ISSN [e]: 2579-4264 | DOI: https://doi.org/10.26760/jrh.V10i3.263-274 November 2026

Vetiver Grass Biomass Variation on Lead Removal from Landfill Leachate Using Constructed Wetland

Erika Triambarwati[1*], Dedy Suprayogi[2], Sarita Oktorina[3]
[1,2,3]Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sunan Ampel, Kota Surabaya, Indonesia

Email: triambarwatierika@gmail.com*

Received 1 Oktober 2026| Revised 7 Oktober 2026| Accepted 15 Oktober 2026

ABSTRAK

Air lindi Tempat Pemrosesan Akhir mengandung logam berat timbal berpotensi mencemari lingkungan dan membahayakan kesehatan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi biomassa akar wangi (Chrysopogon zizanioides) terhadap efisiensi penurunan konsentrasi Pb dalam air lindi menggunakan constructed wetland tipe Horizontal Subsurface Flow. Penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap dengan variasi biomassa 200 g, 400 g dan 600 g serta satu reaktor kontrol dioperasikan secara batch selama 15 hari dengan konsentrasi awal Pb 0,398 mg/L. Hasil menunjukkan seluruh reaktor tanaman menurunkan Pb lebih baik daripada kontrol melalui mekanisme fitoremediasi, adsorpsi media dan aktivitas mikroorganisme rizosfer dengan efisiensi rata-rata meningkat seiring penambahan biomassa: 73,87% (200 g), 85,05% (400 g) dan 88,32% (600 g). Reaktor 400 g dan 600 g memenuhi baku mutu Permen LH No. 5 Tahun 2014 (0,1 mg/L). Namun, uji Kruskal-Wallis menunjukkan tidak terdapat perbedaan efisiensi yang signifikan antar variasi biomassa (H=3,987; Sig.=0,263>0,05) karena kontribusi mekanisme abiotik media filtrasi yang cukup tinggi pada kontrol (54,02%).

***Kata kunci**: Air lindi ; Lahan basah buatan ; Akar wangi ; Chrysopogon zizanioides ; Logam Timbal*

ABSTRACT

Leachate from Final Waste Processing Sites contains heavy metal lead which can pollute the environment and endanger health. This study aimed to analyze the effect of vetiver grass (Chrysopogon zizanioides) biomass variation on the efficiency of Pb concentration reduction in leachate using a Horizontal Subsurface Flow constructed wetland. The study used a Completely Randomized Design with biomass variations of 200 g, 400 g and 600 g along with one control reactor, operated in batch mode for 15 days with an initial Pb concentration of 0.398 mg/L. Results showed that all planted reactors reduced Pb better than the control through phytoremediation, media adsorption and rhizosphere microbial activity with average removal efficiency increasing with biomass addition: 73.87% (200 g), 85.05% (400 g) and 88.32% (600 g). The 400 g and 600 g reactors met the quality standard of Permen LH No. 5/2014 (0.1 mg/L). However, the Kruskal-Wallis test showed no significant difference in efficiency among biomass variations (H=3.987; Sig.=0.263>0.05), attributed to the relatively high contribution of abiotic mechanisms in the filtration media, also evident in the control (54.02%).

***Keywords**: Leachate ; Constructed wetland ; Vetiver grass ; Chrysopogon zizanioides ; Lead*

1. PENDAHULUAN

Pengelolaan sampah perkotaan di Indonesia masih menghadapi tantangan yang kompleks. Berdasarkan data SIPSN tahun 2023 volume timbunan sampah nasional mencapai 18,2 juta ton [1]. Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) sebagai infrastruktur utama pengelolaan sampah berpotensi menghasilkan air lindi yaitu cairan hasil perkolasi air hujan melalui timbunan sampah yang mengandung bahan organik, senyawa anorganik dan logam berat berbahaya. Apabila tidak dikelola secara optimal, air lindi dapat mencemari tanah, air permukaan dan air tanah di sekitar TPA [2].

Salah satu logam berat yang secara konsisten teridentifikasi dalam air lindi adalah timbal (Pb) yang bersifat toksik, persisten dan tidak dapat terdegradasi secara alami serta berpotensi terakumulasi dalam organ vital manusia [3]. Konsentrasi Pb pada air lindi TPA umumnya jauh melampaui baku mutu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014 sebesar 0,1 mg/L [4], terutama pada tingkat yang sangat toksik bagi organisme hidup apabila diaplikasikan secara langsung tanpa pengenceran. Tingginya toksisitas air lindi berpotensi menghambat pertumbuhan, menyebabkan stres fisiologis hingga kematian tanaman uji sehingga mekanisme fitoremediasi tidak dapat berlangsung secara optimal. Oleh karena itu, air lindi perlu diencerkan terlebih dahulu sebelum diaplikasikan pada sistem *constructed wetland* agar tanaman akar wangi mampu bertahan hidup dan berfungsi secara efektif selama masa perlakuan.

Beberapa teknologi pengolahan air lindi telah dikembangkan dan diterapkan di antaranya metode fisika dan kimia seperti koagulasi flokulasi, adsorpsi serta teknologi membran [5]. Meskipun metode-metode tersebut mampu menurunkan kadar polutan secara efektif, penerapannya tidak lepas dari keterbatasan yakni biaya operasional yang relatif tinggi, konsumsi energi yang besar dan potensi timbulnya residu lumpur sebagai limbah sekunder yang memerlukan penanganan lanjutan. Kondisi tersebut mendorong kebutuhan terhadap teknologi pengolahan alternatif yang lebih berkelanjutan, hemat energi dan ramah lingkungan.

Sistem *constructed wetland* merupakan teknologi pengolahan berbasis alam yang memanfaatkan interaksi antara tanaman, media tanam dan mikroorganisme dalam mendegradasi dan mengakumulasi polutan dengan keunggulan biaya operasional rendah, kebutuhan energi minimal dan mudah dioperasikan. Teknologi ini terbukti efektif mereduksi logam berat seperti Pb melalui mekanisme fitoremediasi dan adsorpsi [6].

Penelitian Siswoyo, dkk (2023) mengkaji penyerapan Pb pada air lindi TPA menggunakan eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) menyatakan bahwa peningkatan biomassa tanaman secara langsung memperluas permukaan akar yang berkontak dengan media tercemar sehingga meningkatkan kapasitas akumulasi kontaminan. Penurunan Pb sebesar 0,086 mg/L pada jaringan akar setelah 12 hari[6]. Penelitian Tangahu, dkk (2022) mengkaji removal Pb pada air tercemar logam secara umum menggunakan *Scirpus grossus* melalui pendekatan optimasi *response surface methodology* (RSM) tanpa menguji pengaruh variasi biomassa tanaman dan efisiensi penyisihan Pb sebesar 60–85%[7]. Berbeda dengan kedua penelitian tersebut, penelitian ini menggunakan tanaman akar wangi (*Chrysopogon zizanioides*) yang memiliki sistem perakaran serabut lebih dalam dan rapat sehingga berpotensi memberikan luas permukaan kontak akar yang lebih besar, serta secara spesifik menganalisis pengaruh variasi berat biomassa tanaman terhadap efisiensi penyisihan Pb pada air lindi TPA

Kajian yang menganalisis perbedaan variasi biomassa tanaman akar wangi terhadap efisiensi penyisihan Pb pada air lindi menggunakan sistem *Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland* (HSSF CW)

masih sangat terbatas. HSSF dipilih karena aliran horizontal di bawah permukaan media memberikan waktu kontak yang lebih panjang antara air lindi, akar tanaman dan mikroorganisme sehingga berpotensi mengoptimalkan penyerapan Pb. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perbedaan variasi berat biomassa tanaman akar wangi (*Chrysopogon zizanioides*) terhadap efisiensi penurunan konsentrasi logam timbal (Pb) pada air lindi menggunakan sistem *Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland*.

2. METODOLOGI

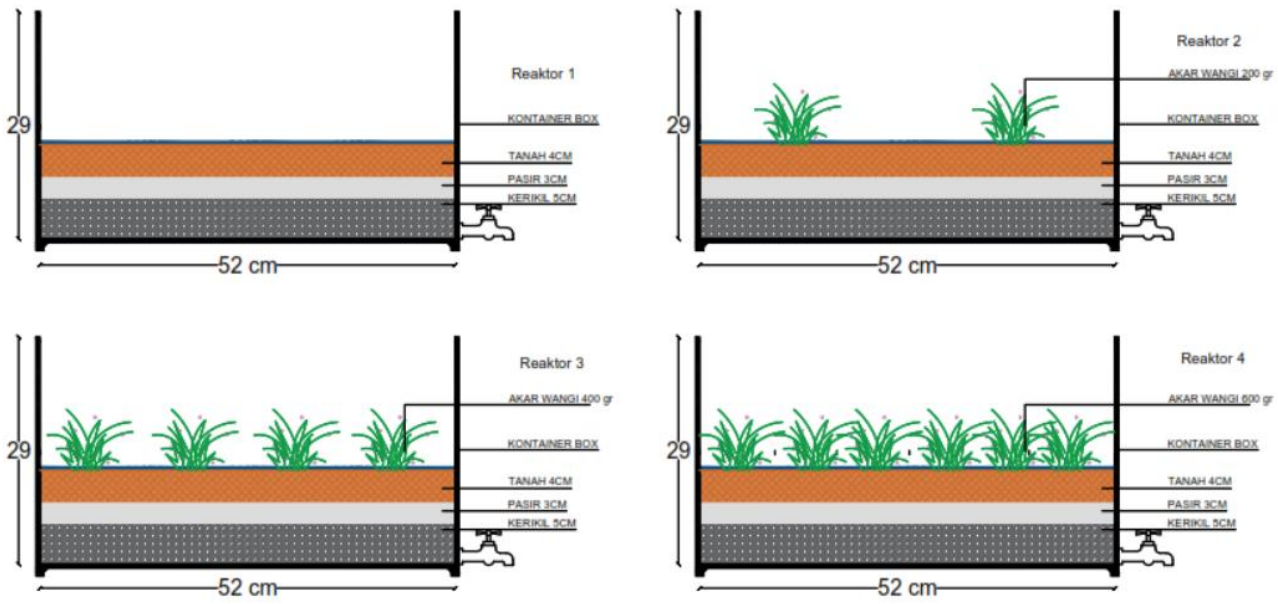
Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan Rancangan Acak Lengkap (RAL) yang terdiri atas 3 perlakuan dan 1 kontrol. Setiap perlakuan dilakukan sebanyak 2 pengulangan, sedangkan reaktor kontrol dioperasikan tanpa pengulangan (n=1) karena keterbatasan jumlah reaktor dan ruang yang tersedia selama masa penelitian, sehingga total terdapat 7 reaktor. Terdapat tiga reaktor perlakuan dengan variasi berat tanaman akar wangi yaitu 200 gram, 400 gram dan 600 gram (berat basah). Seluruh reaktor menggunakan media yang sama berupa kerikil setebal 5 cm, pasir 3 cm dan tanah 4 cm. Ketiadaan pengulangan pada reaktor kontrol merupakan keterbatasan desain penelitian ini karena secara statistik menurunkan kekuatan uji (*statistical power*) saat perbandingan antar kelompok dilakukan menggunakan uji Kruskal-Wallis. Keterbatasan ini disadari sepenuhnya oleh peneliti dan dibahas secara rinci beserta implikasinya terhadap interpretasi hasil pada bagian **3.6.**

2.1 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan adalah reaktor *container box*, keran, gelas ukur, *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS) dan *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy* (ICP-OES). Bahan yang digunakan meliputi air lindi yang diencerkan hingga konsentrasi 50%, tanaman akar wangi (*Chrysopogon zizanioides*) berusia 3 bulan dengan panjang akar dan daun yang relatif seragam serta media tanam berupa kerikil, pasir dan tanah sebagai media filtrasi dalam reaktor *constructed wetland.*

2.2 Pembuatan Reaktor

Reaktor *constructed wetland* menggunakan *container box* yang dilengkapi dengan keran pada bagian bawah untuk pengambilan sampel. Media tanam disusun berlapis dari bawah ke atas terdiri dari kerikil setebal 5 cm, pasir 3 cm dan tanah 4 cm. Tanaman akar wangi ditanam di atas media dengan variasi berat 200 gram, 400 gram dan 600 gram. Reaktor kontrol (R1) disusun dengan susunan media yang sama namun tanpa tanaman. Seluruh reaktor dirancang dengan sistem aliran horizontal di bawah permukaan media (*horizontal subsurface flow*) untuk memastikan air lindi berkontak langsung dengan zona perakaran tanaman. Berikut ini desain reaktor *constructed wetland:*



Gambar 1. Desain Reaktor *Constructed Wetland*

2.3 Proses Aklimatisasi dan Perlakuan Penelitian

Tanaman akar wangi terlebih dahulu diaklimatisasi untuk memastikan tanaman dapat beradaptasi terhadap kondisi lingkungan dan media tanam yang digunakan dalam reaktor. Proses aklimatisasi dilakukan selama 7 hari dengan menanam akar wangi pada media reaktor menggunakan air bersih hingga tanaman menunjukkan kondisi yang stabil dan siap untuk diberi perlakuan air lindi [5]. Pengamatan kondisi tanaman dilakukan selama tahap aklimatisasi meliputi pertumbuhan daun, kondisi akar dan keseragaman tanaman antar reaktor.

Setelah aklimatisasi selesai, air lindi diencerkan hingga konsentrasi 50% kemudian dimasukkan ke masing-masing reaktor sebanyak 10 liter. Sistem dioperasikan secara *batch* selama 15 hari. Pengambilan sampel air lindi dilakukan pada hari ke 0, ke 5, ke 10 dan ke 15. Pada setiap waktu pengambilan, sampel dianalisis untuk mengukur konsentrasi logam Pb menggunakan AAS. Selain sampel air, pada akhir periode penelitian (hari ke 15) dilakukan pengambilan sampel bagian akar dan batang tanaman akar wangi untuk dianalisis kandungan logam Pb menggunakan ICP-OES.

2.4 Analisis Data

Analisis digunakan untuk mengetahui perbedaan efisiensi penurunan Pb berdasarkan variasi berat tanaman akar wangi. Nilai efesiensi dalam penelitian dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut [8]

$$Ef = \frac{(Co-Ct)}{Co} \text{ x } 100\%$$

Keterangan:
Ef = Efisiensi Variasi Tanaman
Ct = Konsentrasi Akhir Sampel
Co = Konsentrasi Awal Sampel

Hasil efisiensi dari seluruh reaktor dibandingkan untuk mengetahui perbedaan variasi biomassa tanaman terhadap kemampuan penyisihan logam Pb. Selanjutnya, dilakukan analisis statistik yang diawali

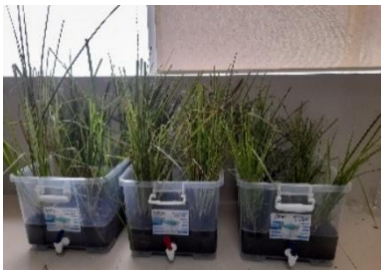
dengan uji normalitas menggunakan uji Shapiro-Wilk. Karena data tidak terdistribusi normal, pengujian hipotesis dilakukan menggunakan uji nonparametrik kruskal-wallis melalui perangkat lunak SPSS untuk mengetahui ada tidaknya perbedaan yang signifikan antar perlakuan pada taraf signifikansi $\alpha = 0{,}05$.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Aklimatisasi

Aklimatisasi dilakukan selama 7 hari menggunakan media kerikil, pasir, tanah dan air bersih tanpa pencemar untuk memastikan tanaman beradaptasi dengan media tanam dan berada dalam kondisi stabil sebelum menerima paparan air lindi [7].

Hari ke 1



akar wangi berwarna hijau dan terlihat segar

Hari ke 2



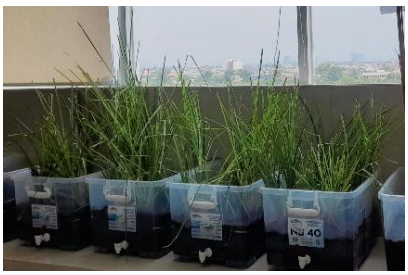
akar wangi terlihat segar dan berwarna hijau

Hari ke 3



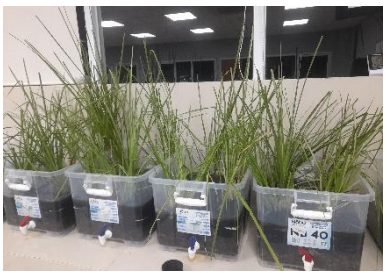
akar wangi masih terlihat segar dan berwarna hijau di bagian batang maupun daun

Hari ke 4



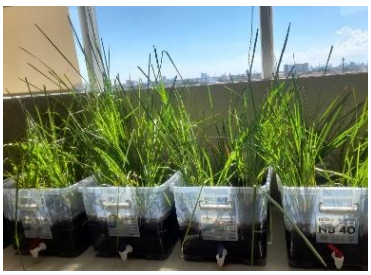
tanaman akar wangi bagian daun terlihat lebih segar dan masih berwarna hijau

Hari ke 5



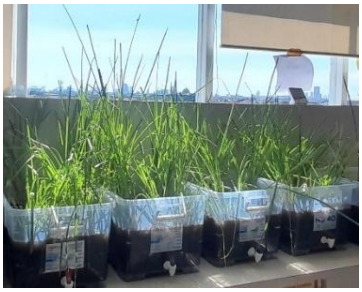
akar wangi bagian daun semakin memanjang 2-3 cm dan berwarna hijau segar

Hari ke 6



akar wangi terlihat lebih segar dan berwarna hijau

Hari ke 7



akar wangi bagian daun semakin tinggi 3-4 cm dan terlihat berwarna hijau segar

Gambar 2. Kondisi Tanaman Tahap Aklimatisasi

Selama 7 hari aklimatisasi, seluruh tanaman akar wangi menunjukkan kondisi yang baik ditandai dengan daun yang segar, berwarna hijau dan pertambahan panjang daun yang progresif dari 2–3 cm pada hari ke 5 hingga 3–4 cm pada hari ke 6 dan ke 7. Tidak ditemukan tanaman yang mengalami kematian selama proses ini, sehingga seluruh tanaman dinyatakan lolos tahap aklimatisasi. Keberhasilan adaptasi ini membuktikan *Chrysopogon zizanioides* memiliki toleransi tinggi terhadap perubahan media tanam sehingga proses adaptasi berlangsung relatif cepat. [9]. Keberhasilan aklimatisasi menjadi syarat penting sebelum tanaman dipindahkan ke reaktor perlakuan karena tanaman yang telah beradaptasi dengan baik akan lebih optimal dalam menjalankan fungsi fitoremediasi untuk menyerap logam Pb dari air lindi selama 15 hari masa perlakuan [10].

3.2 Perlakuan Penelitian

Pengamatan sistem *constructed wetland* logam berat timbal menggunakan tanaman akar wangi selama 15 hari. HRT optimal untuk *constructed wetland* adalah 15 hari untuk memaksimalkan efisiensi pengolahan [11].

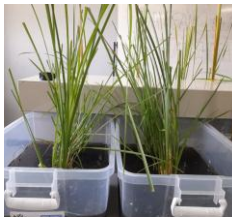
Hari ke 0



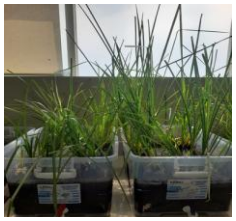
R1 (Kontrol)



R2 & R3 (200gr)



R4 & R5 (400 gr)

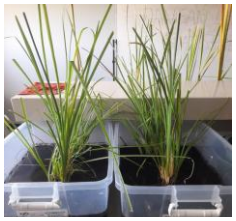


R6 & R7 (600 gr)

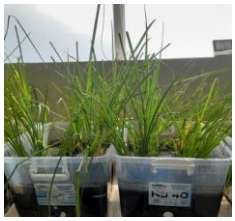
Hari ke 5



R1 (Kontrol)



R2 & R3 (200gr)



R4 & R5 (400 gr)

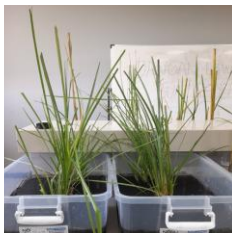


R6 & R7 (600 gr)

Hari ke 10



R1 (Kontrol)



R2 & R3 (200gr)



R4 & R5 (400 gr)

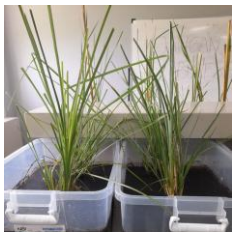


R6 & R7 (600 gr)

Hari ke 15



R1 (Kontrol)



R2 & R3 (200gr)



R4 & R5 (400 gr)



R6 & R7 (600 gr)

Gambar 3. Kondisi Tanaman Tahap Perlakuan

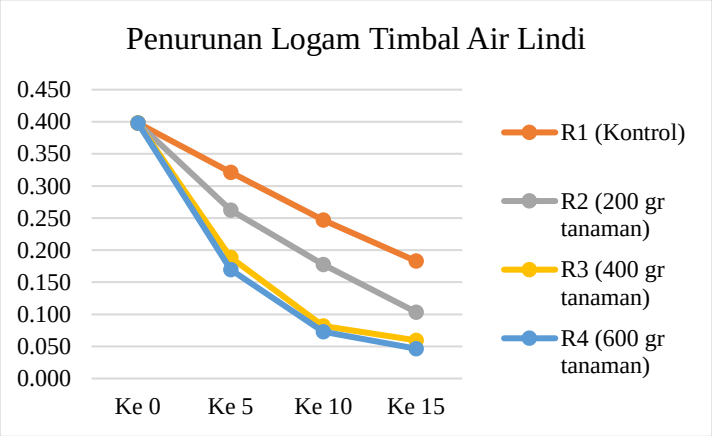
Pengamatan morfologi tanaman akar wangi selama 15 hari menunjukkan perubahan fisik yang berlangsung secara bertahap. Pada hari ke 0 seluruh tanaman berada dalam kondisi segar dengan daun berwarna hijau sebagai hasil proses aklimatisasi 7 hari sebelumnya. Pada hari ke 5 tanaman masih menunjukkan pertumbuhan aktif dengan pertambahan panjang daun berkisar 2–4 cm meskipun sebagian daun mulai menguning pada bagian pucuk. Pertambahan tinggi tanaman mengindikasikan bahwa proses metabolisme masih berlangsung meskipun tanaman telah terpapar air lindi mengandung Pb [12].

Memasuki hari ke 10 muncul bintik-bintik pada permukaan daun dan pengeringan pada bagian pucuk disertai pertambahan panjang daun 3–8 cm yang mengindikasikan tekanan fisiologis (fitotoksisitas) akibat akumulasi logam Pb dalam jaringan tanaman. Pada hari ke 15 gejala keracunan logam semakin nyata ditandai dengan klorosis dan nekrosis pada bagian batang bawah sesuai. Munculnya anakan baru pada seluruh reaktor tanaman mengindikasikan toleransi yang cukup tinggi dari tanaman akar wangi terhadap paparan logam Pb. Reaktor dengan biomassa lebih besar (400 g dan 600 g) menunjukkan pertumbuhan daun yang lebih panjang. Biomassa yang lebih besar meningkatkan luas permukaan akar sehingga kapasitas penyerapan logam berat turut meningkat [9].

Reaktor kontrol tanpa tanaman menunjukkan penyusutan volume air yang lebih signifikan akibat evaporasi langsung. Munculnya gelembung gas pada hari ke 5 hingga ke 10 mengindikasikan aktivitas dekomposisi anaerobik yang menghasilkan gas CH_4 dan CO_2 akibat tidak adanya suplai oksigen melalui zona perakaran [13]. Endapan pada permukaan media reaktor kontrol merupakan kombinasi sedimentasi partikel tersuspensi dan presipitasi kimia Pb dalam bentuk $Pb(OH)_2$ atau $PbCO_3$. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme penurunan Pb pada reaktor kontrol hanya bergantung pada sedimentasi dan presipitasi kimia tanpa kontribusi fitoremediasi.

3.3 Kadar Logam Pb Air Lindi

Penelitian ini menggunakan sistem *constructed wetland* secara *batch* dengan tiga variasi biomassa tanaman akar wangi (200 g, 400 g, dan 600 g) untuk mengkaji perbedaan jumlah biomassa terhadap efisiensi penurunan konsentrasi logam Pb dalam air lindi. Perubahan kadar Pb sebelum dan sesudah perlakuan digunakan sebagai indikator kemampuan sistem dalam mereduksi pencemar logam berat melalui peran *C. zizanioides* sebagai agen fitoremediasi.



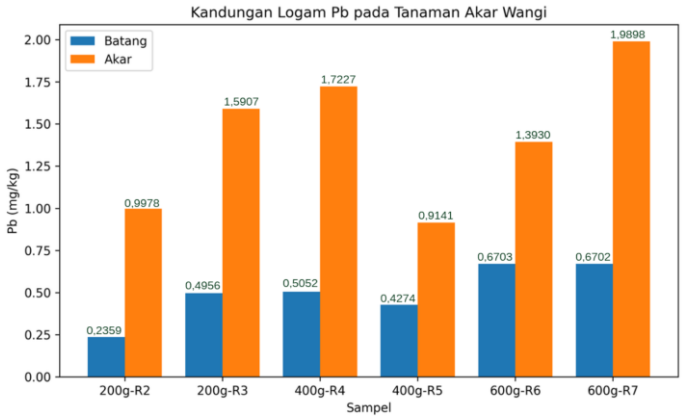
Gambar 4. Rata-Rata Penurunan Logam Pb Air Lindi

Konsentrasi Pb pada seluruh reaktor menunjukkan penurunan konsisten dari hari ke 0 hingga ke 15. Konsentrasi awal sebesar 0,398 mg/L melampaui baku mutu Permen LH No. 5 Tahun 2014. Pada hari ke 15, reaktor kontrol (R1) hanya mampu menurunkan Pb hingga 0,183 mg/L melalui sedimentasi, presipitasi kimia, absorbsi dan adsorpsi media. Reaktor biomassa 200 g mencapai konsentrasi akhir rata-rata 0,104 mg/L, sedangkan reaktor 400 g mencapai 0,060 mg/L dan reaktor 600 g mencapai 0,047 mg/L.

Laju penurunan Pb paling signifikan terjadi pada hari ke 0 hingga ke 5, didorong oleh tingginya gradien konsentrasi awal yang memaksimalkan adsorpsi dan penyerapan biologis. Pada hari ke 10 hingga ke 15, laju penurunan melambat akibat kejenuhan kapasitas adsorpsi media dan akumulasi jaringan akar [7]. Lebih tingginya efisiensi removal pada reaktor tanaman dibandingkan kontrol mengonfirmasi kontribusi nyata tanaman akar wangi melalui mekanisme fitostabilisasi, dimana ion Pb^{2+} terimmobilisasi pada dinding sel akar melalui pengikatan gugus -COOH dan -OH sehingga mencegah Pb kembali terlarut [9]. Peningkatan biomassa secara konsisten meningkatkan efisiensi removal karena memperluas permukaan akar yang berkontak dengan air lindi [14].

3.4 Kadar Logam Pb Tanaman Akar Wangi

Pengukuran kadar Pb tanaman akar wangi dilakukan pada bagian akar dan batang setelah proses destruksi sampel, kemudian dianalisis menggunakan instrumen ICP. Hasil pengukuran dinyatakan dalam satuan mg/kg. Berikut ini hasil analisis kadar Pb jaringan tanaman akar wangi bagian akar dan batang.



Gambar 5. Kandungan Logam Pb Tanaman

Timbal diserap tanaman terutama melalui akar bersama air dan unsur hara, kemudian terikat pada dinding sel atau terakumulasi di jaringan akar dengan sebagian kecil ditranslokasikan ke batang melalui sistem pembuluh *xilem* dan *floem*. Hasil analisis menunjukkan bahwa semakin besar biomassa tanaman, semakin tinggi akumulasi Pb pada kedua bagian tersebut. Peningkatan ini berkaitan dengan semakin luasnya permukaan akar yang berkontak dengan air lindi sehingga kapasitas penyerapan logam meningkat [9]. Dalam kondisi paparan lindi, akar wangi mampu mengakumulasi Pb pada rentang 156,37–365,27 mg/kg berat kering [15].

Tingginya akumulasi Pb di bagian akar dibandingkan batang mengindikasikan bahwa mekanisme dominan yang berlangsung adalah fitostabilisasi yakni logam berat terikat dan terperangkap di jaringan akar sebagai mekanisme pertahanan untuk mencegah gangguan metabolisme [16]. Meskipun demikian, terdeteksinya Pb pada batang menunjukkan adanya translokasi parsial ke organ atas dalam jumlah terbatas yang mengonfirmasi bahwa akar wangi lebih berperan sebagai stabilisator logam di zona akar dibandingkan sebagai ekstraktor [14]. Kemampuan *C. zizanioides* dalam mempertahankan fungsi fisiologis pada kondisi paparan lindi yang tinggi dengan efisiensi penyisihan logam berat mencapai 98% pada kondisi optimal. Akar wangi memiliki komponen biologis yang efektif dalam menstabilkan logam di dalam sistem *constructed wetland* [17].

3.5 Efisiensi Removal

Penurunan konsentrasi timbal (Pb) dalam air lindi dilakukan dengan memanfaatkan media dan tanaman. Tanaman akar wangi mampu mengolah kandungan timbal (Pb). Efisiensi removal logam Pb sebagai berikut:

Tabel 1. Perbandingan Rata-rata efisiensi removal logam Pb

Keterangan	Ke 5	Ke 10	Ke 15
Reaktor Kontrol	19,35%	37,94%	54,02%
Reaktor 200 gr	34,05%	55,40%	73,87%
Reaktor 400 gr	52,64%	79,40%	85,05%
Reaktor 600 gr	57,41%	81,66%	88,32%

Penurunan konsentrasi Pb dalam air lindi berlangsung melalui mekanisme adsorpsi media dan fitoremediasi yang meliputi rhizofiltrasi, Fitostabilisasi dan fitoekstraksi oleh tanaman akar wangi. Reaktor kontrol (R1) tanpa tanaman menunjukkan efisiensi removal sebesar 19,35% - 54,02% selama 15 hari dengan konsentrasi Pb akhir 0,183 mg/L yang masih melampaui baku mutu Permen LH No. 5 Tahun 2014 (0,1 mg/L).

Reaktor biomassa 200 g mencapai efisiensi 73,87% dengan konsentrasi akhir 0,104 mg/L, biomassa 400 g sebesar 85,05% dengan konsentrasi akhir 0,060 mg/L dan biomassa 600 g sebesar 88,32% dengan konsentrasi akhir 0,047 mg/L pada hari ke 15. Seluruh reaktor tanaman memenuhi baku mutu, sedangkan reaktor kontrol tidak.

Untuk memperkuat validitas hasil penelitian ini, efisiensi removal Pb dibandingkan dengan beberapa penelitian terdahulu yang menggunakan tanaman dan media serupa yang disajikan pada **Tabel 2** dibawah ini.

Tabel 2. Perbandingan Efisiensi Removal

Peneliti	Tanaman	Media	Waktu	Efisiensi Removal
Suelee, 2016	*Chrysopogon zizanioides*	Air Tambang	21 Hari	80–94%
Ramos-Arcos et al. (2019)	*Chrysopogon zizanioides*	Air Lindi	60 Hari	69,20%
Tangahu et al. (2022)	*Chrysopogon zizanioides*	Air Limbah	32 Hari	60–85%
Toscano Mouthon et al. (2026)	*Chrysopogon zizanioides*	Air Lindi	21 Hari	98%
Data penelitian ini	***Chrysopogon zizanioides***	**Air Lindi**	**15** Hari	**73,87%-88,32%**

Berdasarkan **Tabel 2** efisiensi removal Pb pada penelitian ini sebesar 88,32% dalam 15 hari. Tingginya efisiensi removal Pb disebabkan oleh *Chrysopogon zizanioides* memiliki sistem perakaran yang lebat dan dalam sehingga memperluas bidang kontak dengan media tercemar untuk menyerap dan mengakumulasi logam berat. Selain itu, kemampuan removal logam umumnya meningkat seiring dengan bertambahnya biomassa tanaman yang digunakan dalam sistem pengolahan [7].

Secara keseluruhan, terdapat korelasi positif antara peningkatan biomassa tanaman dan efisiensi removal Pb. Biomassa yang lebih besar memperluas bidang kontak akar dengan media tercemar, sehingga kapasitas penyerapan logam meningkat [18]. Efisiensi removal Pb sebesar 60–85% menggunakan akar wangi pada *sistem constructed wetland* [7]. *Chrysopogon zizanioides* mampu menyisihkan logam berat dari air lindi [17].

3.6 Analisis Statistik

Uji normalitas Shapiro-Wilk menunjukkan bahwa kelompok 400 g (Sig. = 0,029) dan 600 g (Sig. = 0,023) tidak berdistribusi normal, sehingga analisis dilanjutkan menggunakan uji nonparametrik Kruskal-Wallis. Hasil uji menunjukkan nilai H = 3,987 dengan Asymp. Sig. = 0,263 > 0,05 sehingga H_0 diterima yang berarti tidak terdapat perbedaan signifikan secara statistik antar keempat kelompok perlakuan.

Secara deskriptif terdapat konsistensi bahwa peningkatan biomassa tanaman berbanding lurus dengan efisiensi penurunan Pb. Tidak signifikannya hasil uji disebabkan oleh dominasi mekanisme abiotik pada reaktor kontrol yang telah mencapai efisiensi 54,02% melalui presipitasi kimia [8], kompetisi serapan multilogam di zona rizosfer [7], keterbatasan jumlah ulangan yang menurunkan *statistical power* [19] dan variabilitas biologis antar individu tanaman dalam mengaktifkan mekanisme toleransi logam [20].

Hasil uji Kruskal-Wallis yang tidak signifikan ($p > 0,05$) mengindikasikan bahwa penambahan biomassa tanaman dari 200 g hingga 600 g secara ekonomi kurang efisien apabila diterapkan pada skala lebih besar, karena tidak diimbangi peningkatan kinerja yang signifikan. Tingginya efisiensi reaktor kontrol abiotik (54,02%) menunjukkan media filtrasi turut berkontribusi besar melalui adsorpsi dan presipitasi kimia, sehingga sistem *constructed wetland* ini kemungkinan tidak sepenuhnya didominasi mekanisme biotik. Meskipun demikian, selisih efisiensi kontrol dan reaktor tanaman (73,87–88,32%) membuktikan kontribusi nyata akar wangi. Melambatnya laju penurunan Pb pada hari ke-10 hingga ke-15 mengindikasikan bahwa media filtrasi (kerikil, pasir dan tanah telah mendekati kapasitas retensi maksimumnya melalui mekanisme adsorpsi dan presipitasi kimia, sehingga kontribusi abiotiknya cenderung stagnan setelah titik jenuh tersebut tercapai. Sebaliknya, tanaman akar wangi masih dapat terus mengakumulasi Pb pada jaringan akar dan batang seiring pertumbuhannya sehingga pada durasi

operasi yang lebih panjang atau beban volume lindi yang lebih besar, kontribusi mekanisme biotik berpotensi menjadi lebih dominan dibandingkan kontribusi media abiotik yang telah jenuh.

4. KESIMPULAN

Sistem *constructed wetland* tipe *Horizontal Subsurface Flow* (HSSF) dengan tanaman akar wangi (*Chrysopogon zizanioides*) terbukti efektif menurunkan konsentrasi logam Pb dalam air lindi TPA dari 0,398 mg/L menjadi 0,047–0,104 mg/L pada reaktor tanaman setelah 15 hari perlakuan melalui mekanisme fitoremediasi, adsorpsi media dan aktivitas mikroorganisme rizosfer. Efisiensi removal meningkat seiring penambahan biomassa yakni 73,87% (200 g), 85,05% (400 g) dan 88,32% (600 g). Reaktor biomassa 400 g dan 600 g telah memenuhi baku mutu Permen LH No. 5 Tahun 2014 sebesar 0,1 mg/L. Hasil uji Kruskal-Wallis tidak menunjukkan perbedaan signifikan antar perlakuan (H = 3,987) Sig. = 0,263 > 0,05 yang disebabkan oleh tingginya efisiensi abiotik reaktor kontrol (54,02%), kompetisi serapan multilogam di rizosfer, keterbatasan jumlah ulangan dan variabilitas biologis antar tanaman.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Ampel Surabaya dan seluruh pihak yang telah memberikan bantuan maupun dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1] "SIPSN." Accessed: Feb. 22, 2026. [Online]. Available: https://portal-sipsn.kemenlh.go.id/

[2] E. K. Sari and L. Lucyana, "Evaluasi Instalasi Pengolahan Air Lindi Di Tempat Pembuangan Akhir Sampah (TPAS) Simpang Kandis Kabupaten Ogan Komering Ulu," *def*, vol. 6, no. 1, pp. 33–41, Dec. 2025, doi: 10.31851/deformasi.v6i1.5510.

[3] B. Suhartawan and H. Suprihatin, "Pengelolaan Limbah Padat, Limbah Industry Dan B3," 2023.

[4] K. L. H. (atau M. L. H. Indonesia, *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah*. 2014.

[5] R. Kurniawan and E. Hendriarianti, "Fitoremediasi Dalam Menurunkan Kadar BOD, COD, Amoniak, Dan Fosfat Di Outlet IPAL MCK Terpadu Tlogomas Kota Malang Dengan Menggunakan Tanaman Penahan Erosi," 2022.

[6] E. Siswoyo, Novriyanto, and Kasam, "Penyerapan Logam Berat Timbal (Pb) Air Lindi Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) oleh Eceng gondok (Eichhornia crassipes) dalam Sistem Constructed Wetland," *AJIE*, pp. 76–81, Sep. 2023, doi: 10.20885/ajie.vol7.iss3.art1.

[7] B. V. Tangahu, S. R. Sheikh Abdullah, H. Basri, M. Idris, N. Anuar, and M. Mukhlisin, "Lead (Pb) removal from contaminated water using constructed wetland planted with Scirpus grossus: Optimization using response surface methodology (RSM) and assessment of rhizobacterial addition," *Chemosphere*, vol. 291, p. 132952, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132952.

[8] J. Vymazal, "Constructed Wetlands for Wastewater Treatment," *Water*, vol. 2, no. 3, pp. 530–549, Aug. 2010, doi: 10.3390/w2030530.

[9] L. T. Danh, P. Truong, R. Mammucari, T. Tran, and N. Foster, "Vetiver Grass, *Vetiveria zizanioides* : A Choice Plant For Phytoremediation Of Heavy Metals And Organic Wastes," *International Journal of Phytoremediation*, vol. 11, no. 8, pp. 664–691, Oct. 2009, doi: 10.1080/15226510902787302.

[10] D. A. ALWI, “Unjuk Kerja Hybrid Constructed Wetland Kombinasi Dengan Konsorsium Bakteri Untuk Removal Kandungan Logam, Tss, Dan Warna Pada Air Limbah Tenun,” 2022.
[11] L. Pusparinda and I. B. Santoso, “Studi Literatur Perencanaan Floating Treatment Wetland di Indonesia,” *JTITS*, vol. 5, no. 2, pp. A471–A475, Oct. 2016, doi: 10.12962/j23373539.v5i2.17707.
[12] R. Nurtana, A. Yulianto, and J. A. Fajri, “Analisis Removal Logam Pada Air Limbah Balai Yasa Yogyakarta PT. Kereta Api Indonesia Menggunakan Tanaman Vetiver (Vetiveria zizanioides) Dan Bakteri Dengan Metode Floating Treatment Wetland,” 2018.
[13] R. H. Kadlec and S. D. Wallace, *Treatment wetlands*, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009.
[14] E. A. Priantoro, P. Suryaatmana, D. Sumiarsa, E. S. B. Butar, and T. Sembiring, “Fitoremediasi Logam Berat Sistem Lahan Basah Terapung Menggunakan Tanaman Akar Wangi (Chryzophogon zizanioides (L.) Roberty) sebagai Hiperakumulator,” *E. A.*, vol. 26, 2025.
[15] C. C. Ng, A. N. Boyce, M. M. Rahman, M. R. Abas, and N. Z. Mahmood, “Phyto-evaluation of Cd-Pb Using Tropical Plants in Soil-Leachate Conditions,” *Air, Soil and Water Research*, vol. 11, p. 1178622118777763, Jan. 2018, doi: 10.1177/1178622118777763.
[16] A. Patandungan, S. Hs, and A. Aisyah, “Fitoremediasi Tanaman Akar Wangi (Vetiver zizanioides) Terhadap Tanah Tercemar Logam Kadmium (Cd) Pada Lahan TPA Tamangapa Antang Makassar,” *Al-Kimia*, vol. 4, no. 2, pp. 8–21, Dec. 2016, doi: 10.24252/al-kimia.v4i2.1676.
[17] F. Toscano Mouthon, L. P. Tejeda-Benitez, and W. Marimón-Bolívar, “Phytoremediation of young landfill leachates using *Chrysopogon zizanioides*: evaluation of heavy metal removal and post-treatment toxicity,” *South African Journal of Chemical Engineering*, vol. 55, pp. 40–49, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.sajce.2025.10.005.
[18] E. Handayanto, Y. Nuraini, N. Muddarisna, N. Syam, and A. Fiqri, *Fitoremediasi dan Phytomining Logam Berat Pencemar Tanah*. Universitas Brawijaya Press, 2017.
[19] M. Mahmoudpour, S. Gholami, M. Ehteshami, and M. Salari, “Evaluation of Phytoremediation Potential of Vetiver Grass (Chrysopogon zizanioides (L.) Roberty) for Wastewater Treatment,” *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2021, no. 1, p. 3059983, 2021, doi: 10.1155/2021/3059983.
[20] V. R. Pidatala, K. Li, D. Sarkar, W. Ramakrishna, and R. Datta, “Identification of Biochemical Pathways Associated with Lead Tolerance and Detoxification in Chrysopogon zizanioides L. Nash (Vetiver) by Metabolic Profiling,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 50, no. 5, pp. 2530–2537, Mar. 2016, doi: 10.1021/acs.est.5b04725.