

METALLOTIONEIN PADA TANAMAN AKUATIK DAN PERANANNYA DALAM AKUMULASI LOGAM BERAT: REVIEW

METALLOTHIONEIN ON AQUATIC PLANT AND ITS ROLE IN HEAVY METAL ACCUMULATION: REVIEW

Rega Permana, Aulia Andhikawati

Program Studi Perikanan K Pangandaran, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Padjadjaran
Korespondensi: rega.permana@unpad.ac.id

ABSTRACT

Heavy metals are compounds that can pollute waters and are toxic. Heavy metal pollution in the aquatic environment can be caused by industrial and agricultural activities. In Indonesia, heavy metals such as cadmium are reported to be one of the main pollutants in agricultural land in the Pantura area, West Java. Concentrations of heavy metals that are above the predetermined quality standard have the potential to endanger public health because of the nature of heavy metals that can accumulate or are known as bioaccumulation and biomagnification. One way to overcome this problem is to use plant bioaccumulators. Metallothionein (MT) gene is known to play an important role in heavy metal chelation. MT is a protein with a high cysteine residue which is known to have a function in metal detoxification in both animals and plants. This paper will review the role of MT protein in aquatic plants in heavy metal accumulation and its relation to solutions in dealing with heavy metal pollution in waters. The explanation of heavy metals and bioaccumulator plants along with the mechanism for chelating heavy metals through MT will be discussed comprehensively.

Keywords: Aquatic Plants, Bioaccumulators, Heavy Metals, Metallothionein

ABSTRAK

Logam berat merupakan senyawa yang dapat mencemari perairan dan bersifat toksik. Pencemaran logam berat di lingkungan perairan dapat disebabkan oleh kegiatan industri maupun agrikultur. Di Indonesia, logam berat seperti kadmium dilaporkan menjadi salah satu pencemar utama di lahan pertanian daerah Pantura, Jawa Barat. Konsentrasi logam berat yang berada di atas batas baku mutu yang telah ditetapkan berpotensi untuk membahayakan kesehatan masyarakat karena sifat logam berat yang dapat terakumulasi atau dikenal dengan bioakumulasi dan biomagnifikasi. Salah satu cara untuk mengatasi masalah ini adalah dengan menggunakan tanaman bioakumulator. Gen Metallothionein (MT) diketahui berperan penting dalam pengkelatan logam berat. MT merupakan protein dengan residu sistein tinggi yang diketahui memiliki fungsi dalam detoksifikasi logam baik pada hewan maupun tumbuhan. Tulisan ini akan mengulas mengenai peranan protein MT pada tanaman akuatik dalam akumulasi logam berat beserta kaitannya dengan solusi dalam menangani pencemaran logam berat di perairan. Penjelasan mengenai logam berat dan tanaman bioakumulator beserta dengan mekanisme pengkelatan logam berat melalui MT akan dibahas secara komprehensif.

Keywords: Bioakumulator, Logam Berat, Metallothionein, Tanaman Akuatik

PENDAHULUAN

Pencemaran lingkungan telah menjadi masalah serius yang dapat mempengaruhi seluruh aspek kehidupan seperti sosial, ekonomi, dan ekologi (Coren dan Peter, 2015). Salah satu substansi pencemar lingkungan adalah logam berat yang banyak digunakan dalam kegiatan industri seperti bahan bangunan, bahan bakar, dan pertambangan (Tchounwou, et. al. 2014; Järup & Akesson 2009). Pencemaran logam berat menjadi masalah serius, karena logam berat bersifat toksik dan tidak dapat didegradasi sehingga dapat mencemari udara, air, dan tanah (Bharti, 2013; Mohammed, Kapri, dan Goel, 2011). Salah satu sumber pencemaran logam berat adalah aktivitas manusia seperti pertambangan, industri, endapan atmosfer, agrikultur, dan pembuangan limbah. Pabrik ataupun industri yang membuang limbah langsung ke perairan tanpa diolah terlebih dahulu menyebabkan bahan kimia yang terkandung pada limbah tersebut dapat mencemari lingkungan, termasuk logam berat.

Beberapa logam berat yang dapat menjadi pencemar adalah seng (Zn), kobalt (Co), kromium (Cr), silica (Si), kadmium (Cd), tembaga (Cu), timbal (Pb), arsenik (As), dan merkuri (Hg) (Mohammed, Kapri, dan Goel, 2011). Adapun urutan toksisitas beberapa logam pada organisme perairan adalah $Hg^{2+} > Cd^{2+} > Ag^+ > Ni^{2+} > Pb^{2+} > As^{2+} > Cr^{2+} > Sn^{2+} > Zn^{2+}$ (Ferdian *et al.*, 2020). Logam berat memberikan efek berbahaya pada organisme akuatik dalam banyak cara yang memengaruhi sifat-sifat banyak molekul biologis, seperti memblokir dan mengurangi situs tiol pada protein. Selain itu, kadmium dapat diakumulasi melalui rantai makanan, yang dapat menjadi ancaman serius bagi kesehatan manusia (Suratno, et. al., 2015). Logam berat dapat mengendap di dasar perairan dan memiliki waktu tinggal (residence time) hingga ribuan tahun. (Rangkuti, 2009). bioakumulasi dan biomagnifikasi dengan beberapa cara, yaitu melalui kulit, saluran pernapasan, dan saluran makanan (Rochyatun & Rozak, 2007).

Salah satu cara yang dapat digunakan untuk mengurangi pencemaran lingkungan karena pengaruh logam berat yaitu dengan menggunakan tanaman akuatik yang bersifat bioakumulator. Teknik ini dikenal dengan nama fitoremediasi. Tanaman bioakumulator dalam teknik fitoremediasi ini merupakan tanaman yang mampu tumbuh di lingkungan yang tercemar logam berat serta mampu menyerap dan menyimpan logam berat tersebut di dalam jaringan tubuhnya tanpa menunjukkan gejala fitotoksitas (Hidayati, 2005; Nazir, et. al. 2011). Dengan demikian, tanaman bioakumulator ini dapat menjadi indikator lingkungan, pencegah (*excluder*) logam berat, dan akumulator logam berat (Temmerman dan Hoenig, 2004; Hossain, et. al. 2011; Leitenmaier dan Küpper, 2013). Salah satu mekanisme tanaman bioakumulator mengkelat logam berat, yaitu melalui protein metallothionein (Bothe, 2012). Penelitian Leitenmaier dan Küpper (2013) mengenai kompartemensi logam pada tanaman hiperakumulator menunjukkan metallothionein mampu mengkelat logam berat dan mendetoksifikasi logam berat.

Metallothionein adalah polipeptida yang berfungsi dalam homeostasis ion logam dan mendetoksifikasi kelebihan logam melalui gugus tiol (Hijova, 2004; Huang dan Wang 2010). Gen MT terdapat pada seluruh makhluk hidup kecuali arkaea dan dibagi menjadi empat kelompok (MT 1, MT 2, MT 3, dan MT 4) berdasarkan susunan residu sistein (cys) (Capdevila dan Atrian 2011; Cobbett dan Goldsbrugh, 2002). Gen MT dapat terekspresi oleh berbagai faktor, salah satunya logam berat (Huang dan Wang, 2010). Penelitian Abdelmigid, et. al. (2014) menunjukkan metallothionein dapat menjadi biomarker tanaman rapa (*Brassica napus*) untuk merespon stres abiotik seperti logam berat. Hal tersebut didukung oleh penelitian Li, et. al. (2016) yang menunjukkan gen MT dapat terekspresi ketika terpapar larutan kadmium 100 mM. Tetapi kedua penelitian tersebut belum melihat tingkat ekspresi gen MT pada akar dan tunas tanaman.

Pemanfaatan tanaman bioakumulator sebagai agen fitoremediasi dalam penanganan pencemaran lingkungan perairan masih dalam proses pengembangan agar lebih optimal. Kendala – kendala seperti efisiensi penyerapan, keterbatasan lahan serta pengelolaan lanjutan tanaman yang sudah digunakan

menjadi catatan penting untuk dapat mengaplikasikan teknik fitoremediasi secara berkelanjutan. Pengetahuan akan protein metallothionein yang merupakan kunci dalam penyerapan logam dalam tanaman, dapat membantu pengembangan teknik fitoremediasi melalui pendekatan rekayasa molekuler. Tulisan ini akan secara khusus mengulas mengenai peranan protein metallothionein dalam mekanisme akumulasi logam berat pada tanaman akuatik dalam upaya optimalisasi penanganan pencemaran perairan dengan metode fitoremediasi.

Logam Berat

Logam berat merupakan logam dengan densitas umumnya 5 gr/cm^3 atau sekitar lima kali lipat densitas air (Kurniawan & Mustikasari 2019). Biasanya logam berat bersifat toksik dan secara alami dapat ditemukan pada batuan dan mineral lainnya, sehingga pencemaran logam berat sering terjadi di lingkungan perairan termasuk pada sedimen serta biota penghuninya (Apriadi, 2005). Terdapat 80 jenis logam berat dari 109 unsur kimia yang ada di bumi. Dari sifatnya logam berat terdapat dua perbedaan yaitu esensial dan non esensial. Logam berat esensial merupakan logam berat yang masih di perlukan atau dibutuhkan oleh kehidupan makhluk hidup, sedangkan logam berat noessential merupakan logam berat yang keberadaannya tidak dibutuhkan oleh makhluk hidup khususnya biota laut. Contoh logam berat esensial antara lain ada Zn, Cu, Fe, Co dan Mn. Pada logam berat non esensial adalah logam berat yang memiliki sifat toksik atau beracun. Contoh dari logam berat non esensial adalah Hg, Cd, Pb dan Cr (Happy et al., 2012). Logam berat yang terakumulasi sangat banyak di alam dapat menyebabkan kerusakan lingkungan. Logam berat dapat terakumulasi dalam air, sedimen dan biota. Selain itu logam berat dapat berikatan dengan logam berat lainnya. Beberapa sumber aktivitas manusia yang menghasilkan logam berat dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Logam Berat yang Dihasilkan dari Aktivitas Manusia

No	Aktivitas manusia	Logam berat yang dihasilkan
1	Pertambangan	Pb, Cd, As, Hg
2	Industri	Cd, Cu, Hg, As, Zn, Cr, Co
3	Endapan atmosfer	Cd, Cr, As, Hg, Pb, Cu, U
4	Agrikultur	Pb, Cd, As, Zn, Cu, Si
5	Pembuangan limbah	Cd, Zn, Cr, Pb, Hg, As

Sumber: Mohammed, Kapri, dan Goel, 2011.

Logam berat banyak digunakan pada proses industri sehingga pencemarannya cenderung meningkat saat kegiatan industri juga meningkat. Pencemaran logam berat pada perairan dapat menyebabkan masalah bagi kesehatan baik pada organisme akuatik itu sendiri maupun pada manusia. Ada sekitar 80 unsur logam yang digolongkan dalam jenis logam berat dari 109 unsur kimia yang telah berhasil diidentifikasi di bumi. Paparan logam berat pada manusia dapat menyebabkan gangguan terhadap kesehatan. Hal ini akan bergantung pada dosis paparan dan interaksi antara logam berat itu sendiri dengan tubuh. Logam berat mampu menghalangi situs aktif enzim sehingga mengganggu kerjanya dan akan berdampak pada terganggunya metabolisme tubuh, menyebabkan alergi, bersifat mutagen, teratogen, atau karsinogen bagi manusia maupun organisme lain.

Logam berat bersifat persistent karena tidak bisa didegradasi lebih lanjut (nondegradable) oleh organisme hidup yang ada di lingkungan. Hal ini menyebabkan logam-logam tersebut dapat terakumulasi ke lingkungan, terendapkan ke dasar perairan dan membentuk senyawa yang lebih kompleks bersama

dengan bahan organik dan anorganik yang tersedia. Toksisitas logam berat bisa dikelompokkan menjadi 3, yaitu bersifat toksik tinggi yang terdiri dari unsur-unsur Hg, Cd, Pb, Cu, dan Zn; bersifat toksik sedang, yang terdiri dari unsur-unsur Cr, Ni, dan Co; dan bersifat toksik rendah, yang terdiri atas unsur Mn dan Fe.

Tanaman Bioakumulator

Tanaman bioakumulator merupakan tanaman yang mampu tumbuh di lingkungan tercemar dengan mengakumulasi logam berat dan menyimpannya di jaringan tertentu tanpa menunjukkan gejala fitotoksisitas (Nazir, et. al. 2011; Rascio dan Navari-Izzo, 2010). Tanaman bioakumulator memiliki karakteristik: (i) laju penyerapan unsur hara yang lebih tinggi dari tanaman lainnya; (ii) kemampuan translokasi dan akumulasi yang tinggi pada akar hingga tajuk; (iii) toleransi unsur logam berat dalam konsentrasi yang tinggi pada jaringan akar dan tajuk (Ferdian *et al.*, 2020). Menurut Simbolon dan Purbonegoro (2021), tanaman bioakumulator memiliki konsentrasi logam berat yang lebih besar di tunas dibandingkan dengan akar.

Setiap tanaman memiliki kemampuan menyerap logam berat dalam jumlah yang berbeda. Tanaman bioakumulator kadmium memiliki batas toleran lebih besar 100 µg g⁻¹ dari berat kering (0,01%, w/w) (Permana *et al.*, 2022). Beberapa tanaman yang telah diketahui memiliki sifat bioakumulator dapat ditemukan di Indonesia, seperti daun tempuyung (*Sonchus arvensis* L.), *Ipomoea* sp dan genjer (*Limnocharis flava*) yang mampu menyerap sianida (CN⁻) dan logam berat timbal (Pb), eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) dan lidah mertua (*Sansevieria trifasciata*) yang mampu menyerap logam berat timbal dan logam berat kadmium, serta ekor kucing (*Typha latifolia*) yang mampu menyerap logam berat seng (Zn). Potensi bioakumulator juga ditunjukkan oleh *Justicia americana* yang mampu menyerap logam berat tembaga (Cu), serta *Sansevieria hyacinthoides* yang mampu menyerap logam berat cadmium (Tabel 2).

Tabel 2. Jenis Tanaman Bioakumulator dan Polutan Targetnya

No	Jenis Tanaman	Jenis Polutan	Sumber literatur
1	<i>Sonchus arvensis</i> L.	Sianida (CN ⁻), Timbal (Pb)	
2	<i>Ipomoea</i> sp	Sianida (CN ⁻), Timbal (Pb)	Hidayati, 2005
3	<i>Limnocharis flava</i>	Sianida (CN ⁻)	
4	<i>Eichhornia crassipes</i>	Timbal (Pb), Kadmium (Cd)	Rahayu, Faradilla, dan Verawati, 2014
5	<i>Sansevieria trifasciata</i>	Timbal (Pb)	Haryanti, Budianti, dan Salni, 2013
6	<i>Typha latifolia</i>	Seng (Zn)	
7	<i>Justicia americana</i>	Tembaga (Cu)	Erlania, 2010
8	<i>Sansevieria hyacinthoides</i>	Kadmium (Cd)	Jaswiah, Syariffudin, Novianti, 2016
9	<i>Carpophyllum flexuosum</i>	Timbal (Pb)	Zhang <i>et al.</i> , 2022
10	<i>Gracillaria</i> sp.	Timbal (Pb)	Ihsan <i>et al.</i> , 2015

Menurut Leitenmaier dan Küpper (2013), tanaman bioakumulator memiliki beragam peran, antara lain adalah sebagai berikut:

1. Indikator kehadiran logam berat.
2. Pencegah (*excluder*) yang memiliki sifat toleran logam berat hingga mencapai ambang batas pada tanaman.
3. Akumulator yang mampu menyerap dan mengakumulasi logam berat.

Mekanisme penyerapan logam berat oleh tanaman air dapat berbeda berdasarkan jenis tanaman dan tingkat pencemaran logam pada air. Kemampuan tanaman untuk melakukan akumulasi unsur dari substrat disebut sebagai faktor biokonsentrasi atau *Bioconcentration Factor* (BCF), yang merupakan faktor penentu dalam menilai kemampuan bioakumulasi mereka. Dengan demikian, mereka yang memiliki BCF tinggi disebut sebagai hiperakumulator. Koefisien bioakumulasi adalah perbandingan antara konsentrasi logam dalam jaringan kering tanaman dan media sekitarnya. Koefisien ini dapat bervariasi antara logam yang berbeda dan berkisar dari beberapa ratus untuk jenis logam seperti As dan hingga 10.000 untuk logam kationik seperti Cu dan Pb. Penyerapan logam pada tanaman air juga dipengaruhi oleh berbagai faktor biotik dan abiotik yang meliputi suhu, pH, dan populasi ionik dari sistem air.

Logam pada perairan yang terkontaminasi biasanya terdapat sebagai ion positif, yang kemudian akan berinteraksi dengan situs pengikatan bermuatan negatif pada dinding sel tanaman. Akan terdapat ikatan yang kuat dan tidak dapat dilepaskan dan akan ada pula ikatan yang lebih lemah dan dapat dilepaskan dengan mudah, hal ini bergantung pada afinitas logam ke situs tersebut. Ikatan ini menciptakan gradien konsentrasi yang menyebabkan logam dapat melintasi membrane yang kemudian akan ditransportasi ke dalam sel. Seiring waktu, ketika konsentrasi logam dalam jaringan meningkat, yang mengarah ke titik jenuh, penurunan berikutnya dalam penyerapan efektif terlihat. Hal ini juga dapat terjadi karena efek toksik yang ditimbulkan oleh logam, seperti stres oksidatif, yang dapat disebabkan oleh Cu, Cd, dan Zn. Saat memasuki akar tanaman, ion logam dapat disimpan di akar atau diangkut ke pucuk—kemungkinan besar melalui xilem, dengan beberapa saran bahwa floem juga dapat berkontribusi pada hal ini. Transportasi logam dalam xilem atau floem dapat difasilitasi dengan mengikat asam organik, fitokhelatin, atau metallothionein. Logam berat yang terakumulasi melalui akar di dalam air yang tercemar dapat mengendap di berbagai bagian tanaman air, menimbulkan konsekuensi yang merugikan ketika tanaman digunakan sebagai sumber makanan (Agustina 2014).

Metallothionein

Metallothionein adalah polipeptida yang berfungsi dalam homeostasis ion logam dan detoksifikasi kelebihan logam melalui gugus tiol (Ren, et. al. 2012; Huang dan Wang 2010). Istilah "metallothionein" mulai digunakan pada tahun 1957 untuk pertama kalinya yang merujuk pada protein yang ditemukan di korteks ginjal kuda (sel ginjal) sebagai protein pengikat logam (Thirumoorthy et al., 2011). Selain itu MT berfungsi untuk proteksi melawan stres oksidatif, dan membantu proses fisiologis seperti penuaan tanaman (Schiller, et. al. 2014). MT memiliki karakteristik: (i) berat molekuler rendah (6-7 kDa), (ii) residu sistein sekitar 30%, (iii) tidak memiliki asam amino aromatik (Capdevila dan Atria, 2011; Hijova, 2004). MT dapat ditemukan pada seluruh organisme, kecuali arkaea (Capdevila dan Atria, 2011).

MT pada tanaman banyak ditemukan pada kelompok angiospermae dan dibagi menjadi empat kelompok berdasarkan susunan residu sisteinnya (Cobbett dan Goldsbrugh, 2002). MT 1 memiliki enam motif susunan residu sistein, yaitu Cys-XaaCys pada N dan C terminal, MT 2 mempunyai urutan Cys-Gly-Gly-Cys pada N terminal dan 3 motif Cys-Xaa-Cys pada C terminal. MT 3 memiliki empat Cys pada N terminal dengan susunan tiga residu pertama Cys-Gly-Asn-Cys-Asp-Cys dan residu keempat Gln-Cys-Xaa-Lys-Lys-Gly. MT 4 memiliki tiga wilayah Cys dengan susunan Cys-Xaa-Cys. Perbedaan motif pada

setiap jenis MT berkaitan dengan kemampuan MT mengikat logam dan kestabilan protein (Duncan, et. al. 2006). Menurut Guo, et. al. (2008), MT pada tanaman diekspresikan di jaringan tertentu. MT 1 umumnya diekspresikan di akar dan daun (Zhou dan Goldsbrough, 1995), MT 2 di daun (Huang, et. al. 2012), MT 3 di buah dan MT 4 di biji (Guo, et. al. 2008).

KESIMPULAN DAN SARAN

Pencemaran logam berat akibat aktivitas manusia terutama perkembangan dalam industri menyebabkan tekanan lingkungan semakin tinggi sehingga upaya dalam menanggulangi dampak logam berat pada lingkungan dan kesehatan masyarakat perlu dilakukan. Berdasarkan kajian yang telah dipaparkan dapat diketahui bahwa protein metallothionein pada tanaman akuatik berperan dalam detoksifikasi logam berat di tingkat molekuler. Dengan mengetahui mekanisme penyerapan logam yang dilakukan oleh beberapa tanaman akuatik melalui protein metallothionein ini dapat membukan jalan pada optimalisasi yang dapat dilakukan agar proses fitoremediasi lebih efektif, murah dan dapat berjalan secara berkelanjutan. Penelitian mengenai protein metallothionein dan bagaimana kita dapat memanfaatkannya baik dalam ranah rekayasa molecular maupun sains material masih perlu dikaji lebih lanjut dengan menerapkan pendekatan multidisiplin.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelmigid, H.M., Hassan, A.Z., dan El-rab, S.M.F. 2014. Expression of Metallothionein as a Biomarker in Response to Various Stress Factors in Different Organisms. *International Journal of Advanced Research*, 2(10), 683-695.
- Agustina, T. (2014). Kontaminasi logam berat pada makanan dan dampaknya pada kesehatan. *TEKNOBUGA: Jurnal Teknologi Busana Dan Boga*, 1(1).
- Apriadi, D. (2005). Kandungan Logam Berat Hg, Pb dan Cr Pada Air, Sedimen dan kerang hijau (*perna viridis* L.) di perairan kamal Muara, teluk Jakarta (Doctoral dissertation, Bogor Agricultural University).
- Bharti, P.K. 2013. Impact of Industrial Effluents on Ground Water and Soil Quality in the Vicinity of Industrial area of Panipat City, India. *Journal of Applied and Natural Science*, 5(1), 132-136
- Bothe, H. 2011. "Plant in Heavy Metal Soils.". Dalam: Sherameti I, Varma A, (Eds.), *Detoxification of Heavy Metals, Soil Biology* (35-57). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Capdevila, M., & Atrian, S. 2011. Metallothionein Protein Evolution: A Miniassay. *Journal of Biological Inorganic Chemistry*, 16, 977-989.
- Cobbett, C., dan Goldsbrough, P. 2002. Phytochelatins and Metallothioneins: Roles in Heavy Metal Detoxification and Homeostasis. *Annual Review of Plant Biology*, 53, 159-182.
- Coren, G.A.J., dan Peter, T.A. 2015. Environmental Pollution and Sustainability. *Journal of Research in Environmental Science and Toxicology*, 40(1), 1-9.
- Duncan, K.E.R., Ngu, T.T., Chan, J., Salgado, M.T., Merrifield, M.E., dan Stillman, J.M. 2006. Peptide Folding, Metal Binding Mechanisms, and Binding Site Structure in Metallothioneins. *Society for Experimental Biology and Medicine*, 1488-1499.
- Erlania, 2010. Pengendalian Limbah Budidaya Perikanan melalui Pemanfaatan Tumbuhan Air dengan Sistem *Constructed Wetland*, 5(2).
- Ferdian, F., Hindarti, D., & Permana, R. (2020). Cadmium effects on growth and photosynthetic pigment content of *Chaetoceros gracilis*. *World Scientific News*, 145, 245-255.

- Guo, W.J., Meenam, M., Goldsbrough, P.B. 2008. Examining the Specific Contributions of Individual *Arabidopsis* Metallothioneins to Copper Distribution and Metal Tolerance. *Plant Physiology*, 146(4), 1967-1706.
- Happy, A. R., Masyamsir, Y. Dhahiyat, 2012. Distribusi kandungan logam berat Pb dan Cd pada kolom air dan sedimen daerah aliran Sungai Citarum Hulu. *Perikanan dan Kelautan* 3, pp. 175-182.
- Haryanti, D., Budianti., dan Salni. 2013. Potensi Beberapa Jenis Tanaman Hias sebagai Fitoremediasi Logam Timbal (Pb) dalam Tanah. *Jurnal Penelitian Sains*, 16(2).
- Hidayati, N. 2005. Fitoremediasi dan Potensi Tumbuhan Hiperakumulator. *Hayati*, 12(1), 35-40.
- Hijova, E. 2004. Metallothionein and Zinc: Their Functions and Interactions. *Bratislava Medical Journal*, 105, 230-4.
- Hossain, M.A., Piyatida, P., Teixeira da Silva, J.A., dan Fujita, M. 2011. Molecular Mechanism of HeavyMetal Toxicity and Tolerance in Plants: Central Role of Glutathione in Detoxification of Reactive Oxygen Species andMethylglyoxal and in HeavyMetal Chelation. *Journal of Botany*, 2012, 37
- Huang, G.Y., dan Wang, Y.S. 2010. Expression and Characterization Analysis of Type 2 Metallothionein from Grey Mangrove Species (*Avicennia marina*) in Response to Heavy Metal Stress. *Aquat Toxicol* 99, 86-92.
- Huang, G.Y., Wang, Y.S., Ying, G.G., dan Dang, A.C. 2012. Analysis of Type 2 Metallothionein Gene From Mangrove Species (*Kandelia candel*). *Trees*, 26, 1537-1544.
- Ihsan, Y. N., Aprodita, A., Rustikawati, I., & Priyadi, T. D. K. (2015). Kemampuan Gracilaria sp. sebagai agen bioremediasi dalam menyerap logam berat Pb. *Jurnal Kelautan: Indonesian Journal of Marine Science and Technology*, 8(1), 10-18.
- Järup, L., dan Akesson, A. 2009. Current Status of Cadmium as an Environmental Health Problem. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 238, 201-208.
- Jaswiah., Syarifuddin, S.H., Novianti, I. 2016. Fitoremediasi Logam Kadmium pada Asap Rokok menggunakan Tanaman Lidah Mertua Jenis *Sansevieria hyacinthoides* dan *Sansevieria trifasciata*. *Chimica el Natura*, 4(2), 88-92.
- Kurniawan, A., & Mustikasari, D. (2019). Review: Mekanisme akumulasi logam berat di ekosistem pascatambang timah. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 17(3), 408-415.
- Leitenmaier, B., dan Küpper, H. 2013. Compartmentation and Complexation of Metals in Hyperaccumulator Plants. *Plant Science*, 4.
- Li, L., Meng, Y., Cao, Q., Yang, Y., Wang, F., Jia, H., Wu, S., dan Liu, X. 2016. Type 1 Metallothionein (ZjMT) is Responsible for Heavy Metal Tolerance in *Ziziphus jujuba*. *Biochemistry*, 81(6), 565-573.
- Mohammed, A.S., Kapri, A., dan Goel, R. 2011. Heavy Metal Pollution: Source, Impact, and Remedies. *Enviromental Pollution*, 20
- Nazir, A., Malik, R.N., Ajajib, M., Khan, N., dan Siddiqui, M.F. 2011. Hyperaccumulators of Heavy Metals of Industrial Area of Islamabad and Rawalpindi. *Pakistan Journal of Botany*, 43(3), 1924-1933
- Permana, R., Andhikawati, A., Ferdian, F., & Wahyu, D. (2022). Mekanisme Toksisitas Logam Kadmium Terhadap Fitoplankton. *Marinade*, 5(01), 54-61.
- Rahayu, S.T., Fatadila, M., Verawati, E.Y., dan Triana, M. 2014. Respon Bioakumulator Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes*) terhadap Logam Berat Pb dan Cd di Sungai Pegangsaan Dua. *Pharmaceutical Science Research*, 1(1).
- Rangkuti, A. M. (2009). Analisis Kandungan Logam Berat Hg,Cd, dan Pb Pada Air dan Sedimen di Perairan Pulau Panggang-Pramuka Kepulauan Seribu, Jakarta. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Rascio, N., dan Navari-Izzo, F. 2011. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Science*, 180, 169-181.

- Ren, Y., Liu, Y., Chen, H., Li, G., Zhang, X., dan Zhao, J. 2012. Type 4 Metallothionein Genes are Involved in Regulating Zn Ion Accumulation in Late Embryo and in Controlling Early Seedling Growth in *Arabidopsis*. *Plant, Cell, and Environment*, 35, 770-789
- Rochyatun, E., & Rozak, A. (2007). Pemantauan Kadar Logam Berat dalam Sedimen di Perairan Teluk Jakarta. *Makara, Sains*, Vol. 11, No. 1, 28-36.
- Schiller, M., Hegelund, J.N., Pidas, P., Kichey, T., Laursen, K.H., Husted, S., dan Schjoerring, J.K. 2014. Barley Metallothioneins Differ in Ontogenetic Pattern and Response to Metals. *Plant, Cell, and Environment*, 37, 353-367.
- Simbolon, A. R., & Purbonegoro, T. (2021). Bioakumulasi Merkuri (Hg) pada Lamun *Enhalus acoroides* dan Mangrove *Rhizophora apiculata* di Pulau Pari, Kepulauan Seribu. *OLDI (Oseanologi dan Limnologi di Indonesia)*, 6(3), 137-147.
- Suratno, Puspitasari, R., Purbonegoro, T., & Mansur, D. (2015). Copper and Cadmium Toxicity to Marine Phytoplankton, *Chaetoceros gracilis* and *Isochrysis* sp. *Indones. J. Chem.*, 172-178.
- Tchounwou, P.B., Yedjou, C.G., Patiolla, A.K., dan Sutton. D.J. 2012. Heavy Metals Toxicity and the Environment. *National Institute of Health*, 101, 133-164
- Temmerman, L.D., dan Hoenig, M. 2004. Vegetable Crops for Biomonitoring Lead and Cadmium Deposition. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 49, 121-135.
- Thirumoorthy, N., Shyam Sunder, A., Manisenthil Kumar, K. T., Ganesh, G. N. K., & Chatterjee, M. (2011). A review of metallothionein isoforms and their role in pathophysiology. *World journal of surgical oncology*, 9(1), 1-7.
- Zhang, R., Richardson, J. J., Masters, A. F., & Maschmeyer, T. (2022). Removal of Pb²⁺ from Water Using Sustainable Brown Seaweed Phlorotannins. *Langmuir*.
- Zhou, J., dan Goldsbrough, P.B. 1994. Functional Homologs of Funga1 Metallothionein Genes from *Arabidopsis*. *The Plant Cell*, 6, 875-884.