

Pemanfaatan *Hydrilla verticillata* untuk Menurunkan Konsentrasi Cu²⁺ pada Air Limbah Pelapisan Logam melalui Variasi Berat Tumbuhan

Nuril Izzah, Aussie Amalia*, Syadzadhiya Qothrunada Zakiyayasin Nisa'

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: aussieamalia.tl@upnjatim.ac.id

Diterima: 16 November 2025

Disetujui: 21 November 2025

Abstract

Liquid waste from metal-plating industries is known to contain copper (Cu²⁺), which is toxic to living organisms if not properly treated. *Hydrilla verticillata* is an invasive aquatic plant capable of rapid growth and heavy metal accumulation, making it a potential candidate for use in wastewater treatment through phytoremediation. This study aims to analyze the effect of the weight of *Hydrilla verticillata* on the reduction of Cu²⁺ concentration in metal-plating wastewater. The wastewater used in this study was effluent that had undergone preliminary treatment with the addition of lime and NaHCO₃. The experiments were carried out in a 5-liter laboratory reactor for 15 days, including a 5-day acclimatization period and a 7-day initial toxicity test (Range Finding Test). The weight variations of *Hydrilla verticillata* used were 75 g, 100 g, and 125 g. The results showed that *Hydrilla verticillata* was able to reduce Cu²⁺ concentration by up to 99.05% at a weight of 125 g within 15 days. This indicates that the weight of *Hydrilla verticillata* significantly influences the reduction of copper (Cu²⁺) in metal-plating industrial wastewater.

Keywords: *hydrilla verticillata*, phytoremediation, electroplating wastewater

Abstrak

Limbah cair industri pelapisan logam diketahui mengandung tembaga (Cu²⁺), yang bersifat toksik bagi makhluk hidup apabila diolah dengan baik. *Hydrilla verticillata* merupakan tumbuhan air invasif yang mampu tumbuh cepat serta mengakumulasi logam berat, sehingga berpotensi dimanfaatkan dalam pengolahan air limbah melalui fitoremediasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh berat *Hydrilla verticillata* terhadap penurunan konsentrasi Cu²⁺ pada air limbah pelapisan logam. Air limbah pelapisan logam yang digunakan merupakan air limbah setelah dilakukan pengolahan awal dengan penambahan kapur dan NaHCO₃. Percobaan dilakukan pada reaktor laboratorium berkapasitas 5 liter selama 15 hari dengan tahap aklimatisasi selama 5 hari dan uji toksisitas awal (Range Finding Test) selama 7 hari. Variasi berat pada *Hydrilla verticillata* yaitu 75g, 100g, dan 125g. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Hydrilla verticillata* mampu menurunkan konsentrasi Cu²⁺ hingga 99,05% pada berat 125g dalam 15 hari. Hal ini menunjukkan bahwa berat *Hydrilla verticillata* secara signifikan memengaruhi penurunan tembaga (Cu²⁺) dalam air limbah industri pelapisan logam.

Kata Kunci: *hydrilla verticillata*, fitoremediasi, limbah pelapisan logam

1. Pendahuluan

Penipisan sumber daya air bersih akibat pencemaran lingkungan merupakan masalah yang memprihatinkan di seluruh dunia. Salah satu penyebab yang mengancam kelestarian air adalah eutrofikasi. Eutrofikasi merupakan fenomena peningkatan produktivitas perairan karena tingginya konsentrasi bahan organik di dalam air yang menyebabkan pertumbuhan alga dan tumbuhan air menjadi tidak terkendali [1]. *Hydrilla verticillata* merupakan tumbuhan air invasif akibat dari eutrofikasi. Peneliti [2] menyebutkan bahwa *Hydrilla verticillata* merupakan jenis tumbuhan air yang tumbuh di perairan Danau Toba yang dapat mengganggu ekosistem dan mempengaruhi pertumbuhan ikan karena tumbuhan ini memiliki mekanisme reproduksi vegetatif yang memungkinkannya untuk menyebar dengan sangat cepat. *Hydrilla verticillata* memiliki tubuh yang seluruhnya terendam air [3].

Fitoremediasi adalah teknologi yang memanfaatkan tanaman untuk membersihkan lingkungan yang terkontaminasi, seperti tanah, air, dan udara [4]. Sedangkan tumbuhan yang mampu menyerap dan menimbun logam dalam jaringan tubuhnya dengan konsentrasi yang sangat tinggi [5]. Tumbuhan hiperakumulator dalam ekosistem terestrial melibatkan mekanisme kimia dan biologis kompleks yang memungkinkan polutan menumpuk dalam organisme dari waktu ke waktu [6]. *Hydrilla verticillata* dapat

tumbuh dengan cepat dan mengakumulasi sejumlah logam berat sehingga dapat dimanfaatkan pada pengolahan air limbah menggunakan tumbuhan.

Tembaga (Cu) termasuk logam berat yang dikategorikan sebagai unsur jejak (*trace element*) [7]. Logam ini sering dijumpai dalam air limbah dari berbagai sektor industri, seperti pelapisan logam, pembuatan keramik, kaca, serta proses elektroplating. Konsentrasi ion Cu^{2+} pada air limbah industri dapat bervariasi antara 2,5 mg/L hingga 10.000 mg/L [8]. Paparan tembaga dalam jumlah berlebih dapat menimbulkan berbagai gangguan kesehatan pada manusia, antara lain gangguan pada sistem saraf pusat (SSP), kerusakan ginjal, syok, koma, anemia, bahkan kematian [9].

Hydrilla verticillata dapat menurunkan 11% - 37% kandungan logam Cu^{2+} pada 10% larutan Hoagland dengan kandungan Cu^{2+} 0,01; 0,05; dan 0,05 berdasarkan penelitian oleh Shi dkk. [10]. Penyerapan kontaminan pada fitoremediasi dipengaruhi oleh spesies tumbuhan, zona akar, parameter fisika seperti pH; konsentrasi kontaminan; kandungan mineral, *chelating agent*, dan berat tumbuhan [11]. Berdasarkan uraian latar yang telah dijelaskan, tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana pengaruh berat *Hydrilla verticillata* terhadap penghilangan Cu^{2+} pada air limbah pelapisan logam yang telah ditambahkan dengan Natrium Bikarbonat ($NaHCO_3$).

2. Metode Penelitian

Alat dan Bahan

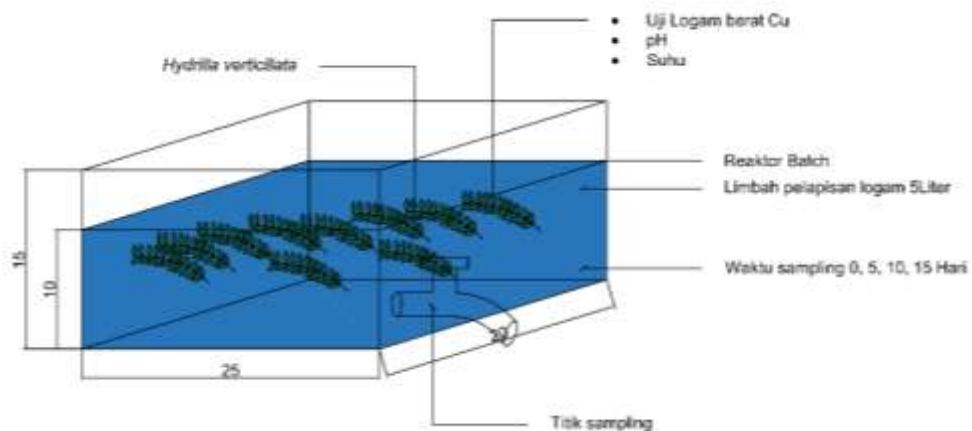
Peralatan yang digunakan pada penelitian ini meliputi reaktor berkapasitas 5L, Jerigen untuk pengambilan air limbah, pH meter, dan termometer. Bahan utama yang digunakan berasal dari air limbah pelapisan logam yang berasal dari kegiatan usaha pelapisan logam yang berada di Kota Surabaya, Provinsi Jawa Timur. Air limbah diambil setelah dilakukan pengolahan dari bak penampung pada usaha pelapisan logam tersebut. Pengolahan yang dilakukan pada kegiatan usaha pelapisan logam tersebut adalah dengan penambahan bubuk batu kapur pada air limbah yang dihasilkan. Kemudian pada air limbah tersebut ditambahkan $NaHCO_3$ sebesar 200 mg/L untuk membantu pengendapan dan menjadi sumber karbon bagi tanaman. Bahan lain yang dibutuhkan yaitu *Hydrilla verticillata*.

Penelitian Pendahuluan

Penelitian pendahuluan dilakukan dengan melakukan *Range Finding Test* (RFT) dan aklimatisasi. RFT dilakukan untuk mengetahui toleransi optimum *Hydrilla verticillata* mampu bertahan hidup saat melakukan pengolahan limbah pelapisan logam dilakukan dengan variasi pengenceran air limbah yang memiliki nilai interval serupa yaitu 20%, 40%, 60%, 80%, dan 100% selama 7 hari. Sedangkan aklimatisasi dilakukan agar *Hydrilla verticillata* dapat beradaptasi dan menyesuaikan diri dengan lingkungan barunya. Aklimatisasi dilakukan selama 5 hari dengan menggunakan air bersih.

Penelitian Utama

Penelitian utama dilakukan selama 15 hari. Penelitian utama dilakukan dengan cara pengoperasian reaktor secara *batch* dengan variasi berat *Hydrilla verticillata* sebesar 75g, 100g, dan 125g. Pengujian Cu^{2+} akan dilakukan pada hari ke-5, 10, dan 15. Reaktor yang digunakan pada penelitian ini berjumlah 4 buah yaitu 3 buah reaktor dengan variasi berat *Hydrilla verticillata* dengan kode H75, H100, dan H125 yang merepresentasikan variasi berat dari *Hydrilla verticillata* dan 1 buah reaktor kontrol. Reaktor kontrol merupakan reaktor tanpa *Hydrilla verticillata*. Kapasitas reaktor sebesar 5L dengan ukuran 25x20x15 cm. Desain reaktor terlihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Desain Reaktor

3. Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Awal Air Limbah

Uji karakteristik air limbah pelapisan logam digunakan untuk mengetahui kandungan awal pada air limbah sesuai dengan parameter air limbah yang akan digunakan dalam penelitian. Baku mutu yang digunakan merujuk pada Lampiran II Peraturan Gubernur Jawa Timur no. 52 tahun 2014 dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Karakteristik Awal Air Limbah Pelapisan Logam

Parameter	Satuan	Hasil Analisis	Baku Mutu
Cu^{2+}	mg/L	70,6	0,6
pH	-	5,8	6,0 – 9,0
Suhu	°C	28	-

Berdasarkan hasil analisis laboratorium dapat diketahui bahwa parameter Cu^{2+} , pH, dan suhu air limbah pelapisan logam yang terlihat pada **Tabel 1** telah melebihi baku mutu pada Lampiran II Peraturan Gubernur Jawa Timur no. 52 tahun 2014.

Penurunan Cu^{2+} pada Air Limbah Pelapisan Logam

Range Finding Test (RFT) dilakukan selama 7 hari dan diketahui bahwa *Hydrilla verticillata* dapat bertahan pada konsentrasi 100%. Pada proses pengolahan limbah secara biologis khususnya menggunakan tumbuhan, diperlukan penyesuaian tumbuhan dari tempat asal ke tempat yang baru. Sehingga, tumbuhan dapat menyesuaikan dengan lingkungan baru dan hidup dalam kondisi yang ekstrim atau tercemar [12]. Berdasarkan hasil proses aklimatisasi diketahui *Hydrilla verticillata* dapat menyesuaikan diri pada lingkungannya dengan baik. *Hydrilla verticillata* yang telah diaklimatisasi selama 5 hari akan digunakan pada penelitian utama. Hasil uji konsentrasi logam berat Cu^{2+} dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Nilai Kadar Cu^{2+} Pada Air Limbah Menggunakan *Hydrilla verticillata* Setelah Proses Fitoremediasi

Reaktor	Cu^{2+}	Cu^{2+}	Cu^{2+}	Cu^{2+}
	Hari ke-0	Hari ke-5	Hari ke-10	Hari ke-15
	70,6	44,45	38,5	34,44
H75	70,6	34,2	19,8	7,26
H100	70,6	30,3	7,59	3,41
H125	70,6	20,9	1,37	0,67

Penurunan kadar Cu^{2+} pada reaktor kontrol menunjukkan bahwa meskipun tanpa adanya tumbuhan, terjadi perubahan konsentrasi logam akibat proses kimiawi dalam media. Konsentrasi awal Cu^{2+} sebesar 70,6 mg/L menurun menjadi 44,45 mg/L pada hari ke-5, 38,5 mg/L pada hari ke-10, dan mencapai 34,44 mg/L pada hari ke-15. Penurunan ini terutama disebabkan oleh penambahan kapur dan bikarbonat (NaHCO_3) yang meningkatkan pH dan memicu terbentuknya senyawa karbonat dan hidroksida seperti CuCO_3 dan $\text{Cu}(\text{OH})_2$ yang tidak larut. Dengan demikian, penurunan kadar logam pada reaktor kontrol lebih banyak terjadi karena mekanisme presipitasi kimia dan pembentukan kompleks, bukan melalui proses biologis.

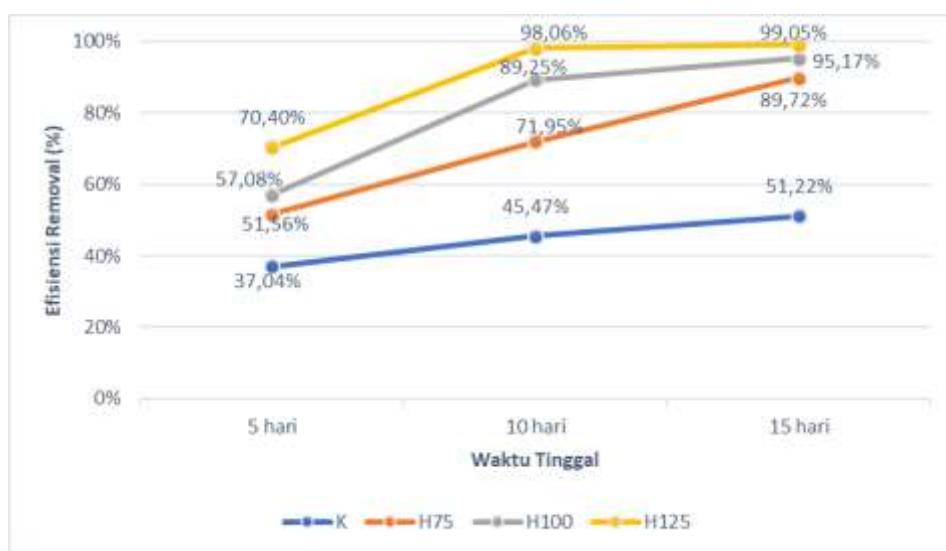
Sementara itu, pada reaktor dengan *Hydrilla verticillata*, penurunan kadar Cu^{2+} berlangsung jauh lebih signifikan seiring bertambahnya berat tumbuhan. Pada reaktor H75 yang berisi 75 g tumbuhan, kadar Cu^{2+} turun dari 70,6 mg/L pada hari ke-0 menjadi 34,2 mg/L pada hari ke-5, 19,8 mg/L pada hari ke-10, dan mencapai 7,26 mg/L pada hari ke-15. Pada reaktor H100 dengan berat tumbuhan 100 g, di mana konsentrasi Cu^{2+} menurun dari 70,6 mg/L pada awalnya menjadi 30,3 mg/L pada hari ke-5, 7,59 mg/L pada hari ke-10, dan 3,41 mg/L pada hari ke-15. Penurunan paling signifikan terlihat pada reaktor H125 dengan berat tumbuhan 125 g, di mana kadar Cu^{2+} menurun drastis dari 70,6 mg/L pada hari ke-0 menjadi 20,9 mg/L pada hari ke-5, 1,37 mg/L pada hari ke-10, dan mencapai titik terendah 0,67 mg/L pada hari ke-15. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin besar biomassa *Hydrilla verticillata* yang digunakan, semakin efektif kemampuan tumbuhan tersebut dalam menyerap, mengakumulasi, dan menstabilkan ion Cu^{2+} dari media limbah pelapisan logam melalui mekanisme fitoremediasi.

Proses penurunan kadar Cu^{2+} dipengaruhi oleh mekanisme fitoremediasi, terutama melalui fitoakumulasi dan fitostabilisasi. *Hydrilla verticillata* dapat menyerap ion logam berat secara langsung melalui permukaan batang dan daun yang selalu kontak dengan air. Ion Cu^{2+} kemudian diikat oleh gugus fungsional pada dinding sel, seperti karboksil, hidroksil, dan amino, sehingga konsentrasinya dalam air menurun [13].

Selain itu, faktor kimia turut berperan dalam mendukung penurunan kadar Cu^{2+} . Media limbah telah melalui pengolahan awal berupa penambahan kapur ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dan Natrium Bikarbonat (NaHCO_3). Penambahan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ meningkatkan pH air sehingga sebagian ion Cu^{2+} terpresipitasi sebagai $\text{Cu}(\text{OH})_2$. Sementara itu, NaHCO_3 berfungsi sebagai buffer yang menjaga kestabilan pH serta mendukung pembentukan senyawa kompleks CuCO_3 yang relatif sukar larut. Kombinasi antara kondisi kimiawi dan proses biologis menyebabkan penurunan kadar Cu^{2+} berlangsung cukup cepat, terutama pada fase awal. Hal tersebut terlihat pada hari ke-5 reaktor kontrol yang mengalami penurunan dari 70,6 mg/L ke 44,45 mg/L kemudian pada reaktor H75, H100, dan H125 secara berurutan sebesar 34,2 mg/L; 30,3 mg/L; dan 20,9 mg/L. Penurunan reaktor H125 pada hari ke-5 yang merupakan penurunan dengan nilai paling rendah memiliki nilai 43,98% dari nilai reaktor kontrol.

Penurunan pada fase awal sebagian besar disebabkan oleh proses pengendapan Cu^{2+} yang terjadi akibat peningkatan pH karena penambahan kapur ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dan bikarbonat (NaHCO_3), kemudian dibantu dengan tanaman yang mempercepat proses ini. Namun, pada hari ke-10 dan ke-15, meskipun pengendapan telah terjadi pada fase awal, reaktor dengan *Hydrilla verticillata* masih menunjukkan penurunan kadar Cu^{2+} yang signifikan, sementara pada reaktor kontrol tidak terjadi penurunan lebih lanjut. Hal ini menunjukkan bahwa penurunan lebih lanjut pada reaktor dengan *Hydrilla verticillata* lebih dipengaruhi oleh proses fitoremediasi, dimana tanaman tersebut mampu menyerap Cu^{2+} secara biologis, berbeda dengan reaktor kontrol yang hanya mengandalkan proses kimiawi.

Penurunan kadar Cu^{2+} yang berkelanjutan hingga hari ke-15 menegaskan kemampuan adaptasi *Hydrilla verticillata* dalam mengakumulasi logam berat. Meskipun tumbuhan masih mampu menurunkan kadar Cu^{2+} hingga hari ke-15, efektivitas penurunan terlihat semakin berkurang seiring waktu. Penurunan terbesar terjadi pada fase awal dari 70,6 mg/L ke 20,9 mg/L, sedangkan pada fase akhir dari 1,37 ke 0,67 mg/L yang menunjukkan laju penurunan lebih lambat. Hal ini diduga disebabkan oleh kejemuhan kapasitas serapan logam pada jaringan tumbuhan, di mana sebagian besar situs pengikatan ion Cu^{2+} telah terisi. Selain itu, akumulasi logam berat yang tinggi di jaringan tumbuhan dapat memicu stres oksidatif akibat pembentukan *Reactive Oxygen Species* (ROS), yang merusak kloroplas dan membran sel, sehingga berisiko menyebabkan stres oksidatif dan nekrosis jaringan [14]. Kondisi ini dapat menimbulkan gejala fisiologis seperti nekrosis, perubahan warna daun menjadi gelap, serta penurunan laju fotosintesis [15]. Meskipun demikian, dalam penelitian ini, efektivitas *Hydrilla verticillata* cukup jelas terlihat dari penurunan kadar Cu^{2+} pada air limbah khususnya pada *Hydrilla verticillata* dengan berat 125g.



Gambar 2. Efisiensi Removal Cu^{2+} Berdasarkan Perlakuan Kontrol dan Berat *Hydrilla verticillata* pada Waktu Tanggal 5, 10, dan 15 Hari

Efektivitas tinggi pada perlakuan ini dapat dijelaskan oleh kapasitas serapan tumbuhan yang meningkat seiring dengan bertambahnya berat tumbuhan. Berat *Hydrilla verticillata* 125g menyediakan luas permukaan daun dan batang yang lebih besar, sehingga memungkinkan lebih banyak ion Cu²⁺ terikat pada gugus fungsional. Dengan demikian, meskipun berat 125g memberikan efektivitas penurunan terbaik, kapasitas toleransi tumbuhan terhadap logam berat tetap menjadi faktor pembatas dalam jangka panjang. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa *Hydrilla verticillata* dengan berat 125g mampu menurunkan kadar Cu dari 70,6 mg/L menjadi hanya 0,67 mg/L dalam 15 hari, sehingga dapat dikategorikan sebagai perlakuan dengan efektivitas tertinggi. Hasil ini menegaskan bahwa semakin besar berat tumbuhan, semakin besar pula kemampuan fitoremediasi dalam mengurangi kandungan logam berat pada limbah cair pelapisan logam.

Selama penelitian, suhu media berada pada kisaran 26,8–30,7 °C, sedangkan pH berada pada rentang 6,4–7,4. Kedua parameter ini masih termasuk dalam kondisi normal bagi pertumbuhan *Hydrilla verticillata*, meskipun suhu optimal dilaporkan berkisar antara 18 – 28 °C [16], sehingga suhu yang sedikit lebih tinggi dari kisaran optimal masih dapat ditoleransi. Rentang pH optimum *Hydrilla verticillata* sebesar pH 6 – 7,2 menunjukkan bahwa pH yang diperoleh juga merupakan kondisi yang umum dan sesuai bagi proses fisiologis tumbuhan air, termasuk aktivitas fotosintesis dan penyerapan ion [13]. Dengan demikian, meskipun terjadi fluktuasi, kondisi suhu dan pH selama fitoremediasi tetap mendukung kelangsungan hidup dan aktivitas remediasi oleh *Hydrilla verticillata* [11].

Pada **Gambar 2** memperlihatkan perkembangan efisiensi removal kadar Cu pada berbagai reaktor selama 15 hari. Secara umum, semua reaktor menunjukkan tren peningkatan efisiensi seiring bertambahnya waktu, namun dengan capaian yang berbeda. Reaktor kontrol (K) hanya mengalami kenaikan kecil, dari 37,04% pada hari ke-5 menjadi 51,22% pada hari ke-15. Hal ini menunjukkan bahwa tanpa adanya tumbuhan, penurunan kadar tembaga relatif terbatas dan sebagian besar dipengaruhi oleh faktor fisik seperti pengendapan akibat penambahan natrium bikarbonat (NaHCO₃).

Sebaliknya, reaktor yang terdapat *Hydrilla verticillata* menunjukkan kinerja yang jauh lebih baik. Reaktor H75 meningkat dari 51,56% pada hari ke-5 menjadi 89,72% pada hari ke-15, sementara H100 naik dari 57,08% menjadi 95,17% pada periode yang sama. Efisiensi tertinggi ditunjukkan oleh reaktor H125, yang mencapai 70,40% pada hari ke-5, kemudian melonjak menjadi 98,06% pada hari ke-10, dan hampir sempurna dengan 99,05% pada hari ke-15. Efisiensi removal yang tinggi ini dipengaruhi oleh kombinasi proses kimiawi dari pengendapan CuCO₃ dan biologis dari proses fitoremediasi.

Hasil ini membuktikan bahwa semakin tinggi berat tumbuhan yang digunakan dalam sistem fitoremediasi, semakin tinggi pula kemampuan dalam menurunkan kadar tembaga. Selain itu, waktu tinggal yang lebih lama juga berkontribusi besar dalam meningkatkan efektivitas proses. Dengan demikian, kombinasi antara berat tumbuhan yang optimal dan durasi perlakuan yang cukup panjang menjadi faktor kunci dalam mencapai efisiensi fitoremediasi yang maksimal.

Perbedaan efektivitas antar perlakuan dapat dijelaskan melalui mekanisme fitoakumulasi. Fitoakumulasi merupakan proses penyerapan, translokasi, dan penimbunan polutan (terutama logam berat) dari lingkungan ke jaringan tanaman seperti akar, batang, dan daun [17]. Selain itu, berat yang lebih besar juga meningkatkan laju fotosintesis, yang menyebabkan penyerapan CO₂ lebih tinggi dan pH media meningkat. Kondisi pH yang lebih basa mendukung terbentuknya presipitat Cu(OH)₂ atau kompleks CuCO₃ yang sulit larut, sehingga semakin mempercepat penurunan kadar Cu²⁺ [18].

4. Kesimpulan

Berat *Hydrilla verticillata* berpengaruh terhadap kemampuan penyerapan logam Cu²⁺ pada air limbah industri pelapisan logam berdasarkan penurunan Cu²⁺ air limbah pelapisan logam setelah fitoremediasi. Semakin besar berat tumbuhan, semakin tinggi kemampuan menyerap logam Cu²⁺ dari air limbah industri pelapisan logam, karena luas permukaan kontak dan jumlah jaringan penyerap juga meningkat. *Hydrilla verticillata* menunjukkan penurunan kadar Cu²⁺ air limbah pelapisan logam yang lebih besar pada berat 125 gr.

5. Referensi

- [1] E. de Raúl Maúre, G. Terauchi, J. Ishizaka, N. Clinton, and M. DeWitt, “Globally consistent assessment of coastal eutrophication,” *Nat. Commun.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–9, 2021, doi: 10.1038/s41467-021-26391-9.
- [2] M. Ginting, N. R. Marbun, M. Sinaga, K. Fitri, and L. Leny, “Formulasi dan Evaluasi Sediaan Gummy Candies dari Sari Ganggang *Hydrilla* (*Hydrilla verticillata* L.) yang Tumbuh di Perairan

- Danau Toba," *Maj. Farmasetika*, vol. 8, no. 1, p. 13, 2023, doi: 10.24198/mfarmasetika.v8i1.36649.
- [3] L. Meling, Sucahyo, and D. C. Cahyaningrum, "Pengaruh Revitalisasi Danau terhadap Sebaran *Hydrilla verticillata* di Danau Rawa Pening," *Din. Lingkung. Indones.*, vol. 11, no. April 2016, pp. 91–97, 2024, doi: 10.31258/dli.11.2.p.91-97.
- [4] M. L. Bartucca, M. Cerri, and C. Forni, "Phytoremediation of Pollutants: Applicability and Future Perspective," *Plants*, vol. 12, no. 13, pp. 10–13, 2023, doi: 10.3390/plants12132462.
- [5] I. Irhamni, S. Pandia, E. Purba, and W. Hasan, "Kajian Akumulator Beberapa Tumbuhan Air dalam Menyerap Logam Berat Secara Fitoremediasi," *J. Serambi Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 75–84, 2017, doi: 10.5281/ZENODO.400012.
- [6] L. Skuza, I. Szućko-Kociuba, E. Filip, and I. Božek, "Natural Molecular Mechanisms of Plant Hyperaccumulation and Hypertolerance towards Heavy Metals," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 23, no. 16, 2022, doi: 10.3390/ijms23169335.
- [7] H. Qadri, U. Baba, O. Javaid, G. Hamid Dar, and R. Bhat, "Ceratophyllum demersum-An accretion biotool for heavy metal remediation," *Sci. Total Environ.*, vol. 806, p. 150548, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150548.
- [8] Y. Liu, H. Wang, Y. Cui, and N. Chen, "Removal of Copper Ions from Wastewater: A Review," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 20, no. 5, 2023, doi: 10.3390/ijerph20053885.
- [9] V. T. Siringoringo, D. Pringgenies, and A. Ambariyanto, "Kajian Kandungan Logam Berat Merkuri (Hg), Tembaga (Cu), dan Timbal (Pb) pada Perna viridis di Kota Semarang," *J. Mar. Res.*, vol. 11, no. 3, pp. 539–546, 2022, doi: 10.14710/jmr.v11i3.33864.
- [10] D. Shi, K. Zhuang, Y. Chen, Z. Hu, and Z. Shen, "Phytotoxicity and accumulation of Cu in mature and young leaves of submerged macrophyte *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 208, p. 111684, 2021, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111684.
- [11] B. Dhir, *Phytoremediation: Role of aquatic plants in environmental clean-up*. 2013. doi: 10.1007/978-81-322-1307-9.
- [12] M. Sanjana, R. Prajna, U. S. Katti, and R. V. Kavitha, "Bioremediation - the recent drift towards a sustainable environment," *Environ. Sci. Adv.*, vol. 3, no. 8, pp. 1097–1110, 2024, doi: 10.1039/d3va00358b.
- [13] S. Joshi *et al.*, "Rhizospheric bacteria: the key to sustainable heavy metal detoxification strategies," *Front. Microbiol.*, vol. 14, no. July, pp. 1–19, 2023, doi: 10.3389/fmicb.2023.1229828.
- [14] S. Jorjani and F. P. Karakaş, "Physiological and Biochemical Responses to Heavy Metals Stress in Plants," *Int. J. Second. Metab.*, vol. 11, no. 1, pp. 169–190, 2024, doi: 10.21448/ijsm.1323494.
- [15] H. I. Mohamed *et al.*, *Heavy metals toxicity in plants: understanding mechanisms and developing coping strategies for remediation: a review*, vol. 12, no. 1. Springer Nature Singapore, 2025. doi: 10.1186/s40643-025-00930-4.
- [16] M. . Falah, "Pengaruh Trichoderma sp terhadap pertumbuhan Tumbuhan akuatik *Hydrilla verticillata* dan *Bacopa monnieri*," Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim, 2021.
- [17] G. A. B. Sukono, F. R. Hikmawan, E. Evitasari, and D. Satriawan, "Mekanisme Fitoremediasi: Review," *J. Pengendali. Pencemaran Lingkung.*, vol. 2, no. 2, pp. 40–47, 2020, doi: 10.35970/jppl.v2i2.360.
- [18] S. Toan *et al.*, "Thermodynamics of NaHCO_3 decomposition during Na_2CO_3 -based CO_2 capture," *J. Environ. Sci. (China)*, vol. 78, no. July, pp. 74–80, 2019, doi: 10.1016/j.jes.2018.07.005.