



Agen Biologis Potensial untuk Bioremediasi Logam Berat

Potential Biological Agents for Heavy Metal Bioremediation

Bima Syifa Aznur^{1*}, Siti Khoirun Nisa², Wahyu Adi Septriono³

¹⁾Progam Studi Magister Sumber Daya Akuatik,
Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto

* Corresponding author: bima.aznur@mhs.unsoed.ac.id

Diterima: 8 Desember 2022 Disetujui: 22 Desember 2022

ABSTRAK

Logam berat merupakan senyawa yang memiliki toksisitas yang tinggi dan dapat menyebabkan permasalahan kesehatan serius bagi manusia dan menjadi ancaman serius bagi keberlangsungan ekosistem. Sumber logam berat berasal dari aktivitas antropogenik dan bencana alam. Bakteri, fungi, alga, dan tanaman air merupakan agen biologis yang memiliki kemampuan dalam proses bioremediasi logam berat dilingkungan. Kemampuan hidup agen bioremediasi dipengaruhi oleh faktor lingkungan yang seperti suhu, pH, DO, nutrient, dan factor lainnya. Dalam mengurangi pencemaran logam berat, agen bioremediasi mempunyai mekanisme ekstraseluler dan intraseluler. Mekanisme tersebut terjadi dalam beberapa proses yaitu biofiltrasi, bioakumulasi, biodegradasi, bioekstraksi, biostimulasi, biostabilisasi, biomineralisasi, biosorpsi, biovolatilization, dan biotransformasi. Bioremediasi logam berat oleh agen biologis berkaitan dengan komposisi struktur anatomi luar dan anatomi dalam misalnya pada dinding sel yang memiliki banyak ikatan silang polisakarida (kitin, kitosan, glukukan), asam glukuronat, galaktosamin, sedikit glikoprotein, bersama dengan melanin dan polimer fenolik yang mengandung satuan fenolik, peptida, asam lemak, yang menyediakan cukup banyak gugus yang mengandung oksigen seperti karboksil, karbonil, amino, hidroksil, fosfat, metoksi dan merkaptto yang berpotensi situs pengikatan logam.

Kata Kunci: Alga, Bakteri, Bioremediasi, Fungi, Logam Berat, Tanaman.

ABSTRACT

Heavy metals are compounds that have high toxicity and can cause serious health problems for humans and become a serious threat to the sustainability of ecosystems. Sources of heavy metals come from anthropogenic activities and natural disasters. Bacteria, fungi, algae and aquatic plants are biological agents that have the ability to bioremediate heavy metals in the environment. The viability of bioremediation agents is influenced by environmental factors such as temperature, pH, DO, nutrients, and other factors. In reducing heavy metal pollution, bioremediation agents have extracellular and intracellular mechanisms. This mechanism occurs in several processes, namely biofiltration, bioaccumulation, biodegradation, bioextraction, biostimulation, biostabilization, biomineralization, biosorption, biovolatilization, and biotransformation. Bioremediation of heavy metals by biological agents is related to the composition of the external and internal anatomical structures, for example in the cell wall which has many cross-linked polysaccharides (chitin, chitosan, glucan), glucuronic acid, galactosamine, a small amount of glycoprotein, together with melanin and phenolic polymers containing units phenolics, peptides, fatty acids, which provide a sufficient number of oxygen-containing groups such as carboxyl, carbonyl, amino, hydroxyl, phosphate, methoxy and mercapto which are potential metal binding sites.

Keywords: Algae, Bacteria, Bioremediation, Fungi, Heavy Metals, Plants

Jurnal Maiyah Vol 1(4) 2022:186-198

Pendahuluan

Logam berat atau biasa dikenal dengan istilah Heavy metals (HMs) memiliki densitas $> 5 \text{ g cm}^{-3}$ (Saleh dan Aglan, 2018). Logam berat merupakan zat kimia pencemar yang memiliki efek merugikan pada lingkungan di seluruh dunia jika dalam jumlah yang berlebihan (Groffen *et al.*, 2021). Logam berat pada jenis dan jumlah tertentu sangat dibutuhkan organisme untuk kelangsungan hidupnya, misalnya pada jenis logam seperti Kalsium (Ca), Natrium (Na), Magnesium (Mg), Kalium (K), Tembaga (Cu), Besi (Fe), Seng (Zn), dan Kromium (Cr) (Fahad *et al.* 2016). Beberapa logam berat seperti Kadmium (Cd), Merkuri (Hg), Nikel (Ni), Arsenik (As) dan Timbal (Pb) dalam konsentrasi berapapun menyebabkan efek yang merusak pada kelangsungan hidup organisme, efek dari HMs itu seperti dampak ekologis, nutrisi, genetic dan evolusi (De Buyck *et al.* 2021). suatu studi memperkirakan 80% badan air yang tercemar oleh limbah dan tidak dikelola dengan baik dilepaskan ke ekosistem perairan (tawar, payau, dan laut) yang digunakan untuk keperluan rumah tangga, kegiatan akuakultur dan lainnya akan menyebabkan sekitar 60% dari populasi global mengalami gangguan dalam pemenuhan kebutuhan akan air pada tahun 2025 (Ali *et al.* 2019).

Berdasarkan sumbernya logam berat bisa mencapai lingkungan perairan melalui beberapa proses yaitu letusan gunung berapi dan aktivitas antropogenik seperti pembuangan limbah padat dan cair industri (Wei dan Yang, 2009). Logam berat dianggap sebagai salah satu pencemar air yang paling beracun karena memiliki sifat yang sangat sukar terdegradasi dan terakumulasi di dasar perairan bahkan terakumulasi dalam tubuh organisme melalui rantai makanan (S. Khalid *et al.* 2018). Dari hal tersebut pemerintah memberlakukan peraturan dan perundang-undangan untuk membatasi

penggunaan dan pembuangan logam beracun di lingkungan.

Kasus degradasi lingkungan ini meningkatkan permintaan untuk merancang strategi remediasi. Teknik tradisional dan modern digunakan untuk menghilangkan logam berat yang ada dalam air limbah. Teknik tradisional termasuk pertukaran ion, perlakuan elektrokimia, osmosis, evaporasi, dan presipitasi membantu input energi yang lebih banyak sehingga Teknik ini lebih mahal. Selanjutnya, sebagian besar metode ini menimbulkan tantangan terhadap penghapusan berkelanjutan logam dari lingkungan (Nguyen *et al.* 2020) (Priyadarshani *et al.* 2012). Untuk mengatasinya, digunakan Teknik modern seperti metode biologis yang lebih ekonomis dan pendekatan yang berkelanjutan untuk menghilangkan logam berat (Kumar *et al.* 2022). Dalam waktu yang sama, metode modern lebih mudah diterapkan.

Bioremediasi oleh bakteri atau biasa dikenal dengan mikrobioremediasi merupakan salah satu bentuk dalam mengatasi permasalahan logam berat di perairan. Bakteri dikenal sebagai agen bioremediasi karena memiliki sifat degradasi melalui proses enzimatik. Biosorpsi dan bioakumulasi merupakan mekanisme bakteri dalam mengatasi logam berat di perairan.

Fungi merupakan salah satu agen bioremediasi yang digunakan dalam permasalahan cemaran logam berat. fungi menggunakan mekanisme detoksifikasi secara ekstraseluler dan intraseluler. Mekanisme ekstraseluler terjadi proses chelation, presipitasi, dan pengikatan pada dinding sel. Sedangkan mekanisme intraseluler terjadi proses pengikatan senyawa sulfur, asam organik, peptide, polifosfat dan transfer ke dalam kompartemen sel.

Istilah fikoremediasi mengacu pada remediasi polutan air menggunakan alga. Metode ini merupakan teknik potensial untuk solusi logam berat, karena alga memiliki persediaan yang berlimpah, murah, dan memiliki

kapasitas penyisihan logam yang sangat baik, ramah lingkungan dan menghasilkan produk yang bernilai tambah. Alga secara umum diklasifikasikan menjadi 2 jenis yaitu makroalga dan mikroalga. Makroalga terdiri dari 3 jenis: hijau, coklat, dan merah sedangkan mikroalga diklasifikasikan menjadi 4 jenis utama yaitu diatom, ganggang hijau, ganggang emas dan ganggang hijau-biru (Redha, 2020). Proses pengurangan polutan logam berat menggunakan fikoremediasi melalui beberapa mekanisme yaitu biosorpsi, bioakumulasi, dan detoksifikasi. Dalam biosorpsi, penyerapan logam berat pada permukaan biomassa terjadi 2 jenis yaitu absorbs (hidup) atau adsorbs (tidak hidup) tergantung dari mediator penyerap (Ugya *et al.* 2021). Dalam bioakumulasi, logam berat diangkut di dalam sel alga. Dalam detoksifikasi, berbagai phycochelators dilepaskan oleh alga dalam membantu transformasi logam berat beracun menjadi senyawa tidak beracun (Kikuchi dan Tanaka, 2012).

Bioremediasi menggunakan tanaman atau biasa dikenal sebagai Fitoremediasi adalah teknologi untuk memperbaiki lahan atau wilayah tercemar dengan menggunakan tanaman salah satunya lahan yang tercemar logam berat (Mangkoedihardjo *et al.* 2008). Proses bioremediasi menggunakan tanaman terjadi melalui mekanisme fitoekstraksi, fitostabilisasi, rhizofiltrasi, dan fitovolatilisasi selama penyerapan atau akumulasi logam berat dalam tanaman (Rahman *et al.* 2011; Sarwar *et al.* 2017).

Berdasarkan penjelasan tersebut, maka disusunlah studi literatur terhadap diversitas agen bioremediasi potensial terhadap cemaran logam. Selain itu dikaji mekanisme agen bioremediasi dalam mengatasi permasalahan cemaran logam berat. Studi pustaka ini diharapkan dapat memberikan informasi dan uraian terkait bioremediasi dalam mengatasi pencemaran logam berat di lingkungan perairan.

Isi

Konsep Bioremediasi

Bioremediasi adalah proses biologis dekontaminasi polutan di lingkungan yang tercemar dimana mikroorganisme distimulasi untuk secara cepat mendegradasi polutan organik berbahaya ke tingkat yang aman bagi lingkungan. (Goltapeh *et al.* 2013). Bioremediasi adalah metode unik untuk membersihkan lingkungan yang tercemar dari atmosfer (emisi industri dan gas buang tanah), padatan (tanah, sedimen, dan juga lumpur), cairan (air tanah, limbah industri). Proses bioremediasi melibatkan biotransformasi dan biodegradasi dengan mengubah kontaminan menjadi bahan kimia yang tidak berbahaya atau kurang berbahaya. Biodegradasi adalah penguraian bahan organik atau bioakumulasi dan biotransformasi senyawa anorganik menjadi senyawa yang ramah lingkungan (Kulshreshtha *et al.* 2014).

Prinsip dasar bioremediasi melibatkan pengurangan kelarutan kontaminan lingkungan dengan mengubah pH, reaksi redoks dan adsorpsi kontaminan dari lingkungan tercemar (Jain dan Arnepalli, 2016). Dalam proses bioremediasi, ada dua teknik dasar yang digunakan untuk menghilangkan polutan dari tanah dan air adalah (i) bioremediasi in situ dan (ii) bioremediasi ex situ. Bioremediasi in-situ adalah bioremediasi dengan pengolahan tanah dan air tercemar di tempat aslinya. Bioremediasi ex-situ adalah diperlukan penggalian area terkontaminasi untuk pengolahan di tempat lain dengan aktivitas mikroba dan parameter lainnya dapat dikendalikan (Kushwaha dan Kashyap, 2021). Bioremediasi merupakan salah satu cara untuk menghilangkan polutan dari alam dengan hemat biaya dan ramah lingkungan. Teknologi ini dapat diterapkan dalam penghilangan senyawa xenobiotik dari industri agrokimia dan petrokimia, tumpahan minyak, logam berat dalam limbah,

lumpur dan sedimen laut (Vyas dan Waoo, 2020).

Agen Bioremediasi

Bioremediasi dapat memanfaatkan agen biologis yaitu bakteri, fungi, alga, dan tumbuhan tingkat tinggi baik itu tumbuhan air maupun tumbuhan darat dalam menghilangkan atau mengurangi polutan berbahaya dan mengembalikan ekosistem ke kondisi semula (Ayangbenro, 2017). Agen bioremediasi yang digunakan, tergantung pada sifat kimia dari zat pencemar, dan harus dipilih dengan hati-hati karena hanya bertahan dalam batas kontaminan kimia yang ditentukan.

Bioremediasi oleh Bakteri

Bakteri dikenal sebagai agen bioremediasi melalui fungsi degradasi yaitu menurunkan, memecahkan, serta menguraikan rangkaian kompleks menjadi lebih sederhana menggunakan proses aktivitas enzimatik (Kulshreshtha *et al.* 2014). Proses tersebut terjadi melalui katabolik suatu polutan yang dikatalisis oleh enzim untuk degradasi atau mineralisasi suatu polutan (Verma dan Kuila, 2019). Bakteri mengurai senyawa organik polutan logam berat dengan cara menangkap/mengambil (biosorpsi) senyawa tersebut ke dalam sel dan memanfaatkan enzim intraseluler (Rompas, 2010). Bakteri menjadi fokus kegiatan dalam pengembangan bioremediasi karena bakteri dapat mentolerir kondisi lingkungan dari adanya senyawa ekstremozimnya yang mampu berfungsi tanpa terdenaturasi (Qazilbash, 2004). Ekstremozim dari bakteri halofilik memiliki karakteristik unik seperti stabilitas terhadap berbagai suhu, pH, pelarut organik, dan kekuatan ion yang tinggi (Kaushik *et al.* 2021). Sifat adaptif merupakan faktor utama dalam penentuan kandidat bakteri sebagai agen bioremediasi. Sifat adaptif atau resisten bakteri tersebut menjadi landasan untuk melanjutkan eksplorasi kegiatan bioremediasi terhadap toksisitas logam. Perubahan morfologi,

mekanisme transpor aktif, sintesis metallothionein, produksi siderofor, produksi zat ekso-polimer, dan biotransformasi logam beracun menjadi penentu dalam kegiatan remediasi logam oleh bakteri (Mathivanan *et al.* 2021).

Bakteri mampu mengikat logam berat melalui mekanisme mikropresipitasi atau pertukaran proton dengan bantuan dari zat polimer ekstraseluler (biosorpsi) (Chai *et al.* 2009). Permukaan biomassa memiliki muatan negatif karena gugus amino, fosfor, karboksil, dan sulfida sebagai tempat pengikatan ion antara bakteri dengan logam (Naja *et al.* 2010). Muatan negatif umumnya terdapat pada gugus fungsi anionik pada bakteri gram positif dan gram negatif membawa kemampuan pengikatan logam pada dinding sel (Pachaiappan *et al.* 2021). Setelah logam tersorpsi kemudian terjadi proses bioakumulasi melalui proses kompleksasi, dimana proses ini terlibat dengan pH (basa) (Naja *et al.* 2010). Masuknya logam di dalam sel bakteri dengan penyerapan logam non-metabolik melalui jalur pembawa yang sama yang terlibat untuk logam metabolik esensial. Mekanismenya berupa, pengikatan ion logam ke radikal reaktif di permukaan luar dinding sel bakteri (proses kompleksasi). Kemudian, logam berdifusi ke dalam sitoplasma sel, melalui proses yang bergantung pada energi/independen. Jalur untuk pengangkutan ion metabolik seperti natrium (Na), kalium (K), magnesium, dan logam esensial lainnya merupakan jalur untuk pengangkutan logam berat non esensial melalui membran sel mikroba untuk akumulasi intraseluler dan proses degradasi (Sag dan Kutsal, 2001).

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk menunjukkan peran bakteri dalam bioremediasi logam berat. Berdasarkan penelitian Alotaibi *et al.* 2021; Heidari dan Panico, 2020 menyatakan jenis bakteri *B. subtilis*, *B. megaterium*, *Bacillus* Q3 dan Q5 mampu Detoksifikasi Cu, Cd, Zn, Hg dan Cr melalui biosorpsi. Penelitian Jalilvand *et*

al. 2020 menyebutkan jenis bakteri *Sporosarcina pasteurii*, *Stenotrofomonas rhizophila*, dan *Variovorax boronicumulans* mampu mempresipitasi logam Zn, Pb, dan Cd melalui proses reduksi enzimatis urease. Penelitian Rahayu dan Mangkoedihardjo (2022), penerapan bioremediasi menggunakan bakteri (*Pseudomonas putida*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Citrobacter freundii*) melalui Teknik bioaugmentasi mampu menurunkan konsentrasi logam berat Hg (merkuri) di sungai krueng sabee.

Bioremediasi oleh Fungi

Fungi merupakan agen biologi yang potensial untuk dikembangkan dalam bioremediasi logam berat. Senyawa metabolit fungi berbeda dan unik bila dibandingkan dengan agen bioremediasi lainnya karena kemampuan toleransi fungi untuk beradaptasi dan berkembang di lingkungan sangat baik, misalnya pada suhu tinggi dan pH rendah (Li *et al.* 2020; Singh *et al.* 2020). Secara umum, fungi menggunakan dua teknik utama detoksifikasi logam: yang pertama adalah biosorpsi, yang mencakup pengikatan logam ke permukaan, dan yang kedua adalah bioakumulasi, yang melibatkan pengambilan logam secara intraseluler melalui metabolisme seluler (Ayangbenro dan Babalola, 2017). Remediasi dapat terhambat oleh konsentrasi logam berat atau polusi organik yang tidak tepat dan kondisi reaksi yang tidak menguntungkan. Strain yang berbeda, kontaminan, dan keadaan reaksi tampaknya memiliki dampak yang signifikan pada hasil remediasi (Chen *et al.* 2022).

Proses biosorpsi terjadi pada dinding sel fungi, dimana fungi memiliki banyak ikatan silang polisakarida (kitin, kitosan, glukukan), asam glukuronat, galaktosamin, glikoprotein, melanin dan polimer fenolik (monomer fenolik, peptide, asam lemak) yang menyediakan cukup banyak gugus yang mengandung oksigen seperti karboksil, karbonil, amino, hidroksil, fosfat,

metoksi dan merkupto yang memiliki potensi situs pengikatan logam (Lubis, 2019). Biosorpsi logam berat terjadi akibat gaya Van Der Waals elektrostatis antara partikel logam terlarut yang bermuatan positif dengan permukaan sel fungi yang bermuatan negatif (Sahmoune dan Louhab, 2010). Muatan negatif pada permukaan sel jamur disebabkan oleh adanya fosfat dan gugus karboksil. Sedangkan gugus amina yang ada dalam kitosan bermuatan positif, keduanya dapat terlibat dalam gaya elektrostatis ion. Biopolimer seperti kitin dan glukukan dapat mengikat logam (Harms *et al.* 2011). Melalui proses biosorpsi fungi dapat mendekontaminasi ion logam serapan energi, presipitasi ekstraseluler dan intraseluler, konversi valensi, pada beberapa fungi logam terakumulasi pada miselium dan sporanya. Bagian luar dinding jamur berperan seperti ligan yang digunakan untuk mengikat ion logam dan mengeliminasi metal anorganik (Bahafid *et al.* 2015). Peptidoglikan, polisakarida, dan lipid adalah komponen dari dinding sel yang kaya akan ligan pengikat logam (misalnya OH^- , COOH^- , HPO_4^{2-} , SO_4^{2-} , RCOO^- , R_2OSO_3^- , NH_2^- , dan SH^-). Gugus fungsional amina dapat meningkatkan penyerapan logam secara aktif, karena berikatan dengan spesies logam anionik melalui interaksi elektrostatis dan logam kationik pada kompleksasi permukaan (Igiri *et al.* 2018). Bioakumulasi pada fungi biasa disebut dengan mekanisme intraseluler, mekanisme ini terjadi melalui pompa efluks, transformasi enzimatis, produksi protein metallothionein dan fitokelatin, kompleksasi dengan glutathione intraseluler, dan kompartementalisasi vakuola (Lotlikar, 2019).

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk menunjukkan peran fungi dalam bioremediasi logam berat. Pada penelitian Khoury *et al.* (2022) dan Yin *et al.* (2022) menyatakan pada jamur pelapuk putih menggunakan enzim sitokrom peroksidase, mangan peroksidase (MnP), lignin peroksidase

(LiP), lipase, dan lakase (LAC) untuk mendegradasi dan mereduksi logam berat. Hal tersebut sependapat dengan penelitian Syed *et al.* 2014 menyatakan pada jenis jamur *phanerochaete chrysosporium* mampu mendegradasi kromium (Cr) melalui proses enzimatis menggunakan enzim CYP dan ekhidoreduktase, dimana enzim tersebut melakukan aktivitas oksidasi melalui sintesis dan metabolisme berbagai senyawa dan bahan kimia di dalam sel, oksidasi tersebut menghasilkan energi. Jenis fungi yang mampu mendegradasi logam berat yaitu *Rhizopus oryzae*, *Aspergillus* sp. (versikolor, terreus, niger, dan fumigatus), *Penicillium chrysogenum* dan *Gloeophyllum sepiarium* (Hota *et al.* 2021). Srivastava dan Thakur (2006) juga melaporkan efisiensi *Aspergillus* sp. digunakan untuk menghilangkan kromium dalam air limbah.

Bioremediasi oleh Alga

Remediasi polutan menggunakan alga dikenal dengan istilah Fikoremediasi. Alga umumnya diklasifikasikan menjadi dua jenis yaitu, makroalga dan mikroalga. Makroalga terdiri dari tiga jenis: coklat, merah dan hijau sedangkan mikroalga sebagian besar diklasifikasikan menjadi empat jenis utama yaitu diatom, ganggang hijau, emas dan biru-hijau (Redha, 2020). Fikoremediasi merupakan teknik potensial untuk pengurangan logam berat karena alga tersedia melimpah, murah, ramah lingkungan dan menghasilkan produk bernilai tambah. Alga memiliki berbagai karakteristik sebagai kandidat yang sangat baik untuk remediasi logam berat, karena memiliki toleransi tinggi terhadap logam berat, kemampuan untuk tumbuh baik secara autotrofik maupun heterotrofik, rasio luas permukaan/volume yang besar, fototaksi, fitokelatin ekspresi, dan berpotensi untuk manipulasi genetik (Cai *et al.* 1995). Kemampuan alga dalam mengurangi polutan melalui proses enzimatis dan metabolisme. Alga juga dimanfaatkan untuk biomonitoring

eutrofikasi, polutan organik dan anorganik pada lingkungan (Chekroun dan Baghour, 2013).

Alga memanfaatkan logam berat sebagai sumber nutrisi. Logam berat seperti Mn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Mo^{2+} , Fe^{2+} , dan Zn^{2+} , sangat penting untuk pertumbuhan alga sebagai mikronutrien (Jais *et al.* 2017). Logam ini membantu pertumbuhan sel alga karena sangat penting untuk metabolisme sel. Beberapa alga telah menunjukkan toleransi dan kelangsungan hidup yang luar biasa dalam air yang tercemar dengan konsentrasi logam berat yang relatif tinggi (Kotrba, 2011). Faktor abiotik mempengaruhi remediasi logam berat oleh alga antara lain: pH, kekuatan ionik, suhu, fitohormon, waktu kontak terhadap logam (Salama *et al.* 2019). Mekanisme remediasi logam berat oleh alga terdiri dari dua tahap yaitu biosorpsi dan bioakumulasi. Tahap pertama, logam berat diadsorpsi pada permukaan sel (biosorpsi). Pada tahapan ini alga bertindak sebagai biosorben potensial karena adanya gugus fungsi yang berbeda pada permukaan sel. Biosorpsi alga melibatkan dua mekanisme. Pertukaran ion logam dengan ion kalsium, magnesium, natrium atau kalium yang ada di permukaan sel alga atau dapat membentuk kompleks dengan gugus fungsi yang ada di permukaan sel (Shamim, 2018). Pada tahap kedua, logam berat diangkut melintasi membran sel ke sitoplasma atau organel lainnya. Ini membantu dalam akumulasi logam berat di dalam sel alga dan proses ini dikenal sebagai bioakumulasi. Bioakumulasi merupakan proses aktif sehingga membutuhkan energi untuk akumulasi polutan di dalam sel. Proses ini melibatkan proses metabolisme untuk remediasi sehingga hanya dapat dilakukan oleh biomassa hidup. Proses ini juga dikenal sebagai akumulasi aktif intraseluler lambat karena merupakan proses yang lambat dan membutuhkan energi untuk akumulasi logam berat di dalam sel mikroalga (Rezvani *et al.* 2018). Alga memiliki kemampuan dalam

meremediasi beberapa macam logam berat diantaranya : Arsenik, Boron, Kadmium, Kromium, Kobalt, Tembaga, Besi, Mangan, Raksa, Nikel, dan Seng (Chugh *et al.* 2022).

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk menunjukkan peran alga dalam bioremediasi logam berat. Makroalga memiliki kemampuan untuk mengumpulkan logam di dalam jaringannya sehingga dijadikan sebagai bioindikator keberadaan logam dalam perairan (Chekroun dan Baghour, 2013). Seperti Cyanophyta dan Chlorophyta adalah hiperakumulator Arsenik dan Boron. Alga ini efisien dalam menurunkan As dan Pb pada perairan. Ganggang coklat (Phaeophyta) adalah akumulator logam yang sangat efisien karena tingginya tingkat polisakarida sulfat dan alginat di dalam dinding selnya dimana logam menunjukkan afinitas yang kuat (Davis *et al.* 2003). Ganggang coklat seperti *Focus spp.* sering mendominasi vegetasi habitat yang terkontaminasi logam berat (Nielsen *et al.* 2005). Henriques *et al.* (2019) juga melaporkan biosorpsi dan bioakumulasi Arsenik sebesar 48% pada *Ulva lactuca* dengan waktu remediasi 12 jam. Mikroalga juga memiliki kemampuan dalam remediasi logam berat. Seperti mendetoksifikasi arsenik dengan mengubah bentuk anorganik menjadi bentuk organik. Seperti yang dilaporkan oleh Duncan *et al.* (2015), Arsenik diremediasi oleh Chlorophytes (*Chlorella salina*, *Ostreococcus tauri*, *Dunaliella salina*, *Polyphysapeniculus*, *Dunaliella tertiolecta*); Heterokontophytes (*Heterosigma akashiwo*, *P. tri cornutum*, *S. costatum*, *Thalassiosira pseudonana*). Remediasi kromium juga dilakukan oleh berbagai alga seperti *Cladophora*, *Spirogyra*, *Chlorella vulgaris*, *Nostoc linckia*, *Euglena*, *Ceramium virgatum* dan *Spirulina sp.* Diamati bahwa *Chlorella* dapat memulihkan hingga 97% kromium dalam 28 hari (Chugh *et al.*, 2022).

Bioremediasi dengan Tanaman Air

Teknologi untuk memperbaiki lahan atau wilayah tercemar dengan menggunakan tanaman disebut juga dengan istilah Fikoremediasi (Mangkoedihardjo *et al.* 2008). Tanaman yang dapat digunakan untuk remediasi logam berat salah satunya adalah tanaman air. Tanaman air merupakan komponen ekosistem perairan yang sangat penting untuk produktivitas primer, siklus nutrisi, menyediakan perlindungan, habitat dan makanan untuk beberapa organisme akuatik (Prasad *et al.* 2001; Aksorn dan Visoottiviseth, 2004; Prasad *et al.* 2005). Fitoremediasi akuatik melibatkan penggunaan tanaman untuk menghilangkan kontaminan pada perairan. Tanaman yang umumnya digunakan untuk fitoremediasi dari genus *Cyperaceae*, *Potamogetonaceae*, *Ranunculaceae*, *Typhaceae*, *Haloragaceae*, *Hydrocharitaceae*, *Najadaceae*, *Juncaceae*, *Pontederiaceae*, *Zosterophyllaceae*, *Lemnaceae*, sebagian besar adalah tanaman air (Prasad, 2006). Tanaman ini bersifat muncul (akarnya melekat pada substrat di dasar badan air yaitu ketika daun tumbuh sampai atau di atas permukaan air), terendam (sistem perakarannya melekat pada substrat tetapi daunnya tidak mencapai permukaan air), atau mengambang bebas (yaitu secara eksklusif ditemukan di permukaan badan air, biasanya ditemukan di perairan (USDA, 2018). Logam berat pada jenis dan konsentrasi tertentu sangat dibutuhkan untuk kelangsungan hidup tanaman air. Namun, ketika konsentrasi menjadi berlebihan, tanaman tersebut mungkin berisiko keracunan logam berat baik secara langsung maupun tidak langsung (Sneller *et al.* 2000; Sooksawat *et al.* 2013).

Tanaman air sangat penting dalam sistem pengolahan air limbah karena dapat digunakan untuk fitoremediasi melalui teknik fitoekstraksi,

fitostabilisasi, rhizofiltrasi, dan fitovolatilisasi selama penyerapan atau akumulasi logam berat dalam tanaman (Rahman *et al.* 2011; Sarwar *et al.* 2017). Fitoekstraksi adalah penyerapan logam berat oleh akar tanaman dan kemudian dipindahkan ke bagian tanaman yang lain seperti batang, dan lainnya. Setelah fitoekstraksi dilakukan, tanaman dapat dipanen dan dibakar untuk memulihkan/mendaur ulang logam jika diperlukan (Erakhrumen, 2017; Chandra *et al.* 2018). Fitoekstraksi adalah teknik fitoremediasi yang cocok untuk remediasi logam berat dari air limbah, sedimen dan tanah (Ali *et al.* 2013; Kocon dan Jurga, 2017). Fitostabilisasi adalah kompleksasi dan/atau penghancuran kontaminan. Remediasi tanah, lumpur, dan sedimen dapat dilakukan secara efektif dengan teknik fitostabilisasi (Cundy *et al.* 2013; Najeeb *et al.* 2017). Rhizofiltrasi adalah penggunaan tanaman untuk menyerap kontaminan, sehingga membatasi pergerakan kontaminan ini di air bawah tanah (Abhilash *et al.* 2009; Benavides *et al.* 2018). Akar memiliki peran yang sangat penting dalam rizofiltrasi. Faktor seperti perubahan pH di rizosfer dan eksudat akar membantu pengendapan logam berat pada permukaan akar. Setelah tanaman menyerap semua kontaminan, tanaman dapat dengan mudah dipanen dan dibuang (Zhu *et al.* 1999). Tanaman untuk rizofiltrasi harus memiliki kemampuan sistem perakaran yang tersebar luas, mengakumulasi konsentrasi logam berat yang tinggi, mudah ditangani dan memiliki biaya perawatan yang rendah (Raskin dan Ensley, 2000; Kushwaha *et al.* 2018). Fitovolatilisasi adalah proses di mana tanaman mengubah polutan menjadi sifat volatil yang berbeda dan kemudian melepaskannya ke lingkungan sekitar dengan bantuan stomata tanaman (Leguizamo *et al.* 2017; Ghosh dan Singh, 2005). Spesies tumbuhan seperti kanola dan sawi India berguna untuk fitovolatilisasi selenium. Merkuri dan selenium adalah kontaminan yang dapat diremediasi dalam fitovolatilisasi

(Karami dan Shamsuddin, 2010). Tanaman air memiliki keunggulan dibandingkan tanaman lain dalam remediasi logam berat (Bravo *et al.* 2017; Galal *et al.* 2018; Daud *et al.* 2018). Ketersediaan yang melimpah, tingkat pertumbuhan yang cepat, biomassa yang tinggi, efektivitas biaya dan toleransi terhadap polutan beracun. Sistem remediasi menggunakan tanaman air ini mendapat perhatian lebih di seluruh dunia karena kapasitasnya untuk mengakumulasi dan menghilangkan polutan organik yang persisten dari perairan (Bravo *et al.* 2017; Leguizamo *et al.* 2017).

Tanaman yang digunakan dalam fitoremediasi logam berat harus memiliki karakteristik sebagai berikut: laju pertumbuhan cepat, hasil biomassa yang tinggi, penyerapan logam berat dalam jumlah besar, kemampuan untuk mengangkut logam di bagian tanaman di atas tanah, dan mekanisme untuk mentolerir toksisitas logam. Faktor lain seperti pH, radiasi matahari, ketersediaan nutrisi dan salinitas sangat mempengaruhi potensi fitoremediasi dan pertumbuhan tanaman (Ali *et al.* 2020). Kontaminan dapat diremediasi oleh teknologi fitoremediasi seperti insektisida, pelarut terklorinasi, hidrokarbon aromatik polisiklik (PAH), bifenil poliklorinasi (PCB), hidrokarbon minyak bumi, radio nukleosida, surfaktan, logam berat (Leguizamo *et al.* 2017; Hussain *et al.* 2018). Tanaman yang dapat digunakan untuk remediasi logam berat salah satunya adalah tanaman air. Tanaman yang paling umum digunakan meliputi; duckweed (*L. minor*), eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) dan selada air (*P. stratiotes*), karena sifatnya yang ada di mana-mana, mekanisme invasif, kapasitas reproduksi sporadis, potensi bioakumulasi dan ketahanan di lingkungan yang tercemar (Abraham *et al.* 2019). Penelitian yang telah dilakukan menunjukkan keberhasilan tanaman air dalam remediasi logam berat. Tanaman air seperti *Salvinia molesta* mampu remediasi Pb (85%), Hg

(74%) waktu retensi selama 10 hari (Kumari *et al.* 2017), *Egeria densa* mampu remediasi Zn (20 mg/L); Akumulasi Ni (10 mg/L), Pb (15 mg/L), Zn (20 mg/L) waktu retensi selama 7 hari (Harguinteguy *et al.* 2015). Abeywardhana *et al.* (2017) melaporkan penghilangan logam berat tanaman *Salvinia molesta* Cr, Cu, Fe, Ni dan Pb masing-masing adalah 81,66%, 69,81%, 65,2%, 66,39% dan 74,85%. Dari hasil tersebut menunjukkan bahwa tanaman *S. molesta* efisien dalam mengurangi polutan air limbah sebelum dibuang ke badan air dengan waktu retensi 24 jam. Tabinda *et al.* (2019) membandingkan potensi remediasi dari *Pistia stratiotes*, *Eichhornia crassipes* dan alga (*Oedogonium sp.*) dalam air limbah tekstil yang diperkaya dengan COD, BOD, zat warna, dan logam berat (Cd, Cu, Fe, dan Pb) selama 7 hari. Akumulasi Pb dan Fe yang tinggi pada *P. stratiotes* dibandingkan tanaman gulma *E. crassipes*. Oleh karena itu, dari hasil studi penelitian dan hasil yang disebutkan di atas, tumbuhan air adalah salah satu agen remediasi air limbah dengan toleransi yang baik.

Kesimpulan

Berdasarkan uraian yang dijelaskan pada isi informasi dapat diperoleh kesimpulan bahwa; 1) pencemaran logam berat dalam konsentrasi melebihi ambang batas di perairan sangat berdampak negative organisme, metode untuk mengurangi cemaran logam berat yang ekonomis, efisien, dan berkelanjutan adalah menggunakan teknik bioremediasi. 2) agen pendegradasi yang digunakan dalam proses bioremediasi cemaran logam berat adalah bakteri, fungi, alga, dan tanaman air dengan memperhatikan factor yang mempengaruhi proses bioremediasi khususnya pada mekanisme agen bioremediator. 3) hasil studi literatur cemaran logam berat menyatakan bahwa metode remediasi menggunakan agen bioremediasi baik itu bakteri, fungi, alga, dan tanaman air merupakan alternatif yang sesuai

dengan konsep ekonomis, efisien dan berkelanjutan untuk menurunkan konsentrasi logam berat di perairan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada Dr. Nuning Vita Hidayati, S.Pi., M.Si. selaku pengampu mata kuliah Bioremediasi Akuatik pada Program Magister Sumberdaya Akuatik, FPIK UNSOED

DAFTAR PUSTAKA

- Abeywardhana, M.L.D.D., Bandara, N.J.G.J. and Rupasinghe, S. K. L. S. (2017) 'Proceedings of the 22', Session III – Waste Management and Pollution Control. Proceedings of the 22nd International Forestry and Environment Symposium 2017 of the Department of Forestry and Environmental Science, University of Sri Jayewardenepura, Sri Lanka 45, (233).
- Abhilash, P.; Jamil, S.; Singh, N. Transgenic plants for enhanced biodegradation and phytoremediation of organic xenobiotics. *Biotechnol. Adv.* 2009, 27, 474–488.
- Ali Redha, Removal of heavy metals from aqueous media by biosorption, *Arab J. Basic Appl. Sci.* 27 (1) (2020) 183–193.
- Ali, H.; Khan, E.; Sajad, M.A. Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere* 2013, 91, 869–881.
- Ayangbenro, A.S.; Babalola, O.O. A new strategy for heavy metal polluted environments: A review of microbial biosorbents. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2017, 14, 94.
- B. Henriques, A. Teixeira, P. Figueira, A.T. Reis, J. Almeida,

- C. Vale, E. Pereira, Simultaneous removal of trace elements from contaminated waters by living *Ulva lactuca*, *Sci. Total Environ.* 652 (2019) 880–888.
- Benavides, L.C.L.; Pinilla, L.A.C.; Serrezuela, R.R.; Serrezuela, W.F.R. Extraction in Laboratory of Heavy Metals Through Rhizofiltration using the Plant Zea Mays (maize). *Int. J. Appl. Environ. Sci.* 2018, 13, 9–26.
- Bravo, S.; Amorós, J.; Pérez-de-los-Reyes, C.; García, F.; Moreno, M.; Sánchez-Ormeño, M.; Higuera, P. Influence of the soil pH in the uptake and bioaccumulation of heavy metals (Fe, Zn, Cu, Pb and Mn) and other elements (Ca, K, Al, Sr and Ba) in vine leaves, Castilla-La Mancha (Spain). *J. Geochem. Explor.* 2017, 174, 79–83.
- Cai, X. H., Logan, T., Gustafson, T., Traina, S., Sayre, R. T., *Molecular Marine Biology and Biotechnology.* 4 (1995) 338.
- Chandra, R.; Kumar, V.; Tripathi, S.; Sharma, P. Heavy metal phytoextraction potential of native weeds and grasses from endocrine-disrupting chemicals rich complex distillery sludge and their histological observations during in-situ phytoremediation. *Ecol. Eng.* 2018, 111, 143–156.
- Choudhary, M., Kumar, R., Datta, A., Nehra, V. and Garg, N. (2017) Bioremediation of Heavy Metals by Microbes. In: Arora S., Singh A., Singh Y. (eds) *Bioremediation of Salt Affected Soils: An Indian Perspective.* Springer, Cham. pp 233–255. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48257-6_12.
- Cundy, A.B.; Bardos, R.; Church, A.; Puschenreiter, M.; Friesl-Hanl, W.; Müller, I.; Vangronsveld, J. Developing principles of sustainability and stakeholder engagement for “gentle” remediation approaches: The European context. *J. Environ. Manag.* 2013, 129, 283–291. [CrossRef]
- Daud, M.; Ali, S.; Abbas, Z.; Zaheer, I.E.; Riaz, M.A.; Malik, A.; Zhu, S.J. Potential of Duckweed (*Lemna minor*) for the Phytoremediation of Landfill Leachate. *J. Chem.* 2018, 1–9.
- Davis, T. A., Volesky, B., Mucci, A., *Water Research.* 37 (2003) 4311.
- Dewan Kelautan Indonesia, 2010. E. Aksorn, P. Visootviseth, Selection of Suitable Emergent Plants for Removal of Arsenic from Arsenic Contaminated Water, *Sci. Asia*, 30 (2004) 105–113.
- E.G. Duncan, W.A. Maher, S.D. Foster, Contribution of arsenic species in unicellular algae to the cycling of arsenic in marine ecosystems, *Environ. Sci. Technol.* 49 (1) (2015) 33–50, doi: 10.1021/es504074z .
- Erakhrumen, A.A. Phytoremediation: An environmentally sound technology for pollution prevention, control and remediation in developing countries. *Educ. Res. Rev.* 2017, 2, 151–156.
- F. Rezvani, M.H. Sarrafzadeh, S.H. Seo, H.M. Oh, Optimal strategies for bioremediation of nitrate-contaminated groundwater and microalgae biomass production, *Environ.*

- Sci. Pollut. Res. 25 (27) (2018) 27471–27482, doi: 10.1007/s11356-
- F.E.C. Sneller, L.M. van Heerwaarden, H. Schat, Toxicity, metal uptake, and accumulation of phytochelatins in silene vulgaris exposed to mixtures of cadmium and arsenate, Environ.Toxicol. Chem., 19 (2000) 2982-2986.
- Galal, T.M.; Eid, E.M.; Dakhil, M.A.; Hassan, L.M. Bioaccumulation and rhizofiltration potential of Pistia stratiotes L. for mitigating water pollution in the Egyptian wetlands. Int. J. Phytoremediat. 2018, 20, 440–447.
- Ghosh, M.; Singh, S. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of it's by products. Asian J. Energy Environ. 2005, 6, 18.
- Goltapeh, EM, Danesh, YR, & Varma, A. (2013). Pengantar Bioremediasi. Dalam Biologi Tanah (Vol. 32, Edisi Januari 2013, hlm. 203–226). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-33811-3>
- Hatzinger, PB, Whittier, MC, Arkins, MD, Bryan, CW, & Guarini, W.Harguinteguy CA, Pignata ML, Fernández-cirelli A. Nickel, lead and zinc accumulation and performance in relation to their use in phytoremediation of macrophytes Myriophyllum aquaticum and Egeria densa. Ecol Eng. Elsevier B.V. 2015;82:512–6. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.05.039>
- Hussain, F.; Hussain, I.; Khan, A.H.A.; Muhammad, Y.S.; Iqbal, M.; Soja, G.; Yousaf, S. Combined application of biochar, compost, and bacterial consortia with Italian ryegrass enhanced phytoremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil. Environ. Exp. Bot. 2018, 153, 80–88. [CrossRef]
- Jain, S.; Arnepalli, D. Biomineralisation as a remediation technique: A critical review. In Proceedings of the Indian Geotechnical Conference (IGC2016), Chennai, India, 15–17 December 2016.
- Jais NM, Mohamed R, Al-Gheethi A, Hashim MA (2017) The dual roles of phycoremediation of wet market wastewater for nutrients and heavy metals removal and microalgae biomass production. Clean Technol Environ Policy 19:37–52.
- Karami, A.; Shamsuddin, Z.H. Phytoremediation of heavy metals with several efficiency enhancer methods. Afr. J. Biotechnol. 2010, 9, 3689–3698.
- Kocón, A.; Jurga, B. The evaluation of growth and phytoextraction potential of Miscanthus x giganteus and Sida hermaphrodita on soil contaminated simultaneously with Cd, Cu, Ni, Pb, and Zn. Environ. Sci. Pollut. Res. 2017, 24, 4990–5000.
- Kotrba P (2011) Microbial biosorption of metals—general introduction. In: Kotrba P, Mackova M, Macek T (eds) Microbial biosorption of metals. Springer, Dordrecht, pp 1–6.
- Kumari S, Kumar B, Sheel R. 'Biological control of Heavy metal pollutants in water by.

- Salvinia molesta' 2017;6(4):2838–43.
- Kushwaha, A.; Hans, N.; Kumar, S.; Rani, R. A critical review on speciation, mobilization and toxicity of lead in soil-microbe-plant system and bioremediation strategies. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2018, 147, 1035–1045.
- Leguizamo, M.A.O.; Gómez, W.D.F.; Sarmiento, M.C.G. Native herbaceous plant species with potential use in phytoremediation of heavy metals, spotlight on wetlands—A review. *Chemosphere* 2017, 168, 1230–1247.
- Leguizamo, M.A.O.; Gómez, W.D.F.; Sarmiento, M.C.G. Native herbaceous plant species with potential use in phytoremediation of heavy metals, spotlight on wetlands—A review. *Chemosphere* 2017, 168, 1230–1247.
- Leguizamo, M.A.O.; Gómez, W.D.F.; Sarmiento, M.C.G. Native herbaceous plant species with potential use in phytoremediation of heavy metals, spotlight on wetlands—A review. *Chemosphere* 2017, 168, 1230–1247. [CrossRef] [PubMed].
- M.N.V Prasad, *Aquatic Plants for Phytotechnology*, (2006) 259-274.
- M.N.V. Prasad, M. Greger, P. Aravind, Biogeochemical cycling of trace elements by aquatic and wetland plants: relevance to phytoremediation. In: Prasad MNV, Sajwan KS, Naidu R (eds), *Trace elements in the environment: Biogeochemistry, Biotechnology and Bioremediation*. CRC Press, Florida, USA, Taylor and Francis, Chap 24, 443- 474 (2005).
- Mangkoedihardjo, S dan Ganjar Samudro. 2010. *Fitoteknologi Terapan*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- N. Sooksawat, M. Meetam, M. Kruatrachue, P. Pokethitiyook, K. Nathalang, Phytoremediation potential of charophytes: bioaccumulation and toxicity studies of cadmium, lead and zinc, *J. Environ. Sci.*, 25(3) (2013) 596–604
- Najeeb, U.; Ahmad, W.; Zia, M.H.; Zaffar, M.; Zhou, W. Enhancing the lead phytostabilization in wetland plant *Juncus effusus* L. through somaclonal manipulation and EDTA enrichment. *Arab. J. Chem.* 2017, 10, 3310–3317.
- Nielsen, H. D., Burridge, T. R., Brownlee, C., Brown, M. T., *Mar Pollut Bull.* 50 (2005) 1675.
- O. E. Abraham, F.D. Sikoki, E. O. Nwachukwu, Application of common duckweed (*Lemna minor*) in phytoremediation of chemicals in the environment: state and future perspective, *Chemosphere* 223 (2019) 285-309.
- Qazilbash, A. A. (2004). Isolation and characterization of heavy metal tolerant biota from industrially polluted soils and their role in bioremediation [Doctoral dissertation]. Quaid-i-Azam University Islamabad.
- R. M. Rompas, *Toksikologi Kelautan*, 1st ed. Jakarta: Sekretariat.
- Rahman, M.A.; Hasegawa, H. *Aquatic arsenic*:

- Phytoremediation using floating macrophytes. *Chemosphere* 2011, 83, 633–646.
- Raskin, I., Smith, R. D. and Salt D. E. (1997). Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment. *Current Opinion in Biotechnology*, 8(2), 221–226.
- Raskin, I.; Ensley, B.D. *Phytoremediation of Toxic Metals*; John Wiley and Sons: Hoboken, NJ, USA, 2000.
- S. Shamim, *Biosorption of Heavy Metals*, Biosorption, IntechOpen, 2018, doi: 10.5772/intechopen.72099.
- Sarwar, N.; Imran, M.; Shaheen, M.R.; Ishaque, W.; Kamran, M.A.; Matloob, A.; Hussain, S. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives. *Chemosphere* 2017, 171, 710–721.
- Tabinda AB et al. 'Treatment of textile effluents with *Pistia stratiotes*, *Eichhornia crassipes* and *Oedogonium* sp', *International Journal of Phytoremediation*. Taylor Francis 2019;21(10):939–43.
- Tiwari, S., Singh, S. N., & Garg, S. K. (2013). Microbially enhanced phytoextraction of heavy-metal fly-ash amended soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44(21), 3161–3176.
- USDA, The PLANTS Database, National Plant Data Team, NRCS, United States Department of Agriculture, Greensboro, NC 27401-4901 USA, (2018). <http://plants.usda.gov>
- Vyas, C. and Wao, A. A. (2020). Prognostication of bioremediation requisite around industrially contaminated environment– A Review. *Current Biotechnology*, 9, 3-14. <https://doi.org/10.2174/2211550109666200305092457>
- Zhu, Y.; Zayed, A.; Qian, J.; De Souza, M.; Terry, N. Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: II. Water hyacinth. *J. Environ. Qual.* 1999, 28, 339–344.