



Fitoremediasi Logam Berat Sistem Lahan Basah Terapung Menggunakan Tanaman Akar Wangi (*Chryzophogon zizanioides* (L.) Roberty) sebagai Hiperakumulator

Phytoremediation of Heavy Metals in Floating Wetland System using Vetiver (*Chryzophogon zizanioides* (L.) Roberty) as the Hyperaccumulator

EKAPUTRA AGUNG PRIANTORO^{1*}, PUJAWATI SURYAATMANA², DADAN SUMIARSA³, WIDYARANI⁴, ERNI SAURMALINDA BUTAR BUTAR⁴, TARZAN SEMBIRING⁴

¹Program Studi Bioteknologi, Sekolah Pasca Sarjana, Universitas Padjadjaran, Jl. Dipati Ukur No.35, Kota Bandung, Jawa Barat, 40132, Indonesia

²Jurusan Ilmu Tanah dan Sumber Daya Lahan, Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran, Jl. Raya Bandung Sumedang KM 21, Jatinangor, 45363, Indonesia

³Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran, Jalan Raya Bandung-Sumedang Km. 21 Jatinangor Sumedang, 45363, Indonesia

⁴Pusat Riset Lingkungan dan Teknologi Bersih, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), KST Samun Samadikun, Jln. Cisitu 21 / Sangkuriang Bandung, 40135, Indonesia

*E-mail: agung_priantoro@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 May 2024

Accepted 23 July 2024

Published 31 January 2025

Keywords:

Chryzopogon zizanioides (L.)

Roberty

Floating wetland

Hyperaccumulation

Phytoextraction

ABSTRACT

Pollution in the water environment is becoming increasingly massive. Rivers are polluted by industrial and household waste, which results in natural systems no longer being able to process pollutant materials that enter water bodies, so technological breakthroughs are needed that can come into direct contact with the surface of the water and be used in rivers and lakes. Phytoremediation is a waste processing method using plants grown in polluted environments. Floating wetland systems (constructed floating wetlands) provide a practical solution for dealing with pollution in the aquatic environment because they are directly in contact with polluted water bodies. Also, selecting plant species for floating wetlands determines the system's success in processing waste. The vetiver plant (*Chryzopogon zizanioides* (L.) Roberty) is a heavy metal hyperaccumulator plant that can grow well in aquatic and terrestrial environments. Still, it needs to be considered because not all cultivars can grow well in standing water, so they are unsuitable for processing liquid waste. Vetiver plants have several advantages compared to other aquatic plant species for floating wetland applications, such as being non-invasive and having no rhizomes, a root system extending downwards, and a massive root system to be used as a biofilter. Floating wetland systems are not widely used in natural systems or for final waste processing. The research is a literary study of floating wetlands, which has been implemented in several countries. The benefit of this research is to examine the ability of the vetiver plant as a hyperaccumulator plant from several studies that have been carried out so that it can be applied in natural environments.

INFORMASI ARTIKEL

Histori artikel:

Diterima 31 Mei 2024

Disetujui 23 July 2024

Diterbitkan 31 Januari 2025

Kata kunci:

Chryzopogon zizanioides (L.)

Roberty,

Fitoekstraksi

Floating wetland

Hiperakumulasi

ABSTRAK

Pencemaran di lingkungan perairan semakin masif terjadi. Sungai tercemar oleh limbah buangan industri dan rumah tangga, yang mengakibatkan sistem alami tidak mampu lagi mengolah bahan pencemar yang masuk ke dalam badan air sehingga diperlukan terobosan teknologi yang dapat langsung bersentuhan di permukaan air dan dipergunakan di sungai maupun danau. Fitoremediasi merupakan metode pengolahan limbah dengan menggunakan tanaman yang ditumbuhkan pada lingkungan tercemar. Sistem lahan basah terapung (*constructed floating wetlands*) memberikan solusi praktis untuk mengatasi pencemaran di lingkungan perairan, karena langsung bersentuhan dengan badan air yang tercemar. Selain itu pemilihan spesies tanaman yang akan digunakan dalam lahan basah terapung menentukan keberhasilan dari sistem untuk menolah limbah. Tanaman vetiver (*Chryzopogon zizanioides* (L.) Roberty) merupakan tanaman hiperakumulator logam berat dapat tumbuh baik dalam lingkungan perairan dan daratan, namun perlu diperhatikan karena tidak semua kultivar mampu tumbuh dengan baik pada genangan air, sehingga tidak cocok untuk pengolahan limbah cair. Tanaman vetiver memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan spesies tanaman air lainnya untuk penerapan lahan basah terapung, seperti sifatnya yang non-invasif dan tidak

memiliki rimpang, memiliki sistem perakaran yang menjulur ke bawah, sistem perakarannya yang masif, sehingga dapat digunakan sebagai biofilter. Sistem Lahan basah terapung belum banyak digunakan, baik dalam sistem alami maupun bertujuan pengolahan limbah akhir. Penelitian ini merupakan studi literatur mengenai lahan basah terapung yang sudah diterapkan di beberapa negara. Manfaat dari penelitian ini untuk menelaah kemampuan tanaman vetiver sebagai tanaman hiperakumulator dari beberapa penelitian yang sudah dilakukan untuk selanjutnya bisa diterapkan di lingkungan alami.

1. PENDAHULUAN

Aktivitas industri berpotensi mencemari lingkungan karena logam berat yang terkandung di dalamnya. Logam berat apabila masuk ke dalam badan air dan airnya digunakan untuk pertanian dan irigasi akan berdampak buruk terhadap kesehatan masyarakat dan lingkungan selama jangka panjang karena logam berat merupakan unsur yang tidak dapat didegradasi melainkan terakumulasi ke dalam tubuh organisme, atau biomagnifikasi, melalui rantai makanan. Jika telah mencapai ambang batas toleransi maka akan menimbulkan efek keracunan pada organisme hidup (Kalangie *et al.*, 2018; Murraya *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2011).

Logam berat seperti besi (Fe), mangan (Mn), seng (Zn), kadmium (Cd), kromium (Cr), tembaga (Cu), timbal (Pb), nikel (Ni), dan raksa (Hg) dapat mencemari lingkungan apabila terdapat dalam jumlah yang berlebih, melampaui ambang batas toleransi yang dapat ditanggung oleh makhluk hidup. Di alam terdapat dua macam logam berat, yang esensial dan non-esensial. Logam-logam yang esensial dalam jumlah sedikit berperan penting dalam metabolisme tubuh seperti Zn, Cu, Fe, Co, Mn, dan Ni, sedangkan non-esensial mencakup Hg, Cd, Pb, dan Cr. Merkuri (Hg) di alam dalam bentuk garam organik dan anorganik. Metil merkuri dapat mengalami bioakumulasi dan biomagnifikasi, pada biota perairan baik secara langsung maupun melalui rantai makanan. Merkuri masuk ke badan air melalui kegiatan industri dan pertambangan. Pertambangan emas ilegal kerap menggunakan air raksa untuk memisahkan butiran emas dari batuan. Limbah emisi merkuri dapat dihasilkan dari pembangkit listrik maupun industri semen yang menggunakan proses pembakaran dengan batubara. Partikulat merkuri terlepas ke atmosfer kemudian jatuh ke badan air melalui air hujan (Rahayu & Mangkoediharjo, 2022). Tembaga (Cu) dapat masuk ke dalam air karena aktivitas manusia seperti emisi udara, industri pelapisan logam, galangan kapal dan pertambangan (Nasution *et al.*, 2018; Rosahada *et al.*, 2018).

Dalam lingkungan perairan besi umumnya dalam konsentrasi kecil, konsentrasinya meningkat pada sedimen dan makin tinggi dalam organisme air seperti kerang hijau (Murraya *et al.*, 2018). Salah satu sumber kontaminan logam mangan (Mn) dikarenakan penggunaan pestisida dan pupuk yang berlebihan pada lingkungan, khususnya lahan pertanian di Indonesia. Pencemaran logam mangan (Mn) juga dapat berasal dari pertambangan batu bara yang masuk ke dalam badan sungai dan mengendap di sedimen (Irwan *et al.*, 2021; Sari *et al.*, 2019), sedangkan di alam dapat berasal dari pengikisan batuan dan dari aktifitas manusia berasal dari kegiatan industri seperti pelapisan logam, maupun pencemaran akibat air lindi dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA) (Kalangie *et al.*, 2018). Sumber pencemaran logam berat berasal dari aktifitas industri (Satriawan *et al.*, 2021). Logam Cr ini banyak dihasilkan dari limbah industri elektroplating karena bahan utama yang digunakan dalam kegiatan pelapisan (*plating*) logam menggunakan larutan kromium (Da Costa, 2019). Sumber pencemaran timbal (Pb), pada umumnya berasal dari kendaraan bermotor. Bahan bakar kendaraan bermotor diberi tambahan zat aditif yang mengandung Pb untuk meningkatkan kualitas bakar dari bahan bakar minyak. Partikulat Pb masuk ke badan air akibat

tersapu oleh air hujan sedangkan di lingkungan perairan terutama danau akibat lalu lintas perahu nelayan yang digunakan sebagai sarana transportasi air (Nurfadhilla *et al.*, 2020). Sumber pencemaran nikel (Ni) di perairan berasal dari limbah industri pelapisan nikel (*electroplating*), industri kertas, industri pupuk, industri baja, limbah rumah tangga, dan pupuk pertanian. Limbah industri ini mengandung senyawa nikel berbahaya seperti NiSO_4 dan NiCl_2 .

Fitoremediasi merupakan metode pengolahan limbah dengan menggunakan tanaman sebagai agen remediasi. Fitoremediasi adalah salah satu metode yang cukup efektif dan telah banyak dikembangkan untuk mengekstrak logam berat dari dalam lingkungan yang tercemar. Untuk melakukan fitoremediasi pengolahan logam berat diperlukan tanaman yang bersifat hiperakumulator. Menurut definisi, hiperakumulator harus mengakumulasi setidaknya 100 mg/g (0,01% berat kering), Cd, As, dan beberapa logam lainnya, 1000 mg g^{-1} (0,1 berat kering) Co, Cu, Cr, Ni, dan Pb, 1.000 mg g^{-1} (1% berat kering) Mn dan Ni. Tanaman hiperakumulator dapat mengambil logam berat dari tanah melalui akar dan mentranslokasikannya ke pucuk dan daun. Sebaliknya, non-hiperakumulator atau akumulator atau tolerans adalah spesies tanaman yang dapat mengakumulasi logam berat di bagian bawah tanah dan tidak dapat mentranslokasikannya ke pucuk dan daun. Beberapa tanaman yang memiliki hiperakumulator diantaranya *Arabidopsis thaliana* dan *Populus alba* (DalCorso *et al.*, 2021), *Mulberry nigra* (Hashemi & Tabibian, 2018), Pemilihan tanaman untuk fitoremediasi penting untuk diperhatikan karena selain bersifat hiperakumulator, tanaman yang akan digunakan hendaknya memiliki biomassa yang masif, tahan terhadap kondisi lingkungan yang ekstrim pada saat tanaman lain sulit bertahan hidup dan tidak bersifat invasif yang berarti tidak mengganggu pertumbuhan tanaman lain apabila diterapkan di lapangan.

Akar wangi atau tanaman vetiver (*Chrysophogon zizanioides* (L.) Roberty) merupakan salah satu jenis tanaman yang memenuhi syarat sebagai agen fitoremediasi karena dapat mengekstrak logam berat dari lingkungan ke dalam jaringan tanaman (Bhat *et al.*, 2022; Danh *et al.*, 2009; Dzakwan & Ni'am, 2021; Nugroho *et al.*, 2021). Vetiver telah diaplikasikan sebagai hiperakumulator untuk mengekstrak logam Cr pada limbah batik (Tambunan *et al.*, 2017), logam Cr dan Ni pada limbah elektroplating (Nugroho *et al.*, 2021), logam arsenik pada lingkungan perairan (Largo *et al.*, 2020). Salah satu faktor yang menentukan efektivitas akar wangi dalam hiperakumulasi logam berat adalah sistem yang digunakan. Perlakuan ini termasuk ke dalam fitoremediasi *in-situ*, karena bersentuhan langsung dengan badan air. Penggunaan vetiver sebagai agen fitoremediasi di lingkungan perairan belum secara umum dilakukan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa teknologi *floating wetland* dapat menjadi alternatif yang ramah lingkungan, yang memungkinkan penghilangan logam berat dalam jangka panjang (Borrallho *et al.*, 2020). *Floating Treatment Wetland* (FTW) merupakan salah satu jenis *constructed wetland* yang ditanam dalam media yang dapat mengapung di permukaan air. Dalam FTW tanaman tidak ditanam di tanah melainkan pada media apung yang kemudian diletakkan di permukaan air.

Tujuan dari ulasan paper ini adalah menelaah penelitian maupun *review* yang terkait dengan pemanfaatan tanaman vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) untuk menyerap logam berat dalam lingkungan perairan, dengan menggunakan lahan basah terapung (*Floating wetland*). Dari penelaahan ini diharapkan didapatkan gambaran menyeluruh mengenai sistem, mekanisme, dan potensi pemanfaatan akar wangi dalam lahan basah terapung untuk menyerap logam berat dalam lingkungan perairan, sehingga dapat menjadi acuan untuk penerapan sistem ini dalam pengelolaan lingkungan. Seperti penerapan dalam pengolahan air lindi dari TPA, yang pada umumnya menggunakan *constructed wetland* sebagai perlakuan terakhir, penerapan metode ini memerlukan lahan yang cukup luas dan tidak banyak tanaman yang dapat tumbuh dalam air lindi, dengan penerapan *floating wetland* menggunakan tanaman vetiver dapat mereduksi penggunaan lahan dan dapat langsung di terapkan di badan perairan.

2. TANAMAN AKAR WANGI (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) SEBAGAI HIPERAKUMULATOR LOGAM BERAT

Tanaman akar wangi atau vetiver termasuk ke dalam jenis rumput-rumputan, dapat tumbuh setinggi 150 sentimeter dan membentuk rumpun yang lebat. Tidak seperti kebanyakan rerumputan yang membentuk sistem akar yang menyebar secara horizontal, maka akar tanaman vetiver tumbuh ke bawah. Vetiver bisa bertahan hidup di aliran air yang dalam. Sistem akar pada tanaman akar wangi terstruktur halus dan sangat kuat. Vetiver tidak memiliki stolon maupun rimpang. Umur tanaman berpengaruh terhadap efektifitas penyerapan logam berat, semakin tua umur tanaman semakin efektif tanaman menahan laju infiltrasi air tercemar logam berat ke dalam badan sungai. Bila dikelola dengan baik dalam jangka waktu tiga bulan, vetiver sudah mulai tampak pertumbuhannya. Paling tidak satu tahun, vetiver efektif berguna sebagai tanaman penyerap air tercemar logam berat di lingkungan perairan karena sistem perakarannya sudah terjalin cukup tebal dan kuat (Komarawidjaja & Garno, 2016; Maharjan & Pradhanang, 2017; Patandung et al., 2016).

2.1 Mekanisme Penyerapan Logam Berat Tanaman Hiperakumulator

Tanaman hiperakumulator memiliki potensi fitoekstraksi yang merupakan kemampuan untuk menyerap dan menyimpan logam berat ke dalam sel dan organ tanaman, berbeda dengan tanaman jenis lain yang hanya bersifat akumulator maupun hipertoleran. Ada tiga proses utama tanaman mengakumulasi logam berat di dalam organ. Pertama adalah bioavailabilitas dan serapan logam berat dari lingkungan melalui akar, kedua adalah translokasi logam berat dari akar ke pucuk melalui pembuluh *xylem*, dan ketiga adalah penyerapan dan penyimpanan (sekuestrasi) logam berat di daun terutama di vakuola. Selama proses penyerapan ini melibatkan protein transporter yang memungkinkan logam berat diambil dan disimpan di dalam tanaman. Seperti halnya tanaman lainnya juga terlibat dalam proses detoksifikasi logam berat, tanaman hiperakumulator

memiliki mekanisme yang sama terjadi dengan adanya kelat alami seperti fitokhelatin (PC) yang lebih banyak diekspresikan selama proses translokasi dan sekuestrasi berlangsung (Ali et al., 2013).

Dua jalur utama logam berat masuk ke dalam akar adalah melalui jalur apoplastik dan jalur simplastik. Jalur apoplastik memungkinkan fraksi logam terlarut masuk ke dalam akar tanpa masuk ke dalam sel melainkan melalui ruang intraseluler. Di sisi lain, jalur simplastik memungkinkan pergerakan logam non-esensial seperti Ni, Cd, dan Pb melalui sitoplasma dengan menggunakan energi (ATPase). Elemen yang melintasi akar melalui jalur simplastik diteruskan ke xilem oleh berbagai *protein transport* melintasi membran plasma sel parenkim xilem. Penyerapan logam berat merupakan fungsi dari *Zn-regulated transporter*, *Iron-regulated transporter protein* (ZIP). Pengangkutan xilem difasilitasi oleh kelat alami yang ada di dalam tanaman yang mengubah ion logam bebas menjadi kompleks, sehingga memungkinkan translokasi yang mudah dan bebas distorsi. Hal ini karena bahan yang masuk ke xilem tidak boleh reaktif karena dapat menghambat transportasi. Kelat alami yang terlibat selama pemuatan xilem termasuk PCs dan asam organik (Verbruggen et al., 2009).

Transportasi dari akar ke tunas tergantung pada pemuatan *xylem* (*xylem loading*) terhadap logam berat. Mekanisme ini dimediasi oleh jenis ATPase tertentu yaitu ATPase pengangkut logam berat (*Heavy Metal ATPase* (HMAs)). HMA berfungsi untuk mempertahankan jumlah logam yang diserap dan membantu tanaman bertahan hidup di bawah kondisi logam berat yang keras. Salah satu gen yang mengendalikan pengangkut protein ini adalah HMA4, yang terlibat dalam hiperakumulasi dan translokasi Zn, Cd, dan Pb. HMA4 juga diketahui meningkatkan fungsi protein ZIP (*transporter*) untuk menyerap lebih banyak logam berat dari tanah. Jenis transporter lain yang terlibat dalam translokasi logam berat termasuk *multidrug* dan toksin yang dikodekan oleh gen FDR3, protein *Yellow Strip 1-Like* (YSL) yang dikodekan oleh gen TcYSL3, TcYSL5, dan YSL7 dan protein intrinsik mirip Nodulin 26 yang spesifik untuk transportasi unsur arsen (As) (Largo et al., 2020).

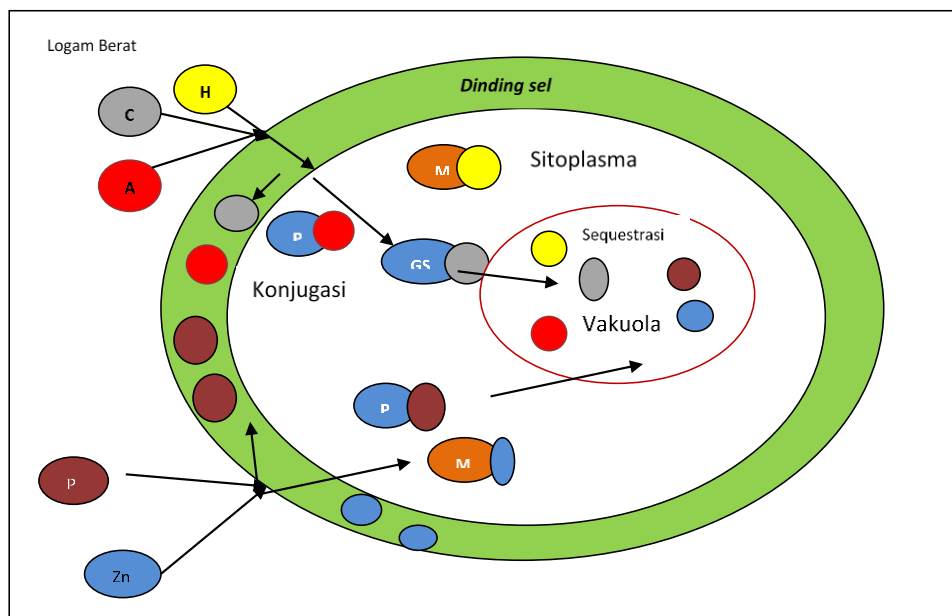
Tanaman hiperakumulator Ni dan toleran terhadap kontaminasi Ni yang tinggi menunjukkan adanya *histidin*, ligan *chelator* di pembuluh xilem. Hal ini menunjukkan bahwa adanya fungsi kelat alami yang terjadi selama translokasi logam berat dari akar ke pucuk. Dalam penelitian serupa, perbandingan antara hiperakumulator dan non-hiperakumulator telah dilakukan terhadap keberadaan histidin pada xilem dalam arti semakin tinggi kadar histidin menunjukkan semakin kuat sebagai tanaman hiperakumulator logam berat. Selain itu senyawa *nikotinamida* berperan sebagai *chelator* dan diperlukan untuk translokasi Ni dan Zn, masing-masing, dengan membentuk senyawa kompleks (Purwaningrum & Kusbiantoro, 2021).

Selanjutnya sekuestrasi merupakan proses detoksifikasi dan penyerapan logam berat di dalam daun ketika logam berat diangkut ke daun dan akan disimpan di dalam sel baik secara intraseluler atau ekstraseluler. Sebelum disimpan, logam berat mengalami detoksifikasi oleh ligan pengkelat seperti (*Metallothioneins/MTs*), (*Phytochelatin/PCs*), dan asam organik seperti histidin atau sitrat. Logam yang berbeda

disimpan di bagian yang berbeda dari daun tanaman hiperakumulator yang berbeda seperti pada dinding sel dan vakuola. Organel utama yang terlibat dalam akumulasi konsentrasi logam adalah vakuola. Vakuola merupakan organ penyimpanan yang mengontrol tingkat logam berat esensial dan non-esensial dalam sel tanaman. Transportasi vakuola dimediasi oleh transporter ion logam (*Metal Tolerance Protein /MTPs*) yang secara khusus memungkinkan transportasi melalui vakuola. Gen yang mengkode protein MTP termasuk TgMTP1 yang dapat mengakumulasi ion logam tingkat tinggi dalam vakuola batang (Verbruggen *et al.*, 2009). Pengangkut lain, yaitu *Yeast cadmium factor protein/(YCF1)*, khusus untuk vakuola dan membantu tanaman untuk toleran terhadap kontaminasi logam berat. Protein makrofag terkait resistensi alami (NRAMP) juga merupakan transpor ion vakuolar dan terutama terlibat dalam penyimpanan Cd dan Fe. Salah satunya gen *natural resistance-associated macrophage protein 3/(NRAMP3)*, telah diidentifikasi di banyak hiperakumulator dan terlibat dalam akumulasi Cd, Ni, Zn, dan Fe. Demikian pula, pengangkut

ABC (*ATP-Binding cassette (ABC) transporter*) juga dapat melakukan fungsi membawa kompleks kelat logam dalam vakuola. Oleh karena itu, vakuola berfungsi untuk memisahkan logam dari sitoplasma sel dan mengontrol distribusi logam berat di dalam tanaman (Nouet *et al.*, 2015).

Untuk dapat masuk ke dalam akar, logam berat berada dalam bentuk ion atau senyawa kompleks yang terlarut sehingga mudah masuk ke dalam sistem perakaran tanaman. pH larutan berpengaruh langsung atas keterlarutan unsur logam berat. Kenaikan pH menyebabkan logam berat mengendap, sehingga logam berat pada perairan yang netral lebih banyak terdapat pada sedimen. Eksudat akar berfungsi sebagai enzim reduktase logam berat di rizosfer yang memiliki potensi inheren yang tak dapat terpisahkan untuk mereduksi kompleks logam organik yang terbentuk di dalam tanah dan mengubahnya menjadi ion bebas atau kompleks logam sehingga mudah diserap oleh akar mikroorganisme di rizosfer seperti bakteri dan jamur mikoriza berperan dalam meningkatkan kelarutan logam berat dalam tanah (Ali *et al.*, 2013; Batol *et al.*, 2020; Caracciolo & Terenzi, 2021).



Gambar 1. Diagram detoksifikasi, konjugasi, dan sekuestrasi dalam vakuola tempat polutan yang dapat membahayakan sel. (*Chelator* yang ditampilkan adalah GSH *glutathione*, GLU *glutamat*, MT *metallothionin*, fitokelat PC) dimana sekuestrasi terjadi di dalam vakuola dan dinding sel (Chaudhary *et al.*, 2018)

Eksudat akar berperan sebagai *chelator* alami sehingga pelepasan eksudat akar meningkatkan kelarutan logam dalam lingkungan, sehingga meningkatkan mobilitas logam. *Chelator* alami yang paling umum termasuk *metallothionein* (MTs) dan *phytochelatin* (PCs). *Metallothionein* (MTs) adalah sejenis protein non-enzim yang memiliki ikatan dengan logam baik logam esensial maupun non-esensial yang kaya akan asam amino sistein dengan berat molekul rendah. MTs disintesis oleh tanaman terkait dengan keberadaan logam berat seperti Cd, Hg, Zn, Pb, dan perak (Ag). MTs membentuk senyawa kompleks dengan logam dan mengalami detoksifikasi. *Phytochelatin*s (PCs) umumnya merupakan polipeptida kecil yang kaya akan sistein dengan formula struktural spesifik (g-Glu-Cys)_n-Gly. PCs memiliki berat molekul rendah dan disintesis dalam kondisi stres logam beracun. PC adalah kelompok *chelator* logam berat yang

paling umum dan penting, dan terutama disintesis dalam sitoplasma sel. Kompleks PC seperti PC-logam dan PC-metaloid adalah struktur paling stabil di alam yang ditemukan disekuestrasi pada kompartemen vakuolar di mana toksisitas logam berat menjadi kurang beracun dibandingkan dengan bagian sel lainnya. PCs terlibat dalam toleransi terhadap logam berat dan memungkinkan akumulasi logam secara efisien pada organ tanaman. Fungsi dasarnya adalah detoksifikasi logam berat sebelum disimpan di daun. *Chelator* alam lainnya seperti *glutathione* dan *glutamat* juga berperan dalam konjugasi unsur logam yang masuk ke dalam sel untuk dipindahkan ke vakuola dan dinding sel (Chaudhary *et al.*, 2018; Rabelo *et al.*, 2021).

Karena tanaman mengakumulasi logam berat terutama di organ-organ yang kemungkinan juga mentranslokasi gula dan mineral, sehingga tanaman membutuhkan rasio yang

tepat untuk dipertahankan antara konsentrasi logam berat dengan nutrisi terutama di akar dan tunas. Hal ini yang disebut dengan faktor translokasi (TF) untuk tanaman hiperakumulator, TF lebih besar dari 1 (Tangahu *et al.*, 2011). Kemampuan fitoekstraksi tanaman dievaluasi dengan menghitung faktor translokasi (TF), yang dinyatakan sebagai mg/kg. Faktor lain yang mengukur potensi akumulasi adalah faktor biokonsentrasi (BCF), yaitu rasio antara jumlah logam berat yang diserap oleh akar dengan yang ada di dalam lingkungan baik tanah maupun air. Untuk tanaman hiperakumulatur BCF lebih besar dari 1 (Wu *et al.*, 2011). Tanaman hiperakumulator Ni dan toleran terhadap kontaminasi Ni yang tinggi menunjukkan adanya *histidin*, ligan *chelator* di pembuluh xilem. Hal ini menunjukkan bahwa adanya fungsi kelat alami yang terjadi selama translokasi

logam berat dari akar ke pucuk. Dalam penelitian serupa, perbandingan antara hiperakumulator dan non-hiperakumulator telah dilakukan terhadap keberadaan histidin pada xilem dalam arti semakin tinggi kadar histidin menunjukkan semakin kuat sebagai tanaman hiperakumulator logam berat. Selain itu senyawa *nikotinamida* berperan sebagai chelator dan diperlukan untuk translokasi Ni dan Zn, masing-masing, dengan membentuk senyawa kompleks (Purwaningrum & Kusbiantoro, 2021).

Resistensi tanaman vetiver (*Chryzophogon zizanioides* (L.) Roberty) terhadap logam berat

Beberapa penelitian menunjukkan vetiver toleran terhadap berbagai jenis logam berat seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Resistensi tanaman vetiver terhadap logam berat.

| No | Penulis | Jenis Limbah | Jenis Logam | Proses | Persentase Removal | Keterangan |
|----|--|--|-------------------------------------|--------------------------------|--|--|
| 1. | Aksorn & Chitsomboon, 2013; Minh <i>et al.</i> , 2016 | Limbah cair industri logam | Al, Cu, Sn, Zn, Pb | Fitoekstraksi, Fitostabilisasi | - | Akumulasi logam berat Akar>Daun |
| 2. | Nugroho <i>et al.</i> , 2021 | Limbah cair <i>electroplating</i> (sintetik) | Cr, Ni | Fitoekstraksi, Fitostabilisasi | 61,10% (Cr), 95,65% (Ni) | Nilai BCF, BAC dan FT >1 |
| 3. | Largo <i>et al.</i> , 2020 | Limbah cair pertanian | Ar, Fe | Fitoekstraksi | 97 % (Ar), 84% (Fe) | Tanaman vetiver tidak menunjukkan efek keracunan logam Ar dan Fe |
| 4. | Effendi <i>et al.</i> , 2018 | Limbah cair industri batik | Cr | Fitoekstraksi | 40,29% (Cr) | Limbah pekat perlu diencerkan |
| 5. | Borralho T, <i>et al.</i> , 2020; Kiiskila, 2018; Suelle, 2015 | Limbah cair pertambangan | Fe, Zn, Cu | Rhizofiltrasi | 40%, (Fe), 33% (Zn), 23% (Cu) | Menetralkan asam |
| 6. | Adigun & Are, 2015 | Limbah pertanian, industri dan pemukiman | Pb, Cd, Zn | Fitoekstraksi | 82,8% (Pb), | Mikroba berperdalam biosorpsi logam berat |
| 7. | Mudhiriza <i>et al.</i> , 2015 | Limbah domestik dan industri | Zn, Mn, Ni | Fitoekstraksi, Fitostabilisasi | 74,25% (Zn), 68,57% (Mn), 99,59% (Ni) | Kondisi sedikit asam meningkatkan availabilitas logam |
| 8. | Danh <i>et al.</i> , 2009 | Limbah pertanian dan industri | As, Cd, Cu, Cr, Pb, Hg, Ni, Se, Zn. | Fitoekstraksi, Fitostabilisasi | 1-6% (As, Cr, Cd, Hg) 16-30% (Ni, Cu), 44-47% (Pb, Se, Zn), TF<1 | Penambahan agen pengkelat dapat meningkatkan daya serap logam berat pada tanaman |

Akar vetiver mengakumulasi Al 17–30 kali lipat, sedangkan pada bagian atas pucuk tanaman vetiver serapan logam Al 1,2 kali lipat lebih tinggi dari pada jenis tanaman pembanding, kemudian konsentrasi Cu pada akar lebih besar daripada pucuk. Translokasi Pb dari akar ke tunas sebesar 41%. Unsur logam Sn terakumulasi lebih tinggi di bagian atas tanaman seperti pucuk dan daun, dimana rasio pucuk/akar bervariasi dari 82 hingga 277%. Unsur logam Zn dapat ditranslokasikan dari akar dan terakumulasi di pucuk. Rasio pucuk/akar mencapai 46%. (Aksorn & Chitsomboon, 2013; Minh *et al.*, 2016). Dalam mengolah limbah *electroplating* tanaman vetiver mampu menghilangkan logam Cr sebanyak 61,10% dan Ni sebesar 95,65% pada air yang tercemar logam. Tingkat serapan Cr dan Ni tertinggi masing-masing adalah

127,21 mg/kg/hari dan 15,60 mg/kg/hari, sedangkan laju eliminasi Cr dan Ni cenderung lambat masing-masing 1,09 mg/kg/hari dan 12,24 mg/kg/hari. Nilai BCF, BAC, dan TF vetiver pada air yang terkontaminasi Cr dan Ni lebih besar dari 1 (>1), yang menunjukkan bahwa akar wangi bekerja melalui fitoekstraksi dan fitostabilisasi untuk mengolah logam berat (Nugroho *et al.*, 2021; Rabelo *et al.*, 2021).

Arsenik (As) dan besi (Fe) merupakan unsur logam beracun dalam lingkungan perairan. Penerapan sistem hidroponik dengan menggunakan tanaman vetiver dapat menyerap arsenik sebanyak 97% dalam lingkungan perairan dan 87% pada sedimen, sedangkan untuk logam besi sebanyak 84% dan tidak menunjukkan efek keracunan dan 92% tanaman mampu tumbuh dalam lingkungan perairan.

Lingkungan perairan cenderung asam yang menyebabkan lebih banyak unsur logam yang terserap oleh tanaman. Akumulasi logam berat lebih banyak pada bagian akar, hal ini merupakan upaya preventif tanaman terhadap efek racun dari arsenik dan besi (Largo *et al.*, 2020). Industri tekstil banyak menyumbang logam berat pada lingkungan perairan, seperti logam Chromium pada limbah cair industri batik. Tanaman vetiver ditempatkan pada lahan basah terapung (*floating wetlands*) mampu menyisihkan logam krom (Cr) sebanyak 40,29%. Namun hal yang patut diperhatikan kepekatan dari limbah tekstil itu sendiri dapat mempengaruhi pertumbuhan tanaman, pengenceran yang optimal diketahui pada 50% limbah tekstil (Effendi *et al.*, 2018).

Pada areal pertambangan, banyak mengandung logam berat dan bersifat asam, tidak banyak tanaman yang mampu tumbuh dalam kondisi ekstrim semacam itu. Tanaman vetiver diketahui dapat tumbuh dalam rentang pH yang cukup lebar. Tanaman vetiver dengan metode lahan basah terapung (*Floating Beds*) mampu menyisihkan logam-logam Fe, Zn, Cu, masing-masing sebesar 40%, 33%, 23%. Berdasarkan hasil analisis diketahui vetiver lebih banyak menyimpan logam berat di bagian akar daripada batang dan daun (Borralho *et al.*, 2020), selain itu tanaman vetiver pada areal pertambangan juga bermanfaat untuk menetralkan asam pada saluran buangan (Kiiskila, 2018), sedangkan peneliti lain (Suelle *et al.*, 2015) menunjukkan nilai yang diperoleh tanaman vetiver BCF > 1 dan TF < 1 yang mengindikasikan vetiver di lingkungan perairan lebih berperan sebagai rhizofiltrasi daripada fitoekstraksi.

Adigun & Are (2015) menggunakan dua strain vetiver, yaitu *Vetiveria zizanioides* dan *Vetiveria nigriflora*, mampu mengekstrak logam dari dalam lahan tercemar. Dari kedua varietas tersebut *V. zizanioides* memiliki kemampuan menyerap logam lebih besar daripada *V. nigriflora*. Selain peran tanaman dalam mengekstrak logam berat, mikroba di lingkungan perairan juga berperan dalam mereduksi logam berat melalui mekanisme biosorpsi dengan membentuk lapisan biofilm di wadah maupun sistem perakaran tanaman. Pengaruh pH nampaknya cukup signifikan dalam fitoekstraksi logam berat pada sistem perairan, karena meningkatkan availabilitas logam berat terhadap perakaran tanaman, sehingga tanaman yang tahan pada kondisi sedikit asam dapat digunakan sebagai akumulator logam berat. Pada kondisi ini tanaman vetiver dapat direkomendasikan sebagai tanaman hiperakumulator (Mudhiriza *et al.*, 2015; Ma Y *et al.*, 2016).

Dalam kajian rumah kaca maupun studi lapangan, ditunjukkan bahwa vetiver memiliki biomassa yang tinggi, dan tahan terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem, seperti rentang pH yang cukup besar, kekeringan berkepanjangan, kondisi banjir dan tergenang, suhu yang rendah, salinitas dan kandungan logam berat seperti As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, dan Zn. Vetiver dapat mengakumulasi logam berat, terutama timbal (pucuk 0,4% dan akar 1%) dan seng (pucuk dan akar 1%). Sebagian besar logam berat terakumulasi di akar sehingga cocok untuk fitostabilisasi, dan untuk fitoekstraksi dengan penambahan bahan pengkelat. Vetiver juga dapat menyerap dan melakukan biodegradasi limbah organik (2,4,6-trinitroloena, fenol, etidium bromida, *benzo[a]pyrene*, *atrazine*). Meskipun vetiver tidak seefektif

beberapa spesies tanaman lain dalam akumulasi logam berat, namun sangat sedikit tanaman seperti vetiver yang dapat toleran terhadap kondisi iklim dan media tanam buruk (tanah, pasir, dan tailing). Semua karakteristik khusus tersebut menjadikan vetiver tanaman pilihan untuk fitoremediasi logam berat dan limbah organik (Danah *et al.*, 2009).

3. MEKANISME PENYERAPAN LOGAM BERAT OLEH MIKROBA

Mikroorganisme dalam lingkungan rizosfer memainkan peranan yang cukup signifikan dalam fitoremediasi. Umumnya kondisi lingkungan yang tercemar merupakan keadaan yang kurang menguntungkan dan sedikit kandungan nutrisi, sehingga tidak semua tanaman dapat bertahan hidup, meskipun demikian keberadaan mikroba dapat membantu pertumbuhan tanaman. Secara umum peran mikroba dalam pertumbuhan tanaman melalui tiga cara, yaitu mensintesa senyawa yang diperlukan oleh tanaman, memfasilitasi penyerapan nutrisi dari lingkungan dan mengurangi atau mencegah penyakit pada tanaman. Dalam proses fitoekstraksi, mikroba berperan penting dalam bioavailabilitas logam berat di dalam lingkungan (Caracciolo & Terenzi, 2021). Unsur hara dalam lingkungan tidak selalu dapat langsung diurai oleh tanaman sehingga perlu enzim yang dihasilkan oleh mikroba (Worku *et al.*, 2018). Mikroorganisme di rizosfer seperti bakteri dan jamur mikoriza berperan dalam meningkatkan kelarutan logam berat dalam tanah (Batol *et al.*, 2020). Eksudat yang dikeluarkan dari tanaman sebagai respon imbal balik tanaman terhadap lingkungan dari sistem perakaran tanaman (*Root exudates-REs*) memainkan peran yang sangat penting dalam proses fitoremediasi, tingginya kepadatan dan keragaman mikroorganisme pada lapisan rizosfir disebabkan oleh pengaruh berbagai komponen dalam REs (Ehlers *et al.*, 2020).

Pada negara-negara yang umumnya berada di daerah tropis tanaman vetiver dapat tumbuh dan hidup tanpa aplikasi fertiliser nitrogen maupun fosfat, yang umumnya pada lingkungan yang miskin unsur hara. Tanaman vetiver membentuk hubungan yang sangat erat dengan sejumlah besar mikroba di lingkungan rizosfir yang menyediakan sejumlah besar nutrisi seperti bakteri pemfiksasi nitrogen, bakteri pelarut fosfat dan jamur termasuk mycorrhizal dan *cellulolytic fungi* dan fitohormon (*plant growth regulator bacteria*) untuk pertumbuhan tanaman (Glick, 2012).

Penyerapan logam berat oleh mikroba, meliputi dua mekanisme yaitu *Passive Uptake* dan *Active Uptake*. *Passive Uptake* istilah lainnya adalah biosorpsi. Proses ini terjadi ketika ion logam berat mengikat dinding sel dengan dua cara yang berbeda, (1) pertukaran ion di mana ion *monovalent* dan *divalent* seperti Na, Mg, dan Ca pada dinding sel digantikan oleh ion-ion logam berat; (2) formasi kompleks antara ion-ion logam berat berikatan dengan *functional groups* seperti *carbonyl*, *amino*, *thiol*, *hydroxy*, *phosphate*, dan *hydroxy-carboxyl* yang berada pada dinding sel, sedangkan *Active uptake* adalah pergerakan molekul melintasi membran dari daerah konsentrasi rendah ke daerah konsentrasi tinggi melawan gradien konsentrasi, dibantu oleh enzim dan memerlukan energi. *Active uptake* menggunakan protein. Misalnya ABC-

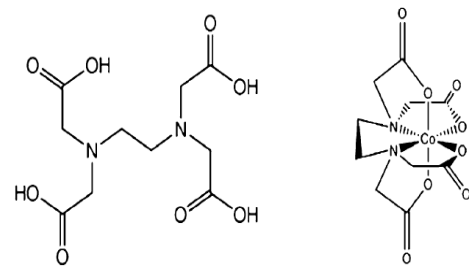
System, (ATP-Binding Cassette transporters), komponen peptidoglikan dan polisakarida sel dinding biosorben merupakan tempat pengikatan aktif untuk serapan logam (Igiri et al., 2018; DalCorso et al., 2021; Pande et al., 2022).

Frete et al. (2019) dalam penelitiannya menemukan beberapa jenis bakteri yang resisten terhadap logam Pb, Cu, dan Cd. Dari hasil skrining terdapat tiga isolat bakteri yang memiliki resistensi yang tinggi terhadap ketiga jenis logam berat yaitu *Bacillus oceanisediminis* PGD1A, *Vibrio alginolyticus* PGD5A, dan *Halobacillus kuroshimensis* PGD9B. Merkuri merupakan logam berat yang bersifat sangat toksik, namun penambang emas rakyat masih sering menggunakan merkuri untuk mengekstrak emas dari batuan atau ore dan membuang limbah merkuri secara bebas ke lingkungan dan terbawa air hujan sampai kepada perairan (Puspasari, 2006). Fatimawali et al. (2011) menemukan bakteri resisten terhadap merkuri yang kemudian dilakukan analisis Gen 16S rRNA. Analisis tersebut biasa digunakan untuk mengetahui jenis spesies bakteri. Berdasarkan hasil analisis menunjukkan bahwa isolat tersebut mendekati urutan gen spesies *Klebsiella pneumoniae*.

4. SENYAWA PENGIKAT LOGAM (CHELATING AGENT)

Hiperakumulator dan non-hiperakumulator dapat menyerap logam berat kontaminan di akar, batang dan daun, akan tetapi ada kelemahan utama yaitu biomassa masing-masing tanaman dapat jauh berkurang akibat terpapar logam berat dan mekanisme alami tidak mampu untuk menyerap fraksi logam berat yang tidak larut dalam tanah, sehingga berbagai macam agen pengkelat (*Chelator*) yang berbeda digunakan untuk membantu tanaman dalam menyerap logam berat. Mekanisme ini disebut *induced phytoextraction* atau *induced*. Dasar fungsi kelat adalah untuk meningkatkan kapasitas serapan logam berat tanaman dan juga meningkatkan potensi hiperakumulator untuk menyerap logam berat dalam kadar yang signifikan (Antiti et al., 2017; Chuan et al., 2019).

Senyawa pengikat logam (*chelating agent*) baik yang sintetik (*induced*) maupun alami berperan penting dalam menyerap logam berat dari lingkungan ke dalam tanaman. Senyawa pengikat logam merupakan senyawa kimia yang bereaksi dengan ion logam untuk membentuk kompleks yang stabil dan larut dalam air, juga dikenal sebagai *chelants*, *chelators*, atau *sequestering agent*. Senyawa pengikat logam memiliki pusat seperti cincin yang membentuk setidaknya dua ikatan dengan ion logam dan merupakan senyawa kimia yang mengikat ion logam dengan kuat. Awalnya senyawa pengikat logam menyebabkan difusi logam melalui akar dengan meningkatkan konsentrasi logam di tanah dengan cara desorpsi logam dan menurunkan difusi logam kemudian membentuk ikatan dengan senyawa pengikat logam. Kompleks senyawa tersebut bersifat netral sehingga tidak terhalang masuk ke dalam akar oleh polisakarida dan gugus lain seperti karboksil di sel lapisan endodermis, contohnya seperti EDTA, EDDS (Chen et al., 2012). Seperti pada Gambar 2, senyawa EDTA mengikat logam Co pada gugus bebasnya, sehingga menjadi senyawa yang bersifat stabil dan tidak bersifat reaktif.



Gambar 2. Struktur dari Ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) dan Co-EDTA (Rekab et al., 2014)

Chuan et al. (2019) dalam penelitian menggunakan EDTA sebagai agen pengkelat sintetik untuk mengekstrak logam berat pada tanah menyimpulkan bahwa akumulasi logam berat secara signifikan lebih tinggi ($p < 0,05$) dalam akar bawah dan atas serta anakan rumput vetiver untuk perlakuan Cd + Pb + Cu + Zn + EDTA dibandingkan dengan kontrol. Total keseluruhan akumulasi tertinggi Zn (8068 ± 407 mg/kg) sedangkan yang tertinggi akumulasi Cu (1977 ± 293 mg/kg) dan Pb (1096 ± 75 mg/kg).

Selain EDTA, Ramesh Antiti et al. (2017) menggunakan EDDS sebagai agen pengkelat. Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa aplikasi EDDS meningkatkan kelarutan Pb dalam tanah setelah 3 dan 13 bulan percobaan lapangan. Hasil jaringan tanaman menunjukkan peningkatan serapan Pb oleh akar wangi dan menunjukkan bahwa aplikasi EDDS mendorong translokasi Pb dari akar ke pucuk. Konsentrasi Pb rata-rata meningkat masing-masing sebesar 53% dan 203% pada pucuk dan 73% dan 84% pada akar wangi setelah aplikasi EDDS pertama dan kedua. Hasil pengamatan visual tidak terjadi gejala fitotoksik dari peningkatan bioavailable Pb dari aplikasi EDSS pada tanaman vetiver.

5. HYDROPHONIK SYSTEMS/FLOATING WETLANDS

Aplikasi fitoekstraksi di lapangan dan badan air dapat dilakukan dengan metode *floating wetlands* (FTW). Sistem hidroponik merupakan sistem dengan memanfaatkan tanaman yang ditanam dalam media cair. Teknik ini merupakan sistem rekayasa yang dirancang dan dibangun untuk memanfaatkan proses alami yang melibatkan tanaman, media, dan konsorsium mikroba yang terkait untuk pengolahan air limbah. Lahan basah terapung (*floating wetlands*/FTW) menggunakan struktur terapung untuk mendukung tanaman, yang tumbuh secara hidroponik dan menghilangkan kontaminan dari dalam badan air. Akar menyediakan media pendukung untuk pertumbuhan mikroba yang menempel yang ikut serta dalam proses pengolahan. Sistem ini dapat mencapai efisiensi eliminasi dari 91, 97, dan 71% untuk nitrat, nitrit, dan nitrogen, masing-masing, dan penghapusan rata-rata adalah 17–47% untuk kebutuhan oksigen kimiawi, 31–64% untuk total nitrogen, dan 8–15% untuk fosfor total untuk pengolahan senyawa nitrat dari limbah pertanian. Akar tanaman pada sistem hidroponik dimanfaatkan sebagai media pembentukan biofilm dan penempelan mikroba untuk mengolah air limbah (Akpah et al., 2015; Worku et al., 2018). FTW menggunakan sistem apung sehingga dapat secara langsung diaplikasikan di badan air. Bioremediasi air limbah dengan teknik hidroponik direkomendasikan sebagai pengolahan air limbah

terdesentralisasi dan dapat digunakan kembali seperti untuk sistem irigasi.

Sistem *anchoring* berfungsi untuk menahan FTW dari arus, angin, gelombang, dan fluktuasi ketinggian air. Penerapan lahan basah terapung lebih tepat digunakan pada perairan yang dangkal. Kriteria desain perencanaan FTW adalah kedalaman air >0,8 m, HRT <15 hari, *surface coverage* 5–50%, dan HLR 0,1–0,3 m³/m² hari. *Hydroponic systems/floating wetland* merupakan salah satu strategi alternatif untuk mengekstrak logam berat baik skala lab maupun lapangan. Akar yang membentang di bawah infrastruktur menyerap nutrisi untuk pertumbuhan tanaman (Pusparinda & Santoso, 2016; Prajapati et al., 2017; Pavlineri et al., 2017).

Rumput vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) merupakan tanaman non-invasif dan tumbuh cepat yang dapat tumbuh secara berkelanjutan di bawah kondisi hidroponik. Selain itu, Vetiver toleran terhadap kondisi asam dan logam, dan dikenal sebagai hiperakumulator Pb dan Zn (Kiiskila, 2018). Largo et al. (2020), menggunakan tanaman akar wangi pada *floating wetland* untuk mengekstrak logam arsenik pada lingkungan yang tercemar arsenik, menyatakan Remediasi rata-rata arsenik tercatat 97% dalam air dan 84% dalam sedimen, sedangkan rata-rata remediasi besi adalah 87% dalam sedimen. Tingkat kelangsungan hidup makrofita sebesar 92% dan arsenik diakumulasi di bagian akar. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *artificial floating island vetiver* (AFIV) berpotensi untuk merehabilitasi reservoir yang terkontaminasi dengan arsenik (Caporale et al., 2014).

Pada umumnya anakan dan akar yang ditanam pada media yang dialiri air sungai menunjukkan kinerja yang lebih baik (lebih panjang) dibandingkan dengan anakan dan akar yang ditanam pada media yang dialiri air tanah. Berdasarkan hasil pengukuran berat kering diketahui bahwa pertumbuhan akar lebih cepat dibandingkan dengan pertumbuhan anakan. Hasil aplikasi pada badan sungai menunjukkan bahwa tanaman vetiver memiliki kemampuan yang baik dalam pemanfaatan limbah organik dari perairan sungai Cikapundung sebagai sumber nutrisi (Komarawidjaja & Garno, 2016). Laju penyisihan logam berat dalam air oleh tanaman vetiver berturut-turut adalah Fe>Zn>Pb>Mn>Cu. Berdasarkan eksperimen yang dilakukan, penyerapan logam berat meningkat sejalan dengan bertambah panjangnya akar dan kepadatan tanaman dan temuan kemudian menunjukkan bahwa akumulasi logam berat dalam biomassa tanaman lebih tinggi di pucuk akar wangi daripada di akar. Penelitian selanjutnya anakan tanaman vetiver ditanam pada *floating tray* dalam limbah dengan waktu retensi 0, 7, 14, dan 21 hari. Dari semua parameter yang diukur dengan perlakuan tanaman akar wangi, dicapai pengurangan polutan sebesar 62–100%, sedangkan tanpa akar wangi hanya sebesar 9–27%. pH limbah tetap stabil pada 7,44–7,64. Perubahan N (9,8 dari 27,5 mg-ℓ⁻¹) dan P (2,0 dari 5,3 mg-ℓ⁻¹), sedangkan ekstraksi logam berat (hingga 6.2 mg Zn dan 3.3 mg Mn, anakan–1). Serapan pada akar meningkat seiring waktu dengan kecepatan eksponensial (Panja et al., 2018; Wang et al., 2011).



Gambar 3. Desain modifikasi eksperimen di lapangan *floating treatment wetland* (Kusin et al., 2018)

Dalam aplikasi sistem *floating vetiver wetland* (FVI) pada sungai yang mengalir didapatkan efisiensi penyisihan untuk BOD₅ hingga 73% (748-1642 mg/l inlet) dan COD hingga 58% (835-2602 mg/l inlet). Efisiensi penyisihan TKN antara 26 hingga 46% (14–21 mg/l inlet), sedangkan NH⁴⁺- N sebesar 28–46% (13–19 mg/l inlet), untuk NO³⁻-N 35–58% (4–11 mg/l inlet), dan PO⁴-3-P tercatat sebesar 42–63% (4–8 mg/l inlet). Akumulasi hara dalam sampel yang dipanen bervariasi antara 7,4 dan 8,3 g N/kg berat kering dan 6,4–7,5 g P/kg berat kering di unit perlakuan hidroponik selama masa

penelitian (Worku et al., 2018). Pada uji coba lapangan FVI selama instalasi enam minggu menunjukkan peningkatan kualitas air dengan peningkatan signifikan (92%) oksigen terlarut dan penghilangan besar kebutuhan oksigen kimia/COD (77%) dan nitrat (73%), menghasilkan peningkatan 14% dari *Water Quality Index* (WQI) secara keseluruhan (Ajjah et al., 2020; Hao et al., 2020; Lavania, 2004; Mathew & Rosary, 2015; Priantoro et al., 2022), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 dan 4.



Gambar 4. Pemanfaatan tanaman vetiver untuk biofilter pada Keramba Jala Apung di Waduk Cirata (Priantoro et al., 2022)

Salah satu aplikasi tanaman vetiver yang cukup efektif dalam pengolahan limbah sisa pakan ikan dilakukan pada Keramba Jala Apung di Waduk Cirata. Sedimen dasar merupakan lumpur yang sangat kaya dengan bahan organik sisa pakan ikan dari peternak yang jatuh ke dasar danau. Hal tersebut menimbulkan efek negatif pada saat musim pancaroba, perubahan dari musim panas ke musim penghujan yang sering di sebut fenomena *upwelling*, fenomena ini sangat merugikan peternak ikan, sehingga didesain suatu keramba yang dapat mengolah limbah hasil sisa pakan ikan untuk dijadikan pupuk organik cair guna budidaya tanaman hortikultura, yang kemudian air hasil olahan di kembalikan ke danau, melalui filter alami dari akar tanaman vetiver. Akar tanaman vetiver cukup masif sehingga dapat digunakan sebagai biofilter yang mereduksi bahan pencemar dan meningkatkan oksigen terlarut ke dalam danau. Aplikasi lain dapat digunakan sebagai pengolahan air lindi dari TPA. Setelah perlakuan awal tanaman vetiver dapat digunakan sebagai filter dan menyerap bahan-bahan organik sebelum dibuang ke badan sungai. Penerapan tanaman vetiver sistem hidroponik bukan tanpa kelemahan, sebab tanaman vetiver tidak mampu hidup dalam air lindi pada konsentrasi tinggi, sehingga perlu diupayakan sistem pengolahan secara bertingkat, dimana kolam penampungan dibagi beberapa ruang dimana output ruang pertama, merupakan input ruangan berikutnya. Banyaknya ruang tergantung dari beban limbah air lindi yang masuk ke dalam sistem pengolahan air lindi.

6. KESIMPULAN

Tanaman vetiver (*Chryzophogon zizanioides* (L.) Roberty) atau tanaman akar wangi berpotensi besar dipakai untuk agen fitoekstraksi logam berat maupun materi organik yang ada dalam tanah dan dalam sistem perairan. Hal tersebut karena tanaman vetiver memiliki sifat hiperakumulator logam berat dan daya adaptasi tanaman vetiver pada lingkungan ekstrim yang tanaman lain sulit untuk tumbuh. Selain sifatnya yang hiperakumulator tanaman vetiver juga memiliki biomassa yang masif, masa pertumbuhan yang cepat serta sistem perakaran yang lebat masuk ke dalam tanah

secara vertikal, berbeda dengan tanaman rumput lainnya yang memiliki sistem perakaran cenderung horizontal, membentuk rimpang sehingga dapat mengganggu tanaman lainnya. Peran mikroba dalam sistem perakaran tanaman, berperan cukup signifikan dalam proses fitoekstraksi logam berat dalam lingkungan yang tercemar. Mikroba melepaskan enzim yang berperan dalam meningkatkan availabilitas logam berat sehingga mudah diserap oleh tanaman, sedangkan peran senyawa pengikat logam berperan untuk meningkatkan kelarutan logam dan diikat menjadi senyawa yang bermuatan netral, sehingga mudah masuk kedalam sistem perakaran tanaman.

7. REKOMENDASI

Tanaman vetiver merupakan tanaman terestrial dan tidak tumbuh secara alami di lingkungan perairan sehingga untuk penerapannya di lingkungan perairan diperlukan rekayasa teknik agar tanaman vetiver dapat mengapung di atas air. Tanaman vetiver ini dipilih karena memiliki biomassa yang cukup padat, akar yang menjuntai ke bawah, tidak seperti jenis rumput lain yang pada umumnya penyebaran akar ke arah samping sehingga tidak bersifat invasif. Berdasarkan penelitian terdahulu, diketahui tanaman vetiver bersifat hiperakumulator logam berat. Penerapan tanaman vetiver dapat dilakukan pada lingkungan perairan maupun lahan bekas tambang logam. Sejalan dengan kemampuan tersebut, tanaman vetiver berpotensi digunakan sebagai *phytomining* untuk unsur-unsur logam di permukaan. Penerapan tanaman vetiver bukan tanpa kekurangan, terutama untuk konsentrasi limbah yang cukup tinggi, sehingga perlu diuji viabilitas tanaman vetiver di lingkungan perairan untuk pertimbangan perlu dilakukan pengenceran agar di dapat laju pertumbuhan yang optimal dari tanaman vetiver. Dalam penerapan fitoekstraksi logam berat, tanaman vetiver tidak berbanding lurus dengan pertumbuhan tanaman, pada saat tertentu tanaman vetiver berada dalam titik jenuh untuk menyerap logam berat, sehingga perlu dipanen dan diganti dengan bibit tanaman dan biakan yang baru. Permasalahan dapat timbul pada tanaman vetiver yang sudah diangkat dan dikeringkan tidak diberi perlakuan atau

disimpan dengan aman. Hal tersebut berpotensi untuk memindahkan bahan pencemar disuatu tempat ke tempat lain. Tanaman vetiver yang telah dikeringkan kemudian didestruksi disimpan atau dibuang ke tempat yang aman. Dalam penerapannya sebagai *phytomining*, unsur-unsur logam di dalam tanaman dapat diekstrak kembali dan dimurnikan.

PERSANTUNAN

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) yang telah memberi beasiswa *Degree by Research* (DBR) kepada penulis untuk melaksanakan Studi Magister Bioteknologi di Universitas Padjadjaran.

DAFTAR PUSTAKA

- Adigun, M.O., & Are, K.S. (2015). Comparatives Effectiveness of Two *Vetiveria* Grasses Species *Chrysopogon zizanioides* and *Chrysopogon nigritana* for the Remediation of Soils Contaminated with Heavy Metals. *American Journal of Experimental Agriculture*. 8(6): 361-366. DOI: 10.9734/AJEA/2015/13359
- Akpaah Y.S., Nii Moe A.A., & Emmanuel, B. (2015). Purification of industrial wastewater with vetiver grasses (*Vetiveria zizanioides*): the Case of Food and Beverages Wastewater in Ghana. *Asian Journal of Basic and Applied Science*. Vol 2. No. 2. ISSN 2313 – 7797
- Aksorn, E., & Chitsomboon, B. (2013). Bioaccumulation of heavy metal uptake by two different Vetiver grass (*Vetiveria zizanioides* and *Vetiveria nemoralis*) species. *African Journal of Agricultural Research*. Vol. 8(24), pp. 3166-3171.
- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M.A. (2013). Phytoremediation of heavy metals Concepts and applications. *Chemosphere Volume 91, Issue 7, Pages 869-881* <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
- Ajjah, N., Apriyana, A.Y., Sriwuryandari, L., Priantoro, E.A., Janetasari, S.A., Pertiwi, T.Y.R., Suciati, A.M., Ardeniswan, & Sembiring, T. (2020). Beneficiary of nitrifying bacteria for enhancing lettuce (*Lactuca sativa*) and vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides* L.) growths align with carp (*Cyprinus carpio*) cultivation in an aquaponic system. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10468-x>
- Antiti, R., Kirk, R., Barret, Datta, R., & Sarkar, D. (2017). Ethylene Diamine Disuccinic acid (EDDS) enhances *phytoextraction* of lead by vetiver grass from contaminated residential soils in a panel study in the field. *Environmental Pollution* 225.524-533.
- Batol, A., Tawfik, A., & Saleh, B. (2020). Removal of toxic metals from wastewater in Constructed wetlands as a green technology; catalyst role of substrates and chelators. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 189. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109924>
- Bhat, S.A., Bashir, O., Anam, S., Haq, U.L., Amin, T., Rafiq, A., Ali, M., Pin'e Am'érico-Pinheiro, J.H., & Sher, F. (2022). Phytoremediation of heavy metals in soil and water: An eco-friendly, sustainable and multidisciplinary approach. *Chemosphere* 303. 134788
- Borrvalho, T., Gago, D., & Almeida, A. (2020). Study on the Application of Floating Beds of Macrophites (*Vetiveria zizanioides* and *Phragmites australis*), in Pilot Scale, for the Removal of Heavy Metals from Água Forte Stream (Alentejo-Portugal). *Journal of Ecological Engineering Volume 21, Issue 3, pages 153–163*. <https://doi.org/10.12911/22998993/118285>
- Caporale, A.G., Sarkar, D., Datta, R., Punamiya, P., & Violante, A. (2014). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus* spp.) on growth and arsenic uptake of vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides* L.) from contaminated soil and water systems. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 14 (4), 955-972.
- Caracciolo, B.A., & Terenzi, V., (2021). Rhizosphere Microbial Community and Heavy Metals. *Microorganisms*, 9, 1462. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9071462>
- Chaudhary, K., Agarwal, S., & Khan, S. (2018). Role of Phytochelatin (PCs), Metallothioneins (MTs), and Heavy Metal, ATPase (HMA) Genes in Heavy Metal Tolerance. Dalam *Mycoremediation and Environmental Sustainability*. Bab 2. Vol. 2. DOI: 10.1007/978-3-319-77386-5_2
- Chen, K.F., Yeh, T.Y., & Lin, C.F. (2012). Phytoextraction of Cu, Zn, and Pb Enhanced by Chelators with *Vetiver* (*Vetiveria zizanioides*): Hydroponic and Pot. *International Scholarly Research Network*. ISRN Ecology. Article ID 729693, 12 pages doi:10.5402/2012/729693
- Chuan Ng, C., Boyce, A.N., Abas, M.R., Mahmood, N.Z., & Han, F. (2019). Phytoassessment of Vetiver grass enhanced with EDTA soil amendment grown in single and mixed heavy metal contaminated soil. *Environment Monitoring Assessment* 191:434.
- Da Costa, M. (2019). Studi penurunan kadar logam Kromium (Cr) dalam limbah buatan elektroplating menggunakan metode presipitasi dan adsorpsi. Thesis. Program Magister Teknik Lingkungan Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- DalCorso, G., Martini, F., Fasani, E., Manara, A., Visioli, G., Furini, A. (2021). Enhancement of Zn tolerance and accumulation in plants mediated by the expression of *Saccharomyces cerevisiae* vacuolar transporter ZRC1. *Planta* 253, 117. <https://doi.org/10.1007/s00425-021-03634-z>.
- Danh, L.T., Truong, P., Mammucari, R., Tran, T., & Foster, N. (2009). Vetiver grass, *Vetiveria zizanioides*: a choice plant for Phytoremediation of heavy metals and organic wastes. *International Journal of Phytoremediation*, 11: 8, 664 – 691.
- Dzakwan, M.A., & Ni'am, A.C. (2021). Kajian Jenis Tanaman Rumput Untuk Teknologi Fitoremediasi Tanah

- Tersemar* Logam Berat. Seminar Teknologi Perencanaan, Perancangan, Lingkungan, dan Infrastruktur II FTSP ITATS – Surabaya.
- Ehlers, B.K., Berg, M.P., Staudt, M., Holmstrup, M., Glasius, M., Ellers, J., Tomiolo, P.S., Madsen, R.B., Slotsbo, S., & Josep. (2020). Plant Secondary Compounds in Soil and Their Role in Below ground Species Interactions. *Trends in Ecology & Evolution*, Vol. 35, No. 8. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2020.04.001>
- Effendi, H., Margaretha, J.A., & Krisanti, M. (2018). Reducing ammonia and chromium concentration in batik wastewater by Vetiver (*Chrysopogon zizanioides* L.) grown in floating wetland. *Applied Ecology and Environmental Research* 16(3):2947-2956. DOI: http://dx.doi.org/10.15666/aecer/1603_2947_2956
- Fatimawali, Badaruddin, F., & Yusuf, I. (2011). Isolasi dan Identifikasi Bakteri Resisten Merkuri dari Muara Sungai Sario yang dapat digunakan untuk Detoksifikasi Limbah Merkuri. *Jurnal Ilmiah Sains*. e- ISSN 2540-9840, p-ISSN 1412-3770.
- Frete, C.E., Sutiknowati, L.I., & Falahudin, D. (2019). Isolasi dan identifikasi bakteri toleran logam berat dari sedimen mangrove di Pengudang dan Tanjung Uban, Pulau Bintan, Indonesia. *Oseanologi dan Limnologi di Indonesia*. DOI:10.14203/OLDI.2019.V4I2.244
- Glick, B.R. (2012). Plant Growth-Promoting Bacteria: Mechanisms and Applications. Hindawi Publishing corporation Scientifica Volume 2012, Article ID 963401, 15 pages. <http://dx.doi.org/10.6064/2012/963401>
- Hashemi, S.A., & Tabibian, S. (2018). Application of Mulberry nigra to absorb heavy metal, mercury, from the environment of green space city. *Toxicology Reports* 5. 644–646. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2018.05.006>
- Hao, H., Li, X., Wua, S., & Yang, C. (2020). Sustainable livestock wastewater treatment via phytoremediation: Current status and future perspectives. *Bioresource Technology* 315 123809. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123809>
- Igiri, B.E., Stanley, Okoduwa, I.R., Idoko, G.O., Akabuogu, E.P., Adeyi, A.O., & Ejiogu, I.K. (2018). Toxicity and Bioremediation of Heavy Metals Contaminated Ecosystem from Tannery Wastewater: A Review. *Hindawi Journal of Toxicology*. <https://doi.org/10.1155/2018/2568038>
- Irwan, I., Karina, S., & Kurniawan, B. (2021). Analisis logam mangan (Mn) pada sedimen di kawasan pantai Peunaga Pasie, Aceh Barat. *Jurnal Kelautan dan Perikanan Indonesia*. Vol. 1(2): 48-5. <https://jurnal.usk.ac.id/IKPI/article/view/21336/0>
- Kalangie, D.J.M., Widowati, I., & Suprijanto, J. (2018). Kandungan Seng (Zn) Dalam Air, Sedimen Dan Kerang Darah (*Anadara granosa* L) di Perairan Tambak Lorok Semarang. *Journal of Marine Research* Vol.7, No.1, pp. 49-58. EISSN: 2407-7690. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jmr>
- Kiiskila, J. (2018). The Abiotic Stress Response of Hydroponic Vetiver Grass (*Chrysopogon zizanioides* L.) to Acid Mine Drainage and its Potential for Environmental Remediation", Open Access Dissertation, Michigan Technological University. <https://doi.org/10.37099/mtu.dc.etdr/763>
- Komarawidjaja, W., & Garno, Y.S. (2016). Peran Rumput Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) dalam Fitoremediasi Pencemaran Perairan Sungai. *Jurnal Teknologi Lingkungan* Vol.17, No 1, 7-14.
- Kusin, F.M., Hasan, S.N., Nordin, N.A., Yusuf, M.F., & Ibrahim, Z. (2018). Floating Vetiver Island (FVI) and Implication for Treatment System Design of Polluted Running Water. *Applied Ecology and Environmental Research* 17(1): 497-510
- Largo, K.M.F., Depablos, J.L.R., Sarmiento, E.F.E., & Moreta, N.M.L. (2020). Artificial Floating Island with Vetiver for Treatment of Arsenic Contaminated Water: A Real Scale Study in High Andean Reservoir. *Water* 2020, 12, 3086.
- Lavania, U.C. (2004). Vetiver System Ecotechnology for Water Quality Improvement and Environmental Enhancement. *Current Science* 86(1), 11–14.
- Maharjan, A., & Pradhanang, S. (2017). Potential of Vetiver Grass for Wastewater Treatment. *Environment and Ecology Research* 5(7): 489-494. Doi: 10.13189/eer.2017.050704.
- Ma, Y., Oliviera, R.S., Freitas, H., & Zang, C. (2016). Biochemical and Molecular Mechanisms of Plant-Microbe-Metal Interactions: Relevance for Phytoremediation. *Frontiers in Plant Science*. Volume 7. Article 918. doi: 10.3389/fpls.2016.00918
- Mathew, M., & Sr Rosary, C. (2015). Effectiveness of Vetiver System for the Treatment of Wastewater from an Institutional Kitchen. *International Conference on Emerging Trends in Engineering, Science and Technology (ICETEST)*. *Procedia Technology* 24:203–209.
- Minh, N.T, Yun, S.T., Kwon, J.S., Tra, D.T., & Hung, D.D. (2016). Uptake capacity of metals (Al, Cu, Pb, Sn, Zn) by *Vetiveria zizanioides* in contaminated water from Dong Xam metal production trade village, Thai Binh, Vietnam. *Vietnam Journal of Earth Sciences* Vol.38 (3) 306-316. DOI: 10.15625/0866-7187/38/3/8763
- Mudhiriza, L., Mapanda, F., Mvumi, B.M., & Wuta, M. (2015). Removal of nutrient and heavy metal loads from sewage effluent using vetiver grass, *Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty. *Water SA* Vol. 41 No. 4. <http://dx.doi.org/10.4314/wsa.v41i4.04>
- Murray, M., Taufiq, M., & Supriyanti, E. (2018). Kandungan Logam Berat Besi (Fe) dalam Air, Sedimen Dan Kerang Hijau (*Perna viridis*) Di Perairan Trimulyo, Semarang. *Journal of Marine Research* Vol.7, No.2, pp. 133-140. <https://doi.org/10.14710/jmr.v7i2.25902>.
- Nasution, S.W., Zein, R., Chaidir, Z., & Yerizal, E. (2018). The Destructive effect Cu(II) on Various Organs of Wistar.

- IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1230. 012043. doi:10.1088/1742-6596/1230/1/012043
- Nouet, C., Charlier, J.B., Carnol, M., Bosman, B., Farnir, F., Motte, P., & Hanikenne, M. (2015). Functional analysis of the three HMA4 copies of the metal hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 66, No. 19 pp. 5783–5795.
- Nugroho, A.P., Butar Butar, E.S., Priantoro, E.A., Sriwuryandari, L., Pratiwi, Z.B., & Sembiring, T. (2021). *Phytoremediation* of Electroplating wastewater by vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides* L.). *Scientific Report* 11: 14482.
- Nurfadhilla, N., Nurruhwati, I., Sunardi., & Zahidah. (2020). Tingkat Cemaran Logam Berat Timbal (Pb) pada tutut (*Filopaludina javanica*) di Waduk Cirata, Jawa Barat. *Jurnal Akuatika Indonesia* Vol. 5 No. 2/ ISSN 2528-052X; eISSN 2621-7252. <http://jurnal.unpad.ac.id/akuatika-indonesia/article/view/27268/14284>
- Pande, V., Pandey, S.C., Sati, D., Bhatt, P., & Samant, M. (2022). Microbial Interventions in Bioremediation of Heavy Metal Contaminants in Agroecosystem. *Front. Microbiol.* 13:824084. doi: 10.3389/fmicb.2022.824084
- Panja, S., Sarkar, D., & Datta, R. (2018). Vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*) is capable of removing insensitive high explosives from munition industry wastewater. *Chemosphere* 209.920-927. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.155>
- Patandangan., Syamsidar, A., & Aisyah. (2016). Fitoremediasi tanaman akar wangi (*Vetiver zizanioides* L. Roberty) terhadap tanah tercemar logam Kadmium (Cd) pada lahan TPA Tamangapa Antang Makassar. *Al kimia* Vol 4. No.2.
- Pavlineri, N., Skoulikidis, N.T & Tsihrintzis, V.A. (2017). Constructed Floating Wetlands: A review of research, design, operation and management aspects, and data meta-analysis. *Chemical Engineering Journal*. 308. 1120 - 1132
- Prajapati, M., Van Bruggen, J.A., Dalu, T., & Malla, R. (2017). Assessing the effectiveness of pollutant Removal by macrophytes in a floating wetland for wastewater treatment. *Appl Water Sci* DOI 10.1007/s13201-017-0625-2
- Priantoro, E.A., Sriwuryandari, L., Butar Butar, E.S., & Sembiring, T. (2022). Vetiver (*Chrysopogon zizanioides* L. Roberty) plant growth in modified floating net cage system. *Earth and Environmental Science*. DOI 10.1088/1755-1315/1017/1/012021
- Purwaningrum, Y., & Kusbiantoro, D. (2021). Beberapa teknologi remediasi logam berat dalam air minum dan sistem pengolahan air limbah: Sebuah Telaah Pustaka. *AGRILAND Jurnal Ilmu Pertanian* 9(3) 193-208. DOI : [10.30743/agr.v9i3.5035](https://doi.org/10.30743/agr.v9i3.5035)
- Pusparinda, L., & Santoso, R.I.B. (2016). Studi Literatur Perencanaan Floating Treatment Wetland di Indonesia. *Jurnal Teknik ITS* vol. 5, no. 2, ISSN: 2337-3539 (2301-9271 print).
- Puspasari, R. (2006). Logam dan ekosistem perairan. *BAWAL* Vol 1. No.2. 43-47.
- Rabelo, F.H.S., Vangronsveld, J., Baker, A.J.M., van der Ent A., & Alleoni, L.R.F. (2021). Are Grasses Really Useful for the Phytoremediation of Potentially Toxic Trace Elements? A Review. *Frontiers in Plant Science*. doi: 10.3389/fpls.2021.778275
- Rahayu, D.R., & Mangkoediharjo, S. (2022). Kajian Bioaugmentasi untuk Menurunkan Konsentrasi Logam Berat di Wilayah Perairan Menggunakan Bakteri (Studi Kasus: Pencemaran Merkuri di Sungai Krueng Sabee. Aceh Jaya). *Jurnal Teknik ITS*. Vol 11 No.1. DOI: [10.12962/j23373539.v11i1.82791](https://doi.org/10.12962/j23373539.v11i1.82791)
- Rekab, K., Lepeytre, C., Goettman, F., Dunand, M., Guillard, C., & Herrmann, J.M. (2014). Degradation of a cobalt(II)-EDTA complex by photocatalysis and H₂O₂/UV-C. Application to nuclear wastes containing ⁶⁰Co. *J Radioanal Nucl Chem*. DOI 10.1007/s10967-014-3311-y
- Rosahada, A.D., Budiyo, B., & Dewanti, N.A.Y. (2018). Biokonsentrasi logam berat tembaga (Cu) dan pola konsumsi ikan mujair di wilayah danau Rawapening. *Jurnal Kesehatan Masyarakat (e-journal)* volume 6, nomor 6, (ISSN: 2356-3346). DOI: <https://doi.org/10.14710/jkm.v6i6.22150>.
- Sari, N.K., Muhibudin, A., & Syib'li M.A., (2019). Aplikasi metode cawan nutrisi menggunakan kombinasi jarak pagar dan lamtoro gung untuk meningkatkan pertumbuhan kedelai dalam kondisi endemis *Sclerotium rolfsii* dan stress mangan (Mn). *Jurnal HPT Volume 7 Nomor 1* ISSN : 2338 -4336.
- Satriawan, E.B., Widowati, I., & Supriyanto, J. (2021). Pencemaran Logam Berat Kadmium (Cd) dalam Kerang Darah (*Anadara granosa*) yang didaratkan di Tambak Lorok Semarang. *Journal of Marine Research* Vol 10, No.3 Agustus 2021, pp. 437-445 DOI: 10.14710/jmr.v10i3.30155 EISSN: 2407-7690.
- Suelle, A.L. (2015). Phytoremediation potential of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) for water contaminated with selected heavy metal. Thesis. Department of Environmental Science. Faculty of Environmental Studies Universiti Putra Malaysia.
- Tambunan, J.A.M., Effendi, H., & Krisanti, M. (2017). Phytoremediating Batik Wastewater Using Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*, (L). *Pol. J. Environ. Stud.* Vol. 27, No. 3, 1281-1288. DOI: 10.15244/pjoes/76728
- Tangahu, B.V., Abdullah, S.R.S, Basri, H., Idris, M., Anuar, N., & Mukhlisin, M. (2011). A Review on Heavy Metals (As, Pb, and Hg) Uptake by Plants through Phytoremediation. *International journal of Chemical Engineering*. Article ID 939161, doi:10.1155/2011/939161
- Verbruggen, N., Hermans, C., & Schat, H. (2009). Molecular mechanisms of metal hyperaccumulation in plants. *New Phytologist* 181: 759–776 doi: 10.1111/j.1469-

8137.2008.02748.x

Wang, H., Zhang, H., & Cai, Q. (2011). An Application of Phytoremediation to River Pollution Remediation. 3rd International Conference on Environmental Science and Information Application Technology (ESIAT) doi: 10.1016/j.proenv.2011.09.298

Worku, A., Tefera, N., Kloos, H., & Benor, S. (2018). Bioremediation of brewery wastewater using hydroponics planted with vetiver grass in Addis Ababa,

Ethiopia. *Bioresour. Bioprocess.* 5:39.
<https://doi.org/10.1186/s40643-018-0225-5>

Wu, S., Peng, S., Zhang, X., Wu, D., Luo, W., Zhang, T., Zhou, S., Yang, G., Wan, H., & Wu, L. (2011). Levels and health risk assessments of heavy metals in urban soils in Dongguan, China. *Journal of Geochemical Exploration* **Volume 148**, Pages 71-78.