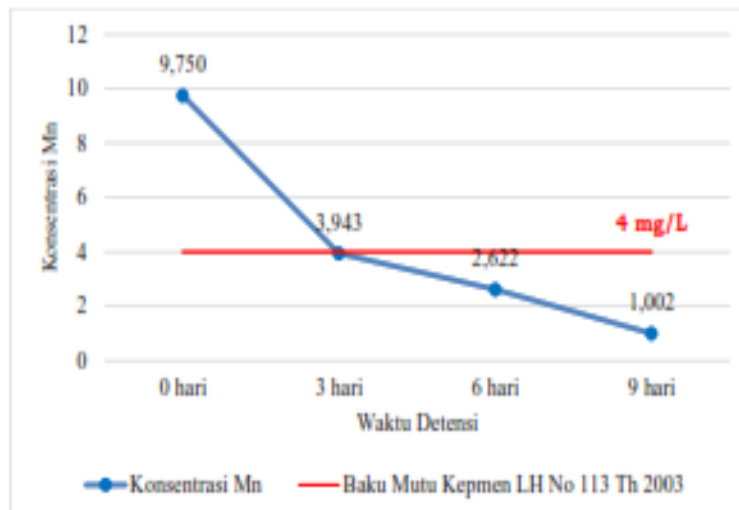
Berdasarkan hasil pengujian awal yang telah dilakukan pada Air Asam Tambang di PT. Gea Lestari diperoleh sebesar 9,75 mg/L. Tingginya konsentrasi logam Mn pada AAT tersebut mencapai 2,4 kali lipat dari batas maksimum yang diizinkan, sehingga mengindikasikan adanya dampak negatif terhadap lingkungan apabila AAT tersebut langsung dibuang ke lingkungan tanpa dilakukan pengolahan terlebih dahulu. Pentingnya perlindungan lingkungan dan kepatuhan terhadap regulasi yang berlaku, maka PT. Gea Lestari perlu segera mengimplementasikan sistem pengolahan Air Asam Tambang yang efektif dan efisien guna untuk menurunkan kadar logam Mn hingga mencapai standar baku mutu yang ditetapkan, sehingga AAT yang telah diolah dapat dialirkan dengan aman ke lingkungan tanpa menimbulkan

dampak merugikan bagi ekosistem dan masyarakat sekitar. Adapun upaya pengolahan yang digunakan dalam penelitian ini dengan proses fitoremediasi menggunakan tanaman *Echinodorus palaefolius* dengan menggunakan *Constructed Wetland* (CW). Penurunan konsentrasi Mn setelah proses fitoremediasi dapat dilihat pada **Tabel 3.** berikut:

Tabel 3. Konsentrasi Logam Mn pada CW dengan Tanaman

No.	Variasi Waktu	Konsentrasi Mn (mg/L)			Rata-rata ± Standar Deviasi	Kepmen LH No. 113 Tahun 2003
		Ulangan 1	Ulangan 2	Ulangan 3		
1.	0 hari		9,75			4 mg/L
2.	3 hari	3,59	3,69	4,54	3,943±0,521	
3.	6 hari	2,32	3,27	2,29	2,622±0,558	
4.	9 hari	0,98	1,07	0,96	1,002±0,063	

Proses fitoremediasi pada penelitian ini menggunakan *Constructed Wetland* dimana perlakuan pada tanaman dilakukan dengan cara mendiamkan melati air di dalam reaktor yang berisikan AAT selama kurun waktu 9 hari kerja dan dilakukan pengamatan pada hari ke-0, 3, 6, dan 9 untuk kadar logam mangan (Mn). Konsentrasi logam Mn dalam AAT mengalami penurunan yang signifikan selama 9 hari masa pengolahan. Konsentrasi Mn pada hari ke-0 tercatat sebesar 9,75 mg/L, yang menunjukkan tingkat. Pencemaran yang cukup tinggi dan melebihi baku mutu yang telah ditetapkan sebesar 4 mg/L. Setelah dilakukan proses fitoremediasi selama 3 hari, terjadi penurunan yang cukup drastis menjadi 3,94 mg/L. Nilai ini telah berada di bawah baku mutu yang ditetapkan, mengindikasikan bahwa proses fitoremediasi telah berhasil menurunkan kadar logam Mn ke tingkat yang dapat diterima oleh lingkungan. Pada hari ke-6, penurunan konsentrasi Mn berlanjut dengan nilai mencapai 2,62 mg/L. Penurunan pada fase ini membuktikan bahwa tanaman *Echinodorus palaefolius* terus secara aktif menyerap mangan melalui sistem akarnya dan mengakumulasinya dalam jaringan tanaman. Pada hari ke-9, konsentrasi Mn terus mengalami penurunan hingga mencapai 1,002 mg/L. Hasil ini membuktikan bahwa tanaman melati air (*Echinodorus palaefolius*) efektif dalam menurunkan kadar logam Mn pada AAT hingga mencapai baku mutu yang telah ditetapkan.



Konsentrasi Mn Baku Mutu Kepmen LH No 113 Th 2003
Gambar 3 Grafik Penurunan Konsentrasi Mn dengan Tanaman

Hasil penelitian (**Gambar 3**) menunjukkan perubahan konsentrasi logam Mn, terlihat adanya pola penurunan yang cukup signifikan seiring bertambahnya waktu kontak. Laju penurunan paling tinggi terjadi pada periode awal yaitu hari ke-0 hingga hari ke-3, terjadi penurunan konsentrasi mangan sebesar 5,807 mg/L. Penurunan ini menunjukkan bahwa pada fase awal, tanaman mampu menyerap logam berat dengan cukup cepat dan efektif. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh kondisi fisiologis tanaman yang masih optimal dan belum mengalami saturasi dalam penyerapan logam berat. Pada hari ke-6, penurunan konsentrasi Mn tercatat menjadi 2,622 mg/L. Nilai ini telah mencapai standar baku mutu yang ditetapkan, menunjukkan efektivitas proses fitoremediasi yang dilakukan. Proses penurunan terus berlanjut hingga hari ke-9 dengan penurunan konsentrasi Mn mencapai 1,002 mg/L, yang menunjukkan peningkatan kinerja penyerapan dibandingkan hari sebelumnya.

Pola penurunan konsentrasi yang konsisten ini mengindikasikan bahwa tanaman telah beradaptasi dengan baik terhadap lingkungan yang mengandung logam berat. Setelah melewati fase adaptasi awal, tanaman menunjukkan kemampuan penyerapan yang stabil dan berkelanjutan, sehingga proses fitoremediasi dapat berjalan secara optimal dalam jangka waktu yang lebih panjang. Hal ini terjadi karena tanaman memiliki mekanisme tersendiri untuk menstimulasi bioavailabilitas ion logam pada lingkungan rhizosfernya agar dapat diserap melalui akar. Hal ini juga dipengaruhi dari bertambahnya waktu kontak yang menyebabkan reaksi biologis yang terjadi antara air limbah

dan tanaman melati air semakin baik, dimana mikroorganisme yang ada pada akar tanaman akan mengikat oksigen dan mendegradasi polutan pada air limbah (Riyanti *et al.*, 2019).

Melati air (*Echinodorus palaefolius*) merupakan tanaman hias yang akarnya terletak pada dasar perairan dan reproduksinya secara fleksibel. Tanaman ini dapat digunakan pada fitoremediasi karena dapat menurunkan kadar nutrien (eutrofikasi) pada perairan. Selain itu, dari segi estetika, tanaman ini dinilai dapat memberi kesan keindahan dan menyegarkan udara (Riyanti *et al.*, 2019). Hasil fisik yang didapatkan di lapangan menyatakan bahwa melati air mengalami perubahan morfologi, yaitu daun menguning dan beberapa batang melati air mati. Adapun keadaan ini disebut dengan klorosis dan nekrosis. Klorosis merupakan kondisi dimana daun tanaman berubah menjadi kuning karena kehilangan klorofil ketika infeksi patogen menghambat penyerapan nutrisi penting seperti nitrogen atau magnesium yang diperlukan guna produksi klorofil. Klorosis biasanya terjadi pada tanaman yang terinfeksi oleh patogen pembuluh seperti *Verticillium* atau *Fusarium* yang merusak jaringan pembuluh angkut sehingga menyebabkan daun kehilangan kemampuannya untuk melakukan fotosintesis dengan baik. Nekrosis merupakan matinya sel atau jaringan yang terjadi pada tanaman yang terkena patogen. Nekrosis biasanya menandakan kerusakan jaringan parah yang tidak dapat diperbaiki (Suprpto *et al.*, 2024).

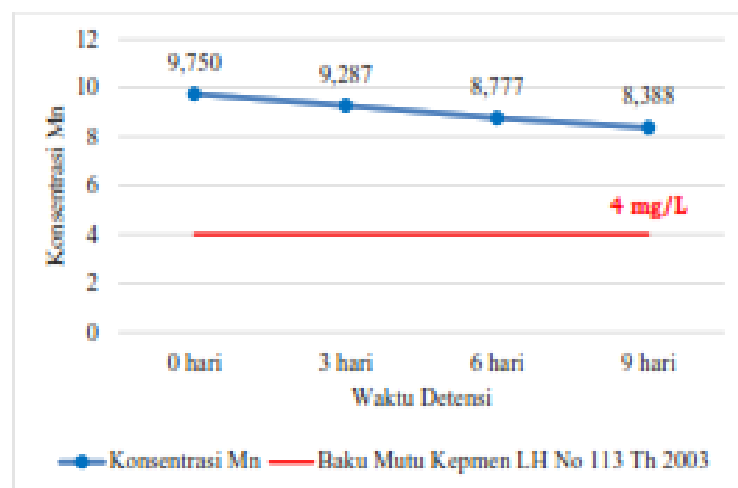
3. Konsentrasi Logam Mn pada *Constructed Wetland* (CW) Tanpa Tanaman

Pengujian kadar logam Mn juga dilakukan pada *Constructed Wetland* (CW) tanpa tanaman untuk membandingkan hasil antara CW dengan perlakuan tanaman dan CW tanpa tanaman. Dengan demikian, informasi yang didapat akan akurat dan relevan mengenai potensi tanaman *Echinodorus palaefolius* dalam menyerap logam Mn. *Constructed Wetland* yang digunakan dalam penelitian, terdiri dari media tanam yang sama dengan media tanam yang digunakan dalam CW dengan tanaman dan berisi air asam tambang, dimana CW tanpa tanaman dan CW dengan tanaman *Echinodorus palaefolius* dioperasikan secara bersamaan untuk memperoleh data komparatif.

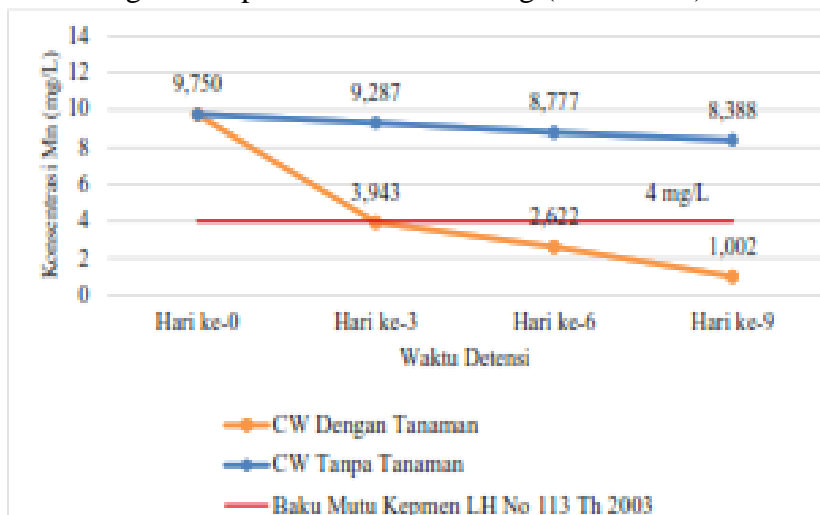
Tabel 4. Konsentrasi Logam Mn pada CW Tanpa Tanaman

No.	Variasi Waktu	Konsentrasi Mn (mg/L)	Baku Mutu Kepmen LH No. 113 tahun 2003
1.	0 hari	9,75	4 mg/L
2.	3 hari	9,29	
3.	6 hari	8,78	
4.	9 hari	8,39	

Berdasarkan **Tabel 4**, penurunan konsentrasi logam Mn pada *Constructed Wetland* (CW) tanpa tanaman menunjukkan bahwa kadar Mn mengalami penurunan berlangsung secara lambat dan tidak signifikan. Meskipun terdapat sedikit penurunan sejak hari ke-3 hingga hari ke-9, perubahan konsentrasi cenderung tidak konsisten dan berada jauh dari standar baku mutu. Hal ini mengindikasikan bahwa tanpa keberadaan tanaman *Echinodorus palaefolius*, CW tidak mampu secara efektif menurunkan kandungan logam Mn pada AAT. Proses penurunan konsentrasi yang terjadi pada CW tanpa tanaman hanya mengandalkan mekanisme alami seperti sedimentasi dan pengendapan gravitasi, yang berjalan secara lambat dan memiliki efektivitas terbatas dalam mengurangi kandungan logam berat.


Gambar 4 Grafik Penurunan Konsentrasi Mn pada CW Tanpa Tanaman

Pada **Gambar 4** dapat dilihat bahwa CW tanpa tanaman mengalami penurunan konsentrasi logam Mn yang relatif kecil dibandingkan dengan reaktor yang menggunakan tanaman. Konsentrasi awal logam Mn pada kondisi awal adalah 9,75 mg/L. Pada periode hari ke-0 hingga hari ke-3, penurunan konsentrasi Mn sebesar 0,463 mg/L. Pada hari ke-3 hingga hari ke-6, terjadi penurunan yang lebih besar dari periode sebelumnya, yaitu sebesar 0,510 mg/L. Kemudian, pada interval hari ke-6 hingga hari ke-9, konsentrasi mengalami penurunan sebesar 0,389 mg/L. Secara keseluruhan, konsentrasi akhir pada hari ke-9 adalah 8,387 mg/L, yang masih jauh melebihi baku mutu yang ditetapkan sebesar 4 mg/L. Penurunan pada seluruh interval tersebut menunjukkan efektivitas yang terbatas dan tidak signifikan, membuktikan bahwa proses alami tanpa bantuan tanaman tidak efektif dalam menurunkan kadar logam Mn pada air asam tambang (**Gambar 5**).



Gambar 5 Perbandingan CW Dengan Tanaman dan CW Tanpa Tanaman

Sistem *Constructed Wetland* (CW) dengan tanaman jauh lebih efektif dalam menurunkan kadar mangan dibandingkan tanpa tanaman. Tanaman *Echinodorus palaefolius* berperan penting dalam proses fitoremediasi pada penelitian ini untuk mencapai standar baku mutu air yang ditetapkan.

4. Konsentrasi Logam Mn pada Tanaman *Echinodorus palaefolius*

Hasil penelitian ini membuktikan bahwa tanaman *Echinodorus palaefolius* memiliki potensi yang baik sebagai agen fitoremediasi dalam menurunkan konsentrasi logam Mn. Hal ini dapat dilihat berdasarkan hasil dari perbandingan konsentrasi Mn pada sistem *Constructed Wetland* (CW) dengan dan tanpa kehadiran tanaman *Echinodorus palaefolius* selama 9 hari pengamatan pada **Tabel 6** berikut.

Tabel 5. Konsentrasi Logam Mn pada Tanaman *Echinodorus palaefolius*

Variasi Waktu	Konsentrasi Mn (mg/L)			Kepmen LH No. 113 Tahun 2003
	CW tanpa Tanaman	CW dengan Tanaman	Fitoremediasi	
0 hari	9,75	9,75	0	4 mg/L
3 hari	9,29	3,94	5,34	
6 hari	8,78	2,62	6,15	
9 hari	8,39	1,00	7,39	

Pada kondisi awal, kedua sistem CW diberikan konsentrasi mangan dengan kondisi yang sama yaitu 9,75 mg/L. Namun, perbedaan signifikan mulai terlihat sejak hari ke-3 pengamatan, CW yang ditanami *Echinodorus palaefolius* mampu menurunkan konsentrasi mangan hingga 3,94 mg/L, sementara CW tanpa tanaman hanya mencapai 9,29 mg/L. Selisih kemampuan remediasi antara kedua sistem mencapai 5,34 mg/L, yang merupakan kontribusi langsung dari aktivitas fitoremediasi tanaman *Echinodorus palaefolius*.

Kemampuan fitoremediasi *Echinodorus palaefolius* semakin meningkat seiring bertambahnya waktu kontak. Pada hari ke-6, tanaman ini berhasil meremediasi Mn hingga 2,62 mg/L dengan selisih mencapai 6,15 mg/L. Pada periode yang sama, CW tanpa tanaman masih menunjukkan konsentrasi tinggi sebesar 8,78 mg/L, membuktikan bahwa tanpa perlakuan tanaman sangat terbatas. Pencapaian paling optimal terjadi pada hari ke-9, di mana *Echinodorus palaefolius* berhasil menurunkan konsentrasi mangan hingga 1,002 mg/L. Nilai ini jauh berada di bawah baku mutu yang telah ditetapkan yaitu sebesar 4 mg/L, kontribusi fitoremediasi pada periode ini mencapai puncaknya yaitu 7,39 mg/L, yang berarti total penurunan konsentrasi mangan disebabkan oleh aktivitas tanaman *Echinodorus palaefolius*. Sebaliknya, CW tanpa tanaman hanya mampu menurunkan konsentrasi menjadi 8,39 mg/L, menunjukkan bahwa proses alami seperti sedimentasi oleh substrat memiliki peranan yang sangat minimal.

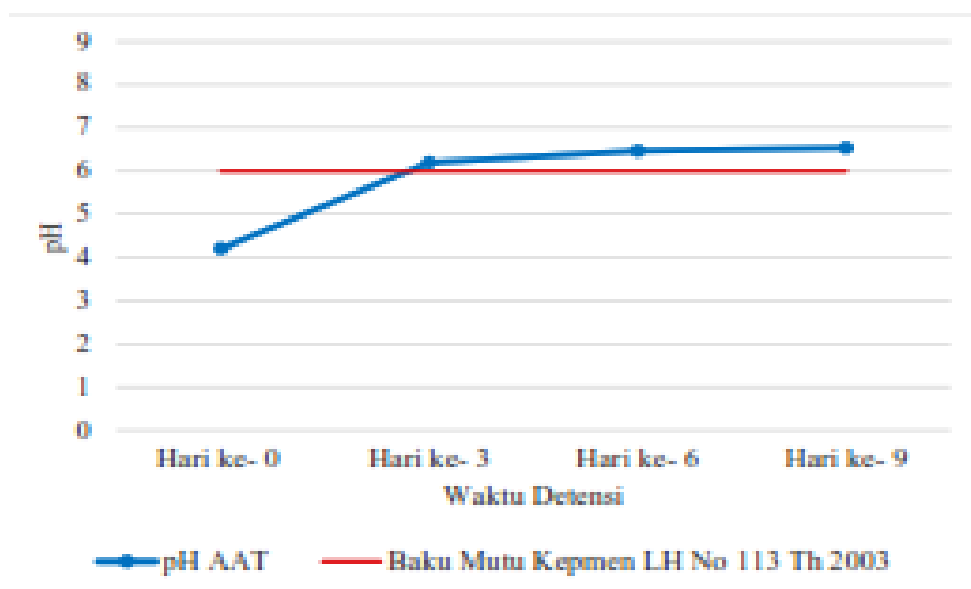
5. Pengukuran pH

Pengukuran pH dilakukan selama proses fitoremediasi sebagai data pendukung. Derajat keasaman (pH) digunakan untuk menyatakan tingkat keasaman maupun kebasaan pada suatu larutan. Pada umumnya pH digunakan untuk mengetahui banyaknya suatu konsentrasi ion H⁺ yang terdapat

dalam suatu larutan. Pengukuran pH pada CW dengan tanaman selama proses fitoremediasi dapat dilihat pada **Tabel 6** dan **Gambar 6** berikut.

Tabel 6. Hasil Pengukuran pH Air Asam Tambang

Hari Ke-	pH Awal	Ulangan 1	Ulangan 2	Ulangan 3	Rata-Rata
3	4,2	5,8	6,5	6,3	6,20
6	4,2	6,3	6,6	6,5	6,47
9	4,2	6,4	6,7	6,5	6,53



Gambar 6 Perubahan pH pada Setiap Variasi Waktu

Berdasarkan hasil pengukuran pH yang telah dilakukan selama 9 hari dengan tiga kali pengulangan pada setiap variasi waktu, diperoleh data yang menunjukkan tren peningkatan pH secara konsisten dari kondisi asam menuju netral. Pada hari ke-3, pH awal yang tercatat sebesar 4,2 mengalami peningkatan yang signifikan dengan nilai rata-rata mencapai 6,4 berdasarkan hasil tiga kali pengulangan (5,8; 6,5; dan 6,3). Pengamatan pada hari ke-6 dengan pH awal tetap pada 4,2, namun hasil pengukuran menunjukkan peningkatan lebih lanjut dengan rata-rata 6,6 dari tiga ulangan. Meskipun peningkatan dari hari ke-3 hanya sebesar 0,27, hal ini menunjukkan bahwa proses yang terjadi masih berlangsung namun dengan laju yang mulai melambat. Pada hari ke-9 rata-rata hasil pengukuran mencapai 6,53. Peningkatan yang minimal dari hari ke-6 sebesar hanya 0,06 unit pH menunjukkan bahwa sistem mulai mencapai fase stabilisasi atau kesetimbangan. Pola perubahan pH yang menunjukkan laju peningkatan yang semakin menurun dari hari ke hari mengindikasikan bahwa proses biologis atau kimia yang terjadi mulai mencapai kondisi *steady state*, dimana aktivitas

mikroorganisme atau reaksi kimia yang bertanggung jawab terhadap peningkatan pH mulai mencapai batas optimumnya.

Peningkatan pH dari 4.2 menuju ke 6.53 menyebabkan penurunan drastis konsentrasi Mn dari 9.75 mg/L menjadi 1.002 mg/L. Penurunan paling drastis terjadi pada fase awal yaitu pada hari ke-0 menuju hari ke-3, menunjukkan potensi dari tanaman *Echinodorus palaefolius* dalam proses fitoremediasi dalam menurunkan konsentrasi Mn dan menetralkan pH pada AAT. Perubahan pH dari kondisi asam menuju mendekati netral selama periode 9 hari menunjukkan adanya aktivitas biologis yang aktif. Proses fotosintesis dapat menginduksi alkalisasi atau peningkatan pH lingkungan akuatik sebagai hasil dari pengambilan proton (H^+) yang terjadi secara independen dari konsumsi CO_2 . Mekanisme ini menjelaskan bahwa peningkatan pH dipengaruhi oleh aktivitas biologis organisme fotosintetik di perairan. Proses fotolisis air dan siklus reduksi/oksidasi dalam fotosintesis menyediakan lumen dengan proton, yang kemudian diserap oleh sel mikroalga sehingga mengurangi konsentrasi ion H^+ di lingkungan perairan dan meningkatkan pH secara signifikan (Zerveas *et al.*, 2021).

6. Efektivitas Penurunan Logam Mn pada CW dengan Tanaman

Efektivitas penurunan Mn menggunakan tanaman *Echinodorus palaefolius* dilakukan dengan 3 variasi waktu dan 3 kali pengulangan dengan konsentrasi awal sebesar 9,75 mg/L. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwasannya fitoremediasi menggunakan *Constructed Wetland* dengan perlakuan tanaman *Echinodorus palaefolius* secara signifikan dapat menurunkan konsentrasi logam Mn. Perhitungan efektivitas penurunan logam Mn pada bak reaktor dengan tanaman dapat dihitung dengan rumus berikut ini:

$$\begin{aligned} Ef(\%) &= \frac{Co - Ce}{Co} \times 100 \\ &= \frac{9,75 - 1,002}{9,75} \times 100 \\ &= 89,73\% \end{aligned}$$

Tabel 7. Efektivitas Penurunan Logam Berat Mn pada CW dengan Tanaman

Variasi waktu	Konsentrasi Awal	Konsentrasi Akhir Mn	Efektivitas (%)
	Mn (mg/L)	(mg/L)	
3 Hari	9,75	3,943	59,56
6 Hari	9,75	2,622	73,10
9 Hari	9,75	1,002	89,73

Hasil analisis efektivitas *Echinodorus palaefolius* dalam proses fitoremediasi selama periode 9 hari menunjukkan tren penurunan konsentrasi logam Mn yang signifikan sebagaimana tercantum dalam **Tabel 7**. Pada hari ke-3 diperoleh efektivitas penjerapannya mencapai 59,56%, yang mengindikasikan bahwa mekanisme penyerapan logam Mn oleh tanaman melalui air telah mulai bekerja sejak awal perlakuan. Selanjutnya, pada hari ke-6 nilai efektivitas meningkat menjadi 73,10%, menunjukkan peningkatan kemampuan tanaman dalam mengakumulasi logam Mn pada air asam tambang secara efisien. Puncak efektivitas tertinggi tercapai pada hari ke-9, dengan nilai sebesar 89,73%, yang menandakan bahwa proses fitoremediasi berlangsung secara konsisten dan semakin efektif seiring dengan bertambahnya waktu kontak antara air asam tambang dengan tanaman.

Peningkatan efektivitas ini juga menunjukkan bahwa *Echinodorus palaefolius* memiliki potensi yang sangat baik sebagai agen fitoremediasi untuk mengurangi kadar logam berat dalam lingkungan perairan yang tercemar, khususnya logam mangan. Dengan demikian, penggunaan tanaman ini dapat menjadi solusi ramah lingkungan dalam upaya rehabilitasi kualitas air di area yang terdampak pencemaran logam berat. Penelitian ini juga sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Kasman *et al* (2019). Hasil penelitian menunjukkan efisiensi penyisihan logam Aluminium (Al) dalam air limbah Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) yang cukup tinggi mencapai 86% pada proses dengan media tanam dengan penurunan konsentrasi Al 8,36 mg/L. Proses fitoremediasi dengan media tanam memiliki kemampuan penyisihan logam Al yang lebih baik karena terbentuknya zona *rhizosfer* pada akar tanaman yang mendukung zona hidup mikroorganisme pengurai sehingga dapat mendegradasi limbah lebih optimal. Penelitian yang serupa juga dilakukan oleh Ramadhani *et al* (2023) tanaman melalui air mampu mengatasi pencemaran air limpasan *stockpile* batubara dengan parameter TSS.

Pada hari ke-2 nilai TSS sudah mencapai nilai baku mutu lingkungan yaitu 200 mg/L dan nilai TSS semakin hari semakin menurun dengan nilai efisiensi *removal* tertinggi yang didapat sebesar

89,0%. Penelitian yang dilakukan oleh Fatiha (2025) juga menunjukkan efisiensi penyisihan logam Timbal (Pb) dan Tembaga (Cu) dalam limbah cair industri batik *Home Industry* di Desa Sendang, Kabupaten Lamongan menggunakan tanaman melati air (*Echinodorus palaefolius*) dengan penurunan konsentrasi Pb dari 43,58 ppm menjadi 3,71 ppm pada hari ke-9 dan Cu dari 61,83 ppm menjadi 4,09 ppm pada hari ke-9 pemaparan.

7. Efektivitas Penurunan Logam Mn pada CW Tanpa Tanaman

Efektivitas penurunan logam Mn tanpa tanaman menunjukkan adanya penurunan kadar logam Mn namun berlangsung relatif lambat. Meskipun terdapat sedikit penurunan dari konsentrasi awal yang semula 9,75 mg/L kemudian pada hari ke 3, 6 dan 9 berturut-turut menjadi 9,49 mg/L, 9,08 mg/L, dan 8,72 mg/L namun perubahan tersebut tidak signifikan.

Perhitungan efektivitas penurunan logam Mn pada bak reaktor tanpa tanaman dapat dihitung dengan rumus berikut ini:

$$\begin{aligned} \text{Ef (\%)} &= \frac{C_o - C_e}{C_o} \times 100 \\ &= \frac{9,75 - 8,39}{9,75} \times 100 \\ &= 13,97 \% \end{aligned}$$

Tabel 8. Efektivitas Penurunan Logam Mn pada CW Tanpa Tanaman

Variasi waktu	Konsentrasi Awal Mn (mg/L)	Konsentrasi Akhir Mn (mg/L)	Efektivitas (%)
3 Hari	9,75	9,29	4,75
6 Hari	9,75	8,78	9,98
9 Hari	9,75	8,39	13,97

Hasil analisis efektivitas penurunan kadar logam Mn pada reaktor tanpa tanaman selama periode 9 hari menunjukkan tren penurunan konsentrasi logam Mn yang tidak signifikan sebagaimana tercantum dalam **Tabel 8**. Pada hari ke-3 diperoleh efektivitas penjerapannya yaitu 4,75%, pada hari ke-6 sebesar 9,98%, dan pada hari ke-9 sebesar 13,97% yang mengindikasikan bahwa mekanisme penurunan logam Mn oleh reaktor tanpa tanaman juga mengalami penurunan namun berjalan lambat dan tidak signifikan.

8. Analisis Uji T Kadar Mn Air Asam Tambang Setelah Perlakuan Fitoremediasi

Uji asumsi dasar yang terdiri dari uji normalitas dan uji homogenitas harus dilakukan terlebih dahulu, sebelum melakukan *independent t-test*, untuk memastikan data memenuhi syarat uji statistik parametrik. Uji normalitas bertujuan untuk mengetahui apakah data yang diperoleh dari kedua kelompok (CW dengan tanaman dan CW tanpa tanaman) terdistribusi normal atau tidak, Penelitian ini menggunakan metode *Shapiro-Wilk* dengan kriteria data dianggap normal apabila nilai signifikansi (*p-value*) > 0,05 (Isnaini *et al.*, 2025). Hasil uji normalitas disajikan dalam **Tabel 9** berikut.

Tabel 9 Uji Normalitas

Tests of Normality							
Kelompok		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Konsentrasi_Mn	Dengan Tanaman	.196	9	.200 [*]	.905	9	.280
	Tanpa Tanaman	.202	3	.	.994	3	.853

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

Berdasarkan **Tabel 9**, diperoleh bahwa nilai signifikansi (*p-value*) uji *Shapiro-Wilk* untuk kelompok dengan tanaman sebesar 0,280 > 0,05 dan kelompok tanpa tanaman sebesar 0,853 > 0,05. Hal ini menunjukkan bahwa kedua kelompok data memiliki nilai signifikansi yang lebih besar dari tingkat alpha 0,05. Maka dapat disimpulkan bahwa data konsentrasi mangan pada kedua kelompok

terdistribusi secara normal berdasarkan uji *Shapiro-Wilk*, sehingga asumsi normalitas terpenuhi dan analisis dapat dilanjutkan ke tahap berikutnya yaitu uji homogenitas varians.

Selanjutnya, uji homogenitas dilakukan untuk menguji apakah varian data dari kedua kelompok tersebut homogen atau sama, dengan kriteria varian dianggap homogen bila nilai signifikansi $> 0,05$.

abel 10 Hasil *Independent t-test*

Independent Samples Test									
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means					
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference
Konsentrasi_Mn	Equal variances assumed	4.504	.000	-7.826	10	.000	-6.29667	.80456	-8.08934 -4.50400
	Equal variances not assumed			-12.243	9.803	.000	-6.29667	.51432	-7.44578 -5.14756

KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa tanaman *Echinodorus palaefolius* efektif dalam menurunkan konsentrasi mangan pada air asam tambang batubara menggunakan sistem *constructed wetland*. Konsentrasi mangan berhasil mencapai baku mutu pada hari ke-3 dari 9,75 mg/L menjadi 3,94 mg/L, pada hari ke-6 mengalami penurunan hingga 2,62 mg/L dan pada hari ke-9 sebesar 1,002 mg/L (efektivitas 89,73%), dengan. Nilai BCF sebesar 7,028 mengklasifikasikan tanaman sebagai akumulator logam yang sangat efektif, sementara TF sebesar 0,6 menunjukkan mekanisme fitostabilisasi. Uji statistik membuktikan perbedaan signifikan antara sistem dengan tanaman dan tanpa tanaman, memberikan validitas ilmiah yang tinggi.

SARAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, penelitian selanjutnya disarankan dapat menentukan masa jenuh tanaman *Echinodorus palaefolius* untuk mengetahui waktu penggantian yang optimal, penelitian lebih lanjut disarankan untuk memperhatikan pertumbuhan *Echinodorus palaefolius* selama proses fitoremediasi berlangsung guna melihat toleransi tanaman terhadap kontaminan dan melakukan variasi rasio biomassa tanaman terhadap volume air guna menentukan kondisi optimal untuk efektivitas fitoremediasi maksimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Ashari, A., Budianta, D., & Setiabudidaya, D. (2015). Efektivitas Elektroda pada Proses Elektrokoagulasi untuk Pengolahan Air Asam Tambang. *Jurnal Penelitian Sains*, 17(2), 45–50.
- Caroline, J., & Moa, G. A. (2015). Fitoremediasi logam timbal (Pb) (*Echinodorus palaefolius*) pada industri peleburan tembaga dan kuningan. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Terapan III*, 10(3), 733–744.
- Dr. Agus Suprpto, S. P. M. P. I. P. M., Rohmatin Agustina, S. P. M. P., Ida Bagus Gde Pranatayana, S. P. M. P., Angga Adriana Imansyah, S. S. T. M. P., Dr. Oetami Dwi Hajoeningtjas, M. P., Dwi Ayu Lutfiani Amalia, S. S., Dr. Purwanto, S. P. M. S., Dr. Khamdan Khalimi, S. P. M. S., Rama Adi Pratama, S. P. M. P., & Ni Wayan Anik Leana, S. P. M. P. (2024). *Mikrobiologi Pertanian*. CV Rey Media Grafika.
- Fatiha, I. I., Firdhausi, N. F., & Zummah, A. (2025). Potensi Tumbuhan Melati Air (*Echinodorus radicans*) Terhadap Penurunan Kadar Timbal (Pb) dan Tembaga (Cu) Pada Limbah Cair Home Industry Batik di Desa Sendang Kabupaten Lamongan. *Bioscientist : Jurnal Ilmiah Biologi*, 13(1), 176.
- Fridtriyanda, A., Sutoyo, H. D., & Herniti, D. (2022). *Studi Literatur Jenis Tanaman Pengelola Air Asam Tambang Batubara Dengan Cara Fitoremediasi Pada Sistem Lahan Basah Buatan*. Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri Dan Informasi XVII Tahun 2022 (ReTII) November.
- Herniwanti, H. (2021). *Fitoremediasi Pengelolaan Limbah Air Asam Tambang* (W. Afrida, Ed.). Mitra Cendekia Media.
- Hidayat, L. (2017). Pengelolaan Lingkungan Areal Tambang Batubara (Studi Kasus Pengelolaan Air Asam Tambang (Acid Mining Drainage) di PT. Bhumi Rantau. *Adhum*, 7(1), 44–52.
- Isnaini, M., Win Afgani, M., Haqqi, A., & Azhari, I. (2025). Teknik Analisis Data Uji Normalitas. *Jurnal Cendekia Ilmiah*, 4(2).
- Kasman, M., Riyanti, A., & Kartikawati, C. E. (2019a). Fitoremediasi Logam Aluminium (Al) Pada Lumpur Instalasi Pengolahan Air Menggunakan Tanaman Melati Air (*Echinodorus palaefolius*). *Daur Lingkungan*, 2(1), 7–10.
- Kasman, M., Riyanti, A., & Kartikawati, C. E. (2019b). Fitoremediasi Logam Aluminium (Al) Pada Lumpur Instalasi Pengolahan Air Menggunakan Tanaman Melati Air (*Echinodorus palaefolius*). *Jurnal Daur Lingkungan*, 2(1), 7. <https://doi.org/10.33087/daurling.v2i1.17>
- Kementerian Negara Lingkungan Hidup. (2003). *Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 113 Tahun 2003*.
- Prasetya, A., Prihutami, P., Warisaura, A. D., Fahrurrozi, M., & Murti Petrus, H. T. B. (2020). Characteristic of Hg removal using zeolite adsorption and *Echinodorus palaefolius* phytoremediation in subsurface flow constructed wetland (SSF-CW) model. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(3), 1–8.
- Putri, R. W. P., Loekitowati Hariani, P., & Arifin, Z. (2023). Biokonsentrasi Faktor (BCF) dan Faktor Translokasi (TF) Purun tikus (*Eleocharis dulcis*) dalam Fitoremediasi Air Asam Tambang. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*, 5(1).
- Ramadhani, A. C., Sitorus, R. J., Muslimin, M., Putri, R. N., & Ernia, R. (2023). Analisis Pengaruh Tanaman Melati Air sebagai Fitoremediasi dalam Mengatasi Pencemaran Air Limpasan Stockpile Batubara. *Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi*, 23(2), 2050.
- Riyanti, A., Kasman, M., & Muhammad Riwan, dan. (2019). Efektivitas Penurunan Chemical Oxygen Demand (COD) dan pH Limbah Cair Industri Tahu dengan Tumbuhan Melati Air melalui Sistem Sub-Surface Flow Wetland. 2(1), 16–20.
- Saha, P., Shinde, O., & Sarkar, S. (2017). Phytoremediation of industrial mines wastewater using water hyacinth. *International Journal of Phytoremediation*, 19(1), 87–96.



DOI : 10.29408/jtl.v3i2.33555

URL : <http://doi.org/10.29408/jtl.v3i2.33555>

- Saputra, I., Haja Almuqarramah, T., Mustaqim, & Nurhayati. (2021). *Efektivitas Fitoremediasi Terhadap Kadar Amoniak Pada Air Limbah Budidaya Ikan Lele*. <https://doi.org/http://jurnal.abulyatama.ac.id/tilapia>
- Soegianto, A. (2023). *Dampak Logam Berat terhadap Biologi Ikan*. Penerbit NEM.
- Yulianti, R., Sukiyah, E., Sulaksana, N., Pertambangan, D., Kabupaten, E., & Jambi, S. P. (2016). *Dampak Limbah Penambangan Emas Tanpa Izin (Peti) Terhadap Kualitas Air Sungai Limun Kabupaten Sarolangun Propinsi Jambi*.
- Zerveas, S., Mente, M. S., Tsakiri, D., & Kotzabasis, K. (2021). Microalgal photosynthesis induces alkalization of aquatic environment as a result of H⁺ uptake independently from CO₂ concentration – New perspectives for environmental applications. *Journal of Environmental Management*, 289.