

Kajian Fitostabilisasi Limbah Hasil Tambang Tembaga (Tailing)

Lastri Septito Napitupulu dan Ipung Fitri Purwanti
Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: purwanti@enviro.its.ac.id

Abstrak—Limbah pertambangan adalah hasil buangan dari limbah industri pertambangan yang disebut sebagai tailing. Tailing berasal dari batuan berharga yang diproses menjadi partikel yang halus dan kemudian dipisahkan antara mineral yang berharga dan sisanya. Pada umumnya tailing sangat miskin bahan organik, tidak mengandung unsur hara, porositas tinggi dan tidak ada aktivitas mikroorganisme. Jumlah tailing yang terlalu tinggi dalam tanah dapat mengganggu perkembangan tumbuhan karena bersifat racun. Teknologi untuk memperbaiki lingkungan yang mengandung tailing tembaga telah banyak diaplikasikan, salah satunya yaitu fitostabilisasi. Teknologi ini meliputi penyerapan, presipitasi, dan pengurangan logam dengan cara imobilisasi logam dalam tanah dan air. Fitostabilisasi merupakan teknologi hijau ramah lingkungan, efektif dari aspek biaya, aman, dan efisien dalam memperbaiki lingkungan akibat limbah tailing. Kajian ini bertujuan mengkaji berbagai literatur tentang upaya memperbaiki lingkungan tercemar limbah tailing tembaga. Metode kajian berupa penelaahan dari berbagai sumber literatur. Merangkum berbagai penelitian yang telah dilakukan untuk memahami kemampuan tumbuhan dan perencanaan *floating treatment wetland*. Fitostabilisasi menggunakan tumbuhan akuatik yang memiliki kemampuan tinggi dalam meremediasi limbah tailing tembaga, tumbuhan lokal, dan dapat menghasilkan biomassa yang tinggi. Tumbuhan fitostabilisator yang digunakan yaitu *Limnocharis flava*, *Vetiver zizanioides*, dan *Eichhornia crassipes* dengan kemampuan penyisihan tailing tembaga masing-masing 95,56%, 95,83%, 76,9%. Tumbuhan ditanam pada *floating treatment wetland* (FTW) yaitu penggunaan tumbuhan akuatik yang ditanam dalam suatu media yang mengapung sehingga akar dapat menggantung bebas di dalam air. Jika kandungan tembaga dalam setiap hektar adalah 10.000 m³, maka diperlukan jumlah FTW berukuran 4,5 m × 1 m sebanyak 2.223 FTW dan kebutuhan tumbuhan sebanyak 100.035 tumbuhan.

Kata Kunci—Fitostabilisasi, Floating Treatment Wetlands, *Limnocharis flava*, Tailing Tembaga, *Vetiver zizanioides*.

I. PENDAHULUAN

INDONESIA merupakan salah satu negara yang kaya akan sumber daya alam salah satunya yaitu kandungan mineral yang melimpah. Industri pertambangan di Indonesia semakin meningkat jumlahnya dan berkembang pesat. Pertambangan menjadi salah satu faktor pendukung dalam meningkatkan perekonomian masyarakat Indonesia. Namun, di lain sisi pertambangan memberikan dampak negatif terhadap lingkungan. Pencemaran lingkungan merupakan salah satu permasalahan yang tidak pernah lepas dari dunia tambang [1].

Tailing adalah limbah pertambangan yang merupakan hasil dari sisa penambangan mineral berharga dari industri tambang. Salah satu perusahaan tambang tembaga di Papua menghasilkan limbah tembaga dalam kuantitas yang besar [2]. Perusahaan tersebut dapat menghasilkan tailing sebesar

300.000 ton/hari dan dialirkan melalui sungai menuju tempat penyimpanan tailing. Logam berat berbeda dengan senyawa organik karena tidak dapat terdegradasi. Tembaga dapat memasuki tatanan lingkungan dengan proses alamiah atau aktivitas manusia melalui industri pertambangan [3].

Fitostabilisasi adalah penggunaan tumbuhan untuk mengimobilisasi dan menstabilisasi kontaminan. Teknik ini memanfaatkan tumbuhan sebagai remediator yang mengakumulasi logam berat pada akar dan mengubah polutan menjadi senyawa yang non-toksik. Fitostabilisasi memiliki kelebihan dalam meremediasi lahan tercemar karena aman untuk digunakan, biaya operasi murah, tidak menghasilkan limbah sekunder dan dapat meningkatkan keanekaragaman hayati. Pemilihan tumbuhan yang digunakan harus mampu menyerap logam berat tembaga dan tidak mengakibatkan kematian pada tumbuhan. Syarat pemilihan tumbuhan yang akan digunakan yaitu harus mampu memproduksi biomassa yang tinggi, toleran terhadap polutan dan kondisi lingkungan ekstrim serta dapat tumbuh cepat [4].

Beberapa tumbuhan yang merupakan fitostabilisator tembaga yaitu tumbuhan *Mucuna atterima* yang memiliki efisiensi penurunan tembaga sebesar 80% pada konsentrasi 400 mg/kg dengan waktu penurunan 90 hari [5]. Tumbuhan *Limnocharis flava* dapat menjadi tumbuhan fitostabilisator dengan persen penyisihan sebesar 95,83% [6]. Tumbuhan *Vetiver zizanioides* dapat menyisihkan logam tembaga sebesar 95,56% dengan konsentrasi tembaga 1084 mg/kg. Pada lokasi tambang La Africana, vetiver dapat tumbuh pada tailing tembaga dengan kadar 3921 mg/kg dan di tambang Anglo American konsentrasi 2.600 mg/kg [7].

II. METODE KAJIAN

Kajian ini dilakukan dengan mengumpulkan berbagai literatur yang kemudian dianalisis. Sumber literatur yang digunakan yaitu dari jurnal internasional, jurnal indonesia, *website*, dan *text book* yang berhubungan dengan fitostabilisasi. Tabulasi pustaka dilakukan dengan mengumpulkan data sekunder sebagai referensi agar dapat memberikan rekomendasi solusi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Tailing Tembaga

Tembaga (Cu) adalah logam esensial dengan nomor atom 29 dengan massa atom standar 65,346 yang merupakan logam transisi (golongan IB). Logam Cu melebur pada 1038°C dan memiliki titik didih pada suhu 2562°C. Secara biologis tembaga tersedia dalam bentuk Cu²⁺ dan Cu⁺ dalam garam anorganik dan kompleks anorganik. Logam Cu dapat memasuki strata perairan, tanah, dan udara melalui proses

aktivitas manusia dan secara alamiah. Tembaga adalah salah satu unsur mikronutrien yang dibutuhkan oleh tumbuhan untuk fungsi fisiologis dan biokimia [8]. Unsur mikro Cu dapat dengan mudah mengendap dan berinteraksi dengan bahan organik atau anorganik dengan daya larut bervariasi terhadap pH [9]. Logam berat akan mengendap lama dan terakumulasi di dalam sedimen [10].

Beberapa kegiatan penambangan tembaga menghasilkan tailing tembaga dalam jumlah besar. Ukuran tailing tembaga yang dihasilkan dibedakan menjadi 4 kategori sebagai berikut [10], yakni pertama tailing ukuran kasar >175 μm , diendapkan di bagian hulu pengendapan tailing. Kedua tailing ukuran sedang 150 – 175 μm diendapkan di bagian tengah pengendapan tailing. Ketiga tailing ukuran halus 38 – 75 μm diendapkan di bagian hilir pengendapan tailing. Keempat tailing ukuran sangat halus <38 μm diendapkan di muara pengendapan tailing dan zona pesisir.

B. Dampak Lingkungan Akibat Tailing Tembaga

Tailing tembaga merupakan limbah yang tidak dapat terurai dan dapat terakumulasi di lingkungan dalam jangka waktu yang lebih lama dibandingkan dengan bahan organik. Akumulasi tailing dapat menyebabkan berbagai masalah lingkungan seperti merusak perkembangan tumbuhan, klorosis dan defoliasi, menghambat pemanjangan akar, merusak membran sel akar [11][11], mencemari tanah oleh genangan air tailing [12], kerusakan fasilitas penyimpanan merusak ekosistem, menghilangkan kesuburan tanah [12].

Jumlah tembaga yang berlebihan pada air dan tanah dapat mengakibatkan efek toksik bagi makhluk hidup [13]. Tata kelola tailing tembaga yang buruk dapat berpengaruh terhadap pertumbuhan ekonomi, pelestarian lingkungan, dan bahaya kesehatan.

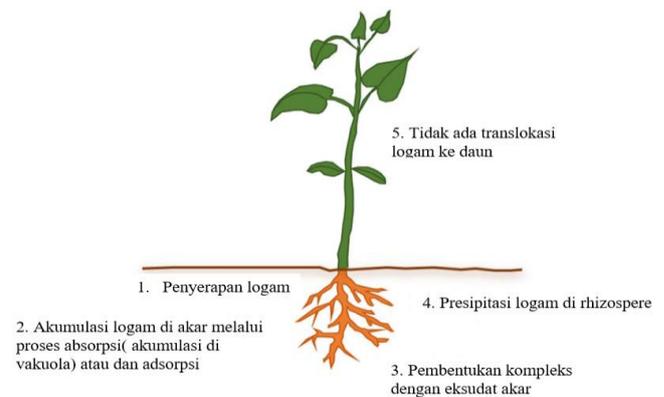
C. Proses Penyerapan Tailing Tembaga

Tailing tembaga diserap oleh akar dalam bentuk ion yang larut dalam air seperti unsur hara yang ikut masuk bersama dalam air. Air yang mengandung tailing tembaga membuat protein regulator dalam tumbuhan sehingga membentuk senyawa pengikat yang disebut fitokelatin. Fitokelatin ketika bertemu dengan logam seperti Cu membentuk senyawa kompleks Cu-fitokelatin. Fitokelatin yang bertemu dengan logam Cu akan membentuk ikatan sulfida dan membentuk senyawa kompleks sehingga Cu dapat diserap oleh jaringan tumbuhan [6].

D. Mekanisme Fitostabilisasi

Fitostabilisasi adalah cabang dari fitoremediasi yang menggunakan tumbuhan untuk mengimobilisasi kontaminan di tanah dan mengurangi ketersediaannya di lingkungan. Fitostabilisasi dapat mengurangi bioavailabilitas dan menstabilkan kontaminan di akar [14]. Mekanisme fitostabilisasi dijelaskan pada Gambar 1.

Fitostabilisasi diawali dengan penyerapan ion Cu oleh bulu-bulu akar yang kemudian terakumulasi di akar melalui proses absorpsi dan adsorpsi. Penyerapan logam melibatkan sejumlah eksudat yang diproduksi akar untuk membentuk kompleks. Kontaminan dapat terakumulasi dan terdegradasi di jaringan tumbuhan akibat aktivitas enzimatis tumbuhan. Interaksi kontaminan terjadi antara mikroflora di rizosfer dengan akar [15].



Gambar 1. Mekanisme fitostabilisasi.

E. Faktor Fitostabilisasi

Logam berat berdampak negatif terhadap pertumbuhan tumbuhan, tutupan tanah dan mikroflora di dalam tanah. Logam berat dapat menggantikan unsur logam penting dalam pigmen atau mengganggu fungsi enzim yang menyebabkan tanah menjadi tidak sesuai untuk pertumbuhan tumbuhan [16]. Cuaca, kondisi tanah, dan kandungan tailing dapat menjadi faktor yang berpengaruh terhadap fitostabilisasi. Beberapa faktor yang mempengaruhi akumulasi logam oleh tumbuhan sebagai berikut [17] yang pertama sifat alamiah tumbuhan: seperti spesies, kecepatan tumbuh, ukuran dan kedalaman akar, kecepatan penguapan, serta kebutuhan nutrisi untuk metabolisme. Kedua faktor tanah: pH, kandungan dan sifat alamiah zat organik, status nutrisi, jumlah ion logam dan anion tertentu seperti kandungan fosfat, sulfat, kadar mineral lempung, dan tipe tanah. Ketiga variabel lingkungan dan pengelolaan: temperatur, kelembapan, sinar matahari, curah hujan, dan pemupukan. Keempat transpirasi: Proses kehilangan air dalam bentuk uap dari jaringan tumbuhan melalui stomata, kutikula, dan lentisel. Transpirasi menjadi kunci utama dalam melakukan fitoremediasi pada tanah atau polutan air tanah karena tumbuhan harus mengeluarkan cukup air dari tanah atau air tanah untuk mengontrol atau mengambil kontaminan secara efisien. Proses transpirasi dipengaruhi oleh faktor internal dan eksternal. Faktor internal dipengaruhi oleh ukuran daun, ketebalan daun, jumlah stomata, dan trikoma. Faktor eksternal meliputi intensitas cahaya, suhu kelembapan [18]. Kemampuan transpirasi tumbuhan sangat berpengaruh terhadap penyerapan logam berat. Ketika transpirasi tinggi maka tumbuhan dapat mengakumulasi lebih banyak logam berat. Logam berat di dalam tanah dapat diangkut dan didistribusikan ke berbagai tumbuhan bersama dengan penyerapan dan transportasi air [19].

F. Pemilihan Tumbuhan

Tumbuhan yang digunakan pada lokasi tailing tembaga adalah *Eichhornia crassipes*, *Vetiver zizanoides*, dan *Limnocharis flava*. Pemilihan tumbuhan disesuaikan dengan karakteristik dan kemampuan yang dimiliki oleh tumbuhan tersebut.

1. *Eichhornia crassipes*

Eichhornia crassipes adalah salah satu tumbuhan emergent yang tumbuh dengan cara mengapung pada air, ditunjukkan pada Gambar 2. *Eichhornia crassipes* (eceng

Gambar 2. Tumbuhan *eichhornia crassipes*.Gambar 3. Tumbuhan *vetiveria zizanioides*.

gondok) memiliki fungsi sebagai penghasil energi pada ekosistem serta membantu pemulihan (remediasi) kualitas perairan yang tercemar. Eceng gondok memiliki akar serabut, tidak memiliki batang sejati, daun berwarna hijau dan berbentuk oval serta dapat tumbuh hingga 0,4 - 0,8 meter. Kemampuan menyerap kontaminan dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu luas permukaan tubuh tumbuhan dan ukuran tumbuhan. Tumbuhan dengan ukuran yang lebih kecil memiliki kemampuan yang kurang baik dalam mengolah kontaminan [20]. Pemilihan eceng gondok sebagai fitostabilisator karena merupakan tumbuhan lokal yang dapat tumbuh di tailing tembaga [21], merupakan tumbuhan bioindikator pencemar air [21], dan memiliki akar yang bercabang-cabang halus yang mengandung zat khelat untuk menyerap logam berat [20]. Tumbuhan eceng gondok memiliki kemampuan penyisihan tembaga sebesar 68,73% [21].

2. *Vetiver zizanioides*

Vetiver adalah tumbuhan perenial yang memiliki sistem perakaran yang rimbun dan menembus masuk jauh ke dalam tanah menembus hingga kedalaman 2-5 meter. Tumbuhan *Vetiver zizanioides* ditunjukkan pada Gambar 3 [22]. Tumbuhan ini memiliki karakteristik batang tegak dan kaku sehingga sangat kuat dalam menahan aliran air yang cukup deras [23]. *Vetiver* memiliki penyisihan kadar tembaga 95,56 % [24]. Tumbuhan ini dapat bertahan pada kondisi tanah dan iklim ekstrim serta tanah pegunungan yang mengalami erosi serta cocok dalam menahan aliran air (*scouring of water flow*) [25]. Pemilihan tumbuhan sebagai fitostabilisator karena *Vetiveria zizanioides* merupakan salah satu tumbuhan lokal yang cepat beradaptasi di lingkungan

Gambar 1. Tumbuhan *limnocharis flava*.

pencemar logam berat [23], menghasilkan biomassa yang tinggi [23], tumbuh lebih baik di aliran sungai [25], akar tumbuhan *Vetiveria zizanioides* dapat bertahan pada tanah yang terkontaminasi tembaga yaitu pada konsentrasi 1762 mg/kg [26].

3. *Limnocharis flava*

Limnocharis flava (Genjer) merupakan tumbuhan akuatik yang dapat tumbuh di daerah tercemar [27]. Tumbuhan *Limnocharis flava* ditunjukkan pada Gambar 4. Genjer memiliki daun yang besar dan menghasilkan biomassa yang tinggi sehingga menunjukkan tingkat transpirasi yang tinggi. Pemilihan eceng gondok sebagai fitostabilisator karena merupakan tumbuhan lokal dengan kemampuan penyisihan tembaga 95,83% [6] dan menghasilkan biomassa yang tinggi [28]. Tumbuhan Genjer menyerap logam yang larut dalam air melalui akarnya dalam bentuk ion. Logam Cu akan diserap oleh akar tumbuhan dalam bentuk Cu^{2+} [29]. Tumbuhan genjer tidak sensitif terhadap ketinggian air tetapi sensitif terhadap ketersediaan air [30].

G. Perhitungan Kebutuhan Tumbuhan

Tumbuhan yang digunakan untuk fitostabilisasi merupakan tumbuhan lokal yang lebih mudah beradaptasi dengan lingkungan. Perhitungan kebutuhan tumbuhan sebagai berikut yang pertama tumbuhan *Limnocharis flava* mempunyai berat kering 28,78 gram [31], kemampuan penyisihan tembaga 17,71 mg/g [32], kandungan tembaga 0,195 % dan *specific gravity* tailing 2,74 [33]. Setiap satu hektar lahan tercemar limbah tailing akan membutuhkan sebanyak 104.827.644 tumbuhan. Kedua tumbuhan *Vetiveria zizanioides* mempunyai berat kering 208,25 gram [34], kemampuan penyisihan tembaga 52,61 mg/L [24], kandungan tembaga 0,195 % dan *specific gravity* tailing 2,74 [33]. Pada setiap satu hektar lahan tercemar limbah tailing akan membutuhkan sebanyak 4.876.765.380 tumbuhan. Ketiga tumbuhan *Eichhornia crassipes* mempunyai berat kering 4,4 gram [35] dan kemampuan penyisihan tembaga 49,83 mg/L [36]. Jika dalam satu hektar lahan tercemar limbah tailing mengandung tembaga sebesar 0,195 % dan *specific gravity* tailing 2,74 [33], maka akan membutuhkan tumbuhan sebanyak 243.692.189.809.

H. Floating Treatment Wetland (FTW)

Prinsip kerja FTW yaitu menggunakan tumbuhan yang ditanam dalam suatu media yang mengapung, sehingga akar dapat menggantung bebas di dalam air sedangkan daun muncul diatas permukaan. *Floating treatment wetland*

Tabel 1.
Kriteria desain *floating treatment wetland*.

Parameter	Satuan	Nilai
Kedalaman air (H)	M	0,8
Hydraulic Retention Time (HRT)	hari	< 15 hari
Surface coverage	%	5 - 50
Hydraulic Loading Rate	m ³ /m ² .hari	0,1 - 0,3

digunakan untuk meremediasi limbah domestik, pengolahan sungai, kolam, danau, reservoir, dan logam berat [37]. Kriteria desain *floating treatment wetland* diberikan pada Tabel 1 [38]. Bahan yang penting dalam membuat FTW sebagai berikut tumbuhan, media tanam sebagai media apung berupa PVC dan bambu, sistem *anchoring* sebagai penahan struktur FTW dengan menggunakan sistem tali dan pemberat [39].

I. Lokasi Penempatan FTW

Lokasi penempatan FTW yaitu berada di tempat pengendapan tailing. Tailing yang diremediasi dialirkan secara langsung melalui sungai dari pabrik pengolahan logam. Cara mendapatkan tailing dengan menggunakan proses fisik-kimia yaitu bijih tambang terlebih dahulu digiling dan digerus kemudian dilakukan proses flotasi. Selanjutnya tailing dan mineral berharga akan terpisah, tailing akan mengendap dan mineral berharga akan mengapung. Tailing yang mengendap akan dialirkan menuju tempat pengendapan dan mineral berharga akan diolah lagi.

J. Tata Letak Penanaman Tumbuhan

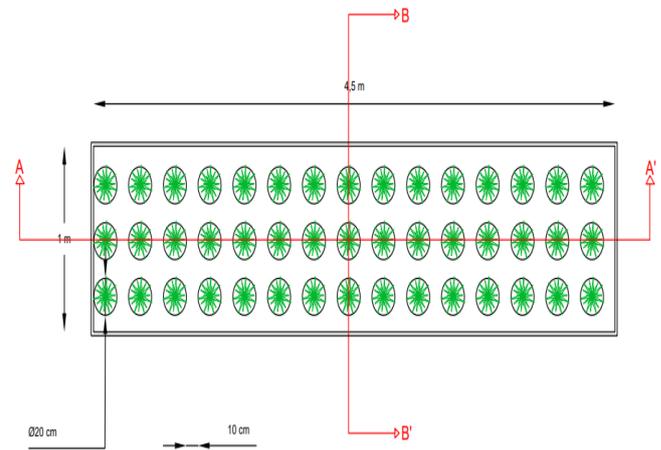
Penanaman tumbuhan dilakukan dengan cara yang sama yaitu menggunakan sistem *floating treatment wetland* di badan air. Bahan yang digunakan yaitu yang pertama tumbuhan. Tumbuhan yang digunakan adalah *Eichhornia crassipes*, *Vetiver zizanoides*, dan *Limnocharis flava*. Ketiga tumbuhan ini adalah tumbuhan lokal yang dapat tumbuh di lokasi tambang. Kedua media tanam. Prinsip apung yaitu dengan menggunakan media tanam apung (*buoyant frame*) atau dengan menggunakan bingkai apung. Media apung yang digunakan yaitu kayu dengan jerami. Ketiga *anchoring* (sistem tali). *Anchor* berfungsi untuk menahan *floating treatment wetland*. Media yang digunakan yaitu sistem tali.

Syarat pemilihan tumbuhan untuk *floating treatment wetland* sebagai berikut, yaitu mampu tumbuh dengan mengapung sendiri atau pada rakit yang dapat mengapung, membentuk jaringan akar yang padat dan terendam di badan air, mampu berkembang dalam kondisi yang keras tanpa menunjukkan gejala keracunan. menyerap beban nutrisi yang tinggi, merupakan tumbuhan lokal sehingga dapat beradaptasi dengan baik [31].

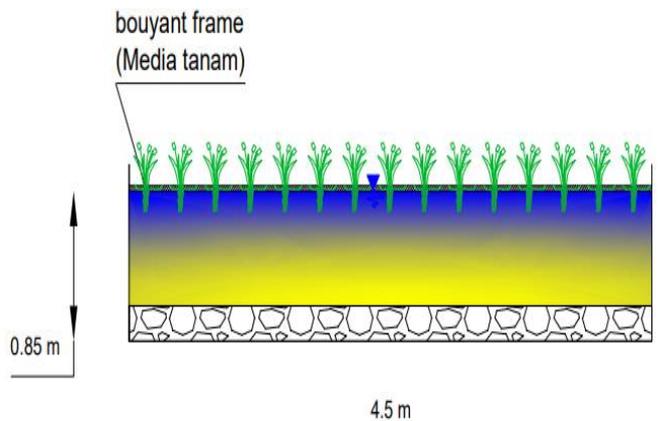
Tata letak tumbuhan diberikan pada Gambar 5-7. Gambar 5 merupakan Denah *Floating Treatment Wetland*, Gambar 6 merupakan Potongan A-A *Floating Treatment Wetland*, dan Gambar 7 merupakan Potongan B-B *Floating Treatment Wetland*.

K. Pemeliharaan Tumbuhan

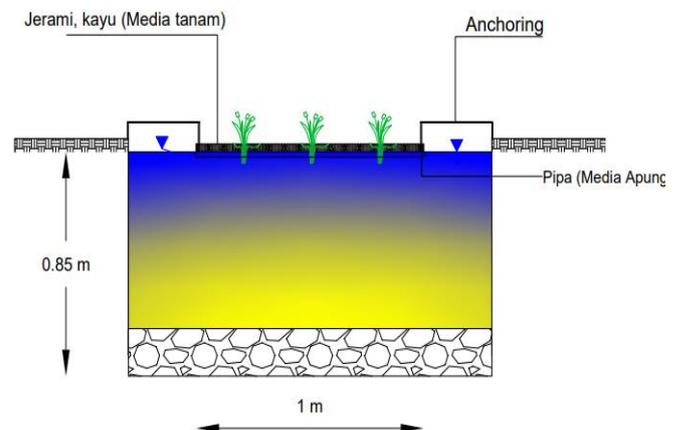
Pemeliharaan tumbuhan dilakukan sebagai berikut yaitu yang pertama pemilihan bibit. Bibit yang digunakan yaitu tumbuhan dengan umur yang sama. Kedua aklimatisasi tumbuhan. Tujuan aklimatisasi yaitu agar tumbuhan dapat



Gambar 5. Denah *floating treatment wetland*.



Gambar 6. Potongan a-a *floating treatment wetland*.



Gambar 7. Potongan b-b *floating treatment wetland*.

beradaptasi dengan lingkungan baru. Ketiga penanaman di *floating treatment wetland*. Keempat pemeliharaan tumbuhan. Pemeliharaan meliputi pengendalian hama, pengamatan tumbuhan, penyulaman, pemangkasan, dan pemupukan. Kelima pemanenan. Keenam pemanfaatan tumbuhan, seperti eceng yang sudah mati atau sudah dipanen dapat dimanfaatkan lagi menjadi biogas. Hal ini juga bermanfaat agar tidak terjadi pendangkalan di sungai sehingga tumbuhan yang sudah tidak dapat digunakan harus segera dimanfaatkan [40]. Akar, batang, dan daun vetiver mengandung minyak atsiri yang dapat dimanfaatkan sebagai parfum. Selain itu, vetiver juga dapat dimanfaatkan menjadi kerajinan tangan [22]. Genjer yang telah mati dapat digunakan sebagai kompos.

IV. KESIMPULAN/RINGKASAN

Fitostabilisasi adalah fitoteknologi yang berguna untuk mengimobilisasi kontaminan pada akar. Pemilihan tumbuhan (tumbuhan lokal) menjadi kunci utama fitostabilisasi. Fitostabilisasi dipengaruhi oleh sifat alamiah tumbuhan, faktor tanah, variabel lingkungan, dan laju transpirasi. Metode penanaman *floating treatment wetland* memiliki kelebihan yaitu tidak akan berpengaruh terhadap fluktuasi air, gelombang, dan angin serta dapat langsung diaplikasikan di badan air.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Hidayat, "Remediasi tanah tercemar logam berat dengan menggunakan biochar," *J. Pertan. Trop.*, vol. 2, no. 1, pp. 51–61, 2015.
- [2] G. Irianty, "Pengaruh Tailing PTFI terhadap Kualitas Air Sungai Ajkwa (Status Mutu Air Sungai Ajkwa Menggunakan Metode Storet)," Universitas Indonesia, Depok, 2013.
- [3] D. Aryani, "Pemanfaatan Rumput Vetiver (*Chrysopogon Zizanioides*, L.) dalam Proses Remediasi Logam Berat Kadmium (Cd) dan Tembaga (Cu)," Institut Pertanian Bogor, Bogor, 2016.
- [4] W. Meeinkuirt, M. Kruatrachue, P. Tanhan, R. Chaiyarat, and P. Pokethitiyook, "Phytostabilization potential of Pb mine tailings by two grass species, *thysanolaena maxima* and *vetiveria zizanioides*," *Water. Air. Soil Pollut.*, vol. 224, no. 10, 2013, doi: 10.1007/s11270-013-1750-7.
- [5] D. Vendruscolo, N. A. Santana, K. M. Souto, P. A. A. Ferreira, G. W. B. de Melo, and R. J. S. Jacques, "Differential behavior of the summer cover crops in the absorption and translocation of copper," *Cienc. Rural*, vol. 48, no. 12, 2018, doi: 10.1590/0103-8478cr20180005.
- [6] U. Hasanah, "Fitoremediasi Logam Tembaga (Cu) oleh Tanaman Genjer (*Limnocharis flava*) dari Sawah di Daerah Malang Berdasarkan Variasi Konsentrasi dan Waktu Pemaparan," Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim, Malang, 2020.
- [7] 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," *Int. J. Phytoremediation*, vol. 11, no. 8, 2009, doi: 10.1080/15226510902787302.
- [8] R. Razzaq, "Phytoremediation: an environmental friendly technique - a review," *J. Environ. Anal. Chem.*, vol. 4, no. 2, 2017, doi: 10.4172/2380-2391.1000195.
- [9] M. D. Cahyani, R. A. T. Nuraini, and B. Yulianto, "Studi kandungan logam berat tembaga (Cu) pada air, sedimen, dan kerang darah (*anadara granosa*) di perairan sungai sayung dan sungai gonjol, kecamatan sayung, kabupaten demak," *J. Mar. Res.*, vol. 1, no. 2, 2012.
- [10] P. Puradyatmika and J. Prewitt, "Tailings Reclamation Trials at PT Freeport Indonesia in Mimika Papua Indonesia," in *Proceedings of the Seventh International Conference on Mine Closure, Australian Centre for Geomechanics*, 2012, pp. 173–186. doi: 10.36487/acg_rep/1208_17_puradyatmika.
- [11] E. Milla-Moreno and R. Guy, "Phytoremediation of Tailings from a Chilean Copper Mine," in *2nd International Congress on Planning for Closure of Mining Operations*, 2018, pp. 1–9.
- [12] H. Kosgei and M. Mukuwa, "Environmental Effects of Tailing Dumps in The Zambian Copper Belt: a Review Paper," in *Enhancing Healthy Safety and Environment Synergies to Combat Adverse Effects*, 2020, pp. 1–10.
- [13] M. F. Banda, N. S. Mokgalaka, S. Combrinck, and T. Regnier, "Five-weeks pot trial evaluation of phytoremediation potential of *helichrysum splendendum* less. for copper- and lead-contaminated soils," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 3, pp. 1837–1848, 2022, doi: 10.1007/s13762-021-03243-z.
- [14] R. Andreazza, L. Bortolon, S. Pieniz, F. A. O. Camargo, and E. S. O. Bortolon, "Copper phytoextraction and phytostabilization by *brachiaria decumbens* stapf. in vineyard soils and a copper mining waste," *Open J. Soil Sci.*, vol. 3, no. 6, pp. 273–282, 2013, doi: 10.4236/ojss.2013.36032.
- [15] O. Karaca, C. Cameselle, and K. R. Reddy, "Mine tailing disposal sites: contamination problems, remedial options and phytocaps for sustainable remediation," *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, vol. 17, no. 1, 2018, doi: 10.1007/s11157-017-9453-y.
- [16] N. Mulyana, T. R. D. Larasati, and S. Srikandi, "Stimulasi fitostabilisasi logam berat Pb dan Cd menggunakan inokulan kapang terpapar radiasi gamma dosis 250 Gy," *J. Ris. Teknol. Pencegah. Pencemaran Ind.*, vol. 8, no. 1, p. 2779, 2017, doi: 10.21771/vol8no1tahun2017artikel2779.
- [17] Irhamni, S. Pandia, E. Purba, and W. Hasan, "Kajian akumulator beberapa tumbuhan air dalam menyerap logam berat secara fitoremediasi," *J. Serambi Engineering*, vol. 3, no. 2, 2017.
- [18] E. D. Maylani, R. Yuniati, and W. Wardhana, "The Effect of Leaf Surface Character on The Ability of Water Hyacinth, *Eichhornia Crassipes* (Mart.) Solms. to Transpire Water," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 902, no. 1. doi: 10.1088/1757-899X/902/1/012070.
- [19] H. Z. Hao, R. G. Zhong, R. Xiao, C. W. Liu, and X. bin Zhong, "The effect of transpiration for heavy metal uptake of hyperaccumulators," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 178–181, pp. 901–904, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.178-181.901.
- [20] L. Lazulva and A. Afrina, "Reduction of heavy metals level in the waste water using phytoremediation technique," *Indones. J. Chem. Sci. Technol.*, vol. 1, p. 1, 2018.
- [21] Haerunnisa, "Penggunaan eceng gondok (*Eichornia crassipes*) dalam penurunan kadar logam tembaga (Cu) pada perairan Danau Tempe Kabupaten Wajo," *J. Galung Trop.*, vol. 3, no. 2, pp. 18–30, 2014.
- [22] A. Y. Siregar, "Morfofisiologi Rumput Vetiver (*Vetiveria zizanioides* L. Nash) pada Beberapa Cekaman Kadar Air Tanah," Universitas Sumatera Utara, Medan, 2021.
- [23] Y. Ambarwati and S. Bahri, "Fitoremediasi limbah logam berat dengan tumbuhan akar wangi (*Vetiveria zizanioides* L.)," *Anal. Anal. Environ. Chem.*, vol. 3, no. 2, pp. 139–147, 2018.
- [24] L. S. Ui, I. M. Yulianti, and A. W. N. J., "Pemanfaatan tanaman akar wangi (*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash) untuk penyerapan logam berat tembaga (Cu)," *J. Univ. Atma Jaya Yogyakarta*, pp. 1–11, 2016.
- [25] W. Komarawidjaja and Y. S. Garno, "Peran rumput vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) dalam fitoremediasi pencemaran perairan sungai," *J. Teknol. Lingkungan*, vol. 17, no. 1, pp. 7–14, 2016, doi: 10.29122/jtl.v17i1.1459.
- [26] S. M. Andalina, "Evaluasi Penyerapan Kadar Logam pada Akar Tanaman Wetland Pasca Pengolahan Limbah Cair Tenun," Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, 2022.
- [27] F. Juliani, "Respon Morfologi Tanaman Genjer (*Limnocharis flava*) terhadap Lamanya Rendaman Parsial pada Fase Vegetatif," Universitas Sriwijaya, Palembang, 2018.
- [28] M. Haryati, T. Purnomo, and S. Kuntjoro, "Kemampuan tanaman genjer (*Limnocharis Flava* (L.)Buch.) menyerap logam berat timbal (Pb) limbah cair kertas pada biomassa dan waktu pemaparan yang berbeda," *LenteraBio*, vol. 1, no. 3, pp. 131–138, 2012.
- [29] A. Lestari, S. Anita, and T. A. Hanifah, "Potensi Tanaman Genjer (*Limnocharis flava*, (L.) Buch) sebagai Fitoremediator Ion Kadmium (II), Kromium (VI) dan Timbal (II)," Universitas Riau, Pekanbaru, 2017.
- [30] V. P. Ranawakage, K. C. Ellawala, and G. G. T. Chaminda, "Preliminary study on the influence of water level on the growth and morphology of *Limnocharis flava* (L.) Buchenau," *Ann. Limnol.*, vol. 494249–254, 2013, doi: 10.1051/limn/2013058.
- [31] R. Rusydi, "Analisis Mikroskopis dan Komponen Bioaktif Tanaman Genjer (*Limnocharis flava*) dari Kelurahan Situ Gede Bogor," Intitut Pertanian Bogor, Jawa Barat.
- [32] N. Nurhasni, "Penyerapan ion logam kadmium dan tembaga oleh genjer (*Limnocharis flava*)," *J. Kim. Val.*, vol. 1, no. 1, 2007, doi: 10.15408/jkv.v1i1.210.
- [33] M. P. Pohan, D. W. S. J.S., and A. A., "Penyelidikan Potensi Bahan Galian pada Tailing PT Freeport Indonesia di Kabupaten Mimika Provinsi Papua," in *Proceeding Pemaparan Hasil Kegiatan Lapangan dan Non Lapangan Tahun 2007 Pusat Sumber Daya Geologi*, 2007, pp. 1–9.
- [34] L. Pertanian, "Varietas unggul akar wangi (*Vetiveria zizanioides*) untuk mendukung industri minyak atsiri," *War. Penelit. dan Pengembnngan Tanam. Ind.*, vol. 22, no. 1, 2016.
- [35] I. Arham, "Pengendalian Eceng Gondok pada Berbagai Tingkat Salinitas Media," Universitas Hasanuddin, Makassar, 2013.
- [36] N. Nahda, "Fitoremediasi Logam Berat Zn dan Cu dengan Menggunakan Tanaman Akar Wangi (*Vetiveria zizanioides* L.)," Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan, 2017.
- [37] M. F. B. Mfarrej, X. Wang, M. Fahid, M. H. Saleem, A. Alatawi, and S. Ali, "Floating treatment wetlands (FTWs) is an innovative approach for the remediation of petroleum hydrocarbons-contaminated water," *J. Plant Growth Regul.*, 2022, doi: 10.1007/s00344-022-10674-6.
- [38] L. Pusparinda and I. B. Santoso, "Studi literatur perencanaan floating treatment wetland di Indonesia," *J. Tek. ITS*, vol. 5, no. 2, pp. 471–475, 2016, doi: 10.12962/j23373539.v5i2.17707.

- [39] R. Lidiana, "Efektivitas dan Efisiensi Tanaman Genjer (*Limnocharis flava*) dalam Menurunkan Kadar Logam Berat Timbal (Pb) Menggunakan Sistem Batch," Universitas Islam Negeri Sunan Ampel, Surabaya, 2022.
- [40] Marjefri, "Pemanfaatan Tanaman Eceng Gondok (*Eichhornia Crassipes*) sebagai Kompos di Kecamatan Danau Kerinci Kabupaten Kerinci," Politeknik Kesehatan Kemenkes Padang, 2019.