



Skrining Kemampuan Absorpsi Merkuri pada Makroalga Cokelat *Hormophysa triquetra* dan Makroalga Merah *Gracilaria salicornia* dari Pulau Pari

Screening of Mercury Absorption in Brown Macroalgae *Hormophysa triquetra* and Red Macroalgae *Gracilaria salicornia* from Pari Island

Muhammad Reza Cordova¹ dan Ahmad Muhtadi²

¹Pusat Penelitian Oseanografi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.

²Program Studi Manajemen Sumberdaya Perairan, Fakultas Pertanian, Universitas Sumatera Utara

Email: muhammad.reza.cordova@lipi.go.id

Submitted 10 August 2016. Reviewed 21 August 2017. Accepted 2 December 2017

Abstrak

Makroalga atau rumput laut memiliki daya serap yang baik terhadap semua zat yang ada di lingkungan perairan, termasuk logam berat merkuri (Hg). Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui kandungan merkuri dalam makroalga cokelat *Hormophysa triquetra* dan makroalga merah *Gracilaria salicornia* serta pada sedimen, sehingga dapat diketahui potensi kedua jenis makroalga tersebut sebagai bioakumulator merkuri. Sampel makroalga dan sedimen diambil dari kawasan utara, timur, selatan, dan barat Pulau Pari, Kepulauan Seribu pada bulan April 2016, dianalisis dengan Mercury Analyzer NIC MA-3000. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kandungan merkuri dalam makroalga merah lebih tinggi daripada makroalga cokelat. Kandungan merkuri dalam makroalga dari perairan Pulau Pari berada pada kisaran $21,50 \pm 9,59 \mu\text{g/kg}$ (makroalga cokelat) dan $41,45 \pm 14,00 \mu\text{g/kg}$ (makroalga merah). Kompleksitas gugus fungsi membuat kandungan merkuri lebih tinggi dalam makroalga merah dibandingkan dalam makroalga cokelat. Kemampuan akumulasi merkuri membuat kedua spesies makroalga berpotensi untuk menjadi bioakumulator.

Kata Kunci: skrining, merkuri, makroalga, absorpsi, Pulau Pari

Abstract

Macroalgae or seaweed has good absorptive capacity against all substances present in the aquatic environment, including mercury (Hg). The purpose of this study was to determine mercury content in brown macroalga *Hormophysa triquetra* and red macroalga *Gracilaria salicornia* and also on sediment and then assess the potential of both types of macroalgae as mercury bioaccumulator. Samples of macroalgae and sediment were taken from the northern, eastern, southern, and western regions of Pari Island, Seribu Archipelago in April 2016, analyzed by Mercury Analyzer NIC MA-3000. The results of this study indicated the mercury content in red macroalgae was higher than brown macroalgae. Mercury content in macroalgae from Pari Island waters was in the range of $21.50 \pm 9.59 \mu\text{g/kg}$ (brown macroalga) and $41.45 \pm 14.00 \mu\text{g/kg}$ (macroalgae red). The complexity of the functional groups makes the mercury content higher in the red

macroalgae than in the brown macroalgae. The ability of mercury accumulation makes these macroalgae species potential to become bioaccumulator.

Keywords: screening, mercury, macroalgae, absorption, Pari Islands

Pendahuluan

Kualitas air sangat berperan dalam pertumbuhan makroalga atau rumput laut yang memiliki daya serap yang baik bagi semua zat yang ada di perairan, termasuk logam berat seperti merkuri (Hg). Peningkatan kadar logam berat di perairan tidak terlepas dari peningkatan jumlah industri yang banyak menggunakan logam berat sebagai bahan baku atau bahan tambahan (Khaled et al. 2014). Diaz et al. (2011) dan Akcali & Kucuksezgin (2011) menyebutkan bahwa variasi kandungan logam berat dalam makroalga merupakan gambaran variasi kandungan logam berat di perairan. Penelitian mengenai kandungan logam berat dalam makroalga dilakukan pertama kali pada alga cokelat *Laminaria cloustoni* dan *Laminaria digitata* oleh Black dan Mitchell (1952) yang menyebutkan makroalga dapat digunakan sebagai indikator pencemaran logam berat di perairan karena mampu menyerap zat yang terlarut di perairan. Dalam beberapa dekade terakhir banyak peneliti yang mengungkapkan bahwa makroalga dapat dijadikan sebagai bioakumulator logam berat di perairan, antara lain Foster (1976), Rai et al. (1981), Bryan dan Langston (1992), Rainbow (1995), Rodríguez-Figueroa et al. (2009), Chakraborty et al. (2014), dan Shams El-Din et al. (2014). Namun, penelitian potensi makroalga sebagai bioakumulator logam berat belum banyak dilakukan di Indonesia.

Selain menyerap logam berat, makroalga juga dapat mengikat logam berat dengan adsorpsi. Makroalga dapat digunakan sebagai adsorben karena memiliki afinitas yang besar terhadap kation logam. Hal ini disebabkan sebagian besar permukaan makroalga bermuatan negatif (Chmielewská et al. 2001). Penelitian mengenai biosorpsi sudah banyak dilakukan, seperti oleh Jalali et al. (2002) yang menyelidiki beberapa jenis makroalga yang mampu mengadsorpsi logam Pb. Lee dan Chang (2011) mengkaji biosorpsi logam berat Pb dan Cu menggunakan makroalga *Spirogyra* sp. dan *Cladophora* sp. Aldor et al. (1995) meneliti proses desorpsi logam Cd dalam air menggunakan bioadsorben makroalga cokelat *Sargassum* sp. Oleh karena itu, beberapa peneliti memasukkan makroalga sebagai

bioakumulator yang dapat menjadi bioindikator pencemaran logam berat di perairan (Akcali dan Kucuksezgin 2011). Foster (1976), Rai et al. (1981), Bryan dan Langston (1992) menyebutkan bahwa makroalga mampu mengakumulasi logam berat sampai ribuan kali kandungan logam berat dalam air. Zeraatkar et al. (2016) menambahkan bahwa makroalga merupakan kandidat yang tepat untuk bioremediasi air limbah karena mampu mengakumulasi logam berat dengan baik.

Merkuri merupakan logam berat yang termasuk pencemar global yang sangat berbahaya dan dapat menyebabkan keracunan pada makhluk hidup, terutama pada sistem syaraf (Hyman 2004; Liu et al. 2011). Umumnya, peningkatan kadar merkuri di perairan disebabkan oleh limbah yang masuk akibat kegiatan antropogenik, seperti buangan industri, pertambangan, pertanian, dan limbah domestik (Hyman 2004; Liu et al. 2011). Kajian bioakumulasi dan bioabsorpsi logam berat oleh makroalga belum banyak dilaporkan (Flouty dan Estephane 2012), bahkan kajian yang lebih mendalam mengenai proses tersebut sangat diperlukan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kandungan merkuri dalam makroalga cokelat dan makroalga merah serta sedimen dari Pulau Pari, sehingga dapat diketahui potensi kedua jenis makroalga tersebut sebagai bioakumulator merkuri.

Metodologi

Pengumpulan dan Analisis Sampel

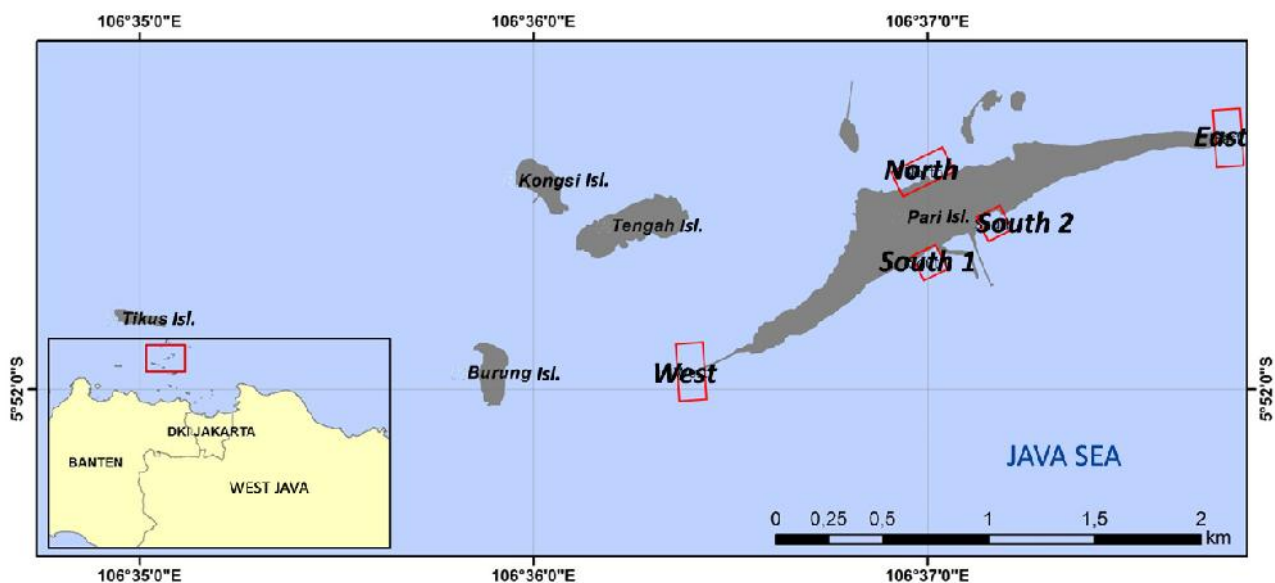
Penelitian ini dilakukan di Pulau Pari, Kepulauan Seribu, DKI Jakarta pada bulan April 2016. Sampel makroalga diambil dari kawasan utara, timur, selatan, dan barat Pulau Pari (Gambar 1). Spesies makroalga yang diambil adalah *Hormophysa triquetra* (makroalga cokelat) dan *Gracilaria salicornia* (makroalga merah). Pengambilan sampel dilakukan dengan koleksi bebas, setiap spesies diambil tiga individu sebagai sampel yang kemudian dibekukan di dalam freezer. Lokasi dan berat sampel makroalga diperlihatkan dalam Tabel 1. Di setiap lokasi, sampel sedimen juga diambil sebanyak 150 ± 10 g dengan menggunakan sendok *stainless steel* dan disimpan dalam plastik kedap udara berukuran 250 ml.

Sampel makroalga dibersihkan dengan menggunakan *double-distilled deionized water* (DDDW), kemudian dikeringkan dengan tisu dapur. Sebanyak 50–100 g berat basah sampel diambil dan diletakkan dalam cawan petri, kemudian dikeringkan di dalam oven pada suhu

60°C selama 24 jam. Demikian pula dilakukan pada sampel sedimen. Setelah pengeringan, sampel dengan berat kering 10–30 mg dihaluskan dan diukur dengan menggunakan Mercury Analyzer NIC MA-3000. Pengukuran dilakukan dengan tiga kali pengulangan.

Tabel 1. Lokasi dan berat sampel makroalga
Table 1. Locations and weight of macroalgae samples

No	Species	Wet Weight (g)	n	Sampling Locations
1	<i>H.triquetra</i>	608.03 ± 49.24	3	North
2	<i>H. triquetra</i>	617.23 ± 55.87	3	East
3	<i>H. triquetra</i>	615.45 ± 34.79	3	South
4	<i>H. triquetra</i>	598.98 ± 63.71	3	West
5	<i>G. salicornia</i>	566.75 ± 59.99	3	North
6	<i>G. salicornia</i>	569.52 ± 48.29	3	East
7	<i>G. salicornia</i>	639.52 ± 63.88	3	South
8	<i>G. salicornia</i>	585.00 ± 47.95	3	West



Gambar 1. Lokasi penelitian.
Figure 1. Research locations.

Analisis Data

Konsentrasi merkuri dalam makroalga digambarkan dengan grafik *boxplot*. *Boxplot* merupakan grafik ringkasan distribusi sampel yang dapat menggambarkan bentuk distribusi, ukuran tendensi sentral, dan ukuran penyebaran data pengamatan (Tongkumchum 2005). Grafik

boxplot menampilkan nilai observasi terkecil (garis horizontal paling bawah), kuartil terendah atau kuartil pertama, median atau nilai pertengahan (ditandai dengan garis tebal horizontal), kuartil tertinggi atau kuartil ketiga, nilai observasi terbesar (garis horizontal paling atas), dan nilai outlier ekstrem dari data

pengamatan (Tongkumchum 2005). Data kemudian diklasifikasikan berdasarkan spesies alga dan area pengambilan sampel. Uji secara statistik untuk membedakan klasifikasi (konsentrasi merkuri antara kedua spesies; serta kandungan merkuri dalam masing-masing spesies makroalga di seluruh lokasi pengambilan sampel) dilakukan dengan uji beda nyata nonparametrik Kruskal-Wallis dan uji lanjut post hoc Mann Whitney-U-Test pada R123K Ward 0.6.5. Uji nonparametrik adalah salah satu uji statistik yang tidak menggunakan asumsi sebaran data pada populasi (Nichols dan Holmes 2007; Sedgwick 2012). Dalam penelitian ini uji awal yang digunakan merupakan uji berbasis peringkat untuk mengetahui perbedaan signifikan antar kelompok variabel dengan uji Kruskal-Wallis. Selanjutnya, dilakukan uji lanjut dengan Mann Whitney-U-Test untuk mengetahui perbedaan media antara dua variabel yang tidak terdistribusi normal (Nichols dan Holmes 2007). Nilai p hitung yang digunakan untuk menunjukkan perbedaan nyata antara variabel adalah $p < 0,05$ (Nichols dan Holmes 2007; Sedgwick 2012).

Hasil

Merkuri dalam Makroalga dan Sedimen

Kandungan merkuri (Tabel 2) dalam makroalga cokelat *Hormophysa triquetra* ditemukan paling tinggi di kawasan timur, yaitu sebesar $23,65 \pm 7,80 \mu\text{g/kg}$ dan paling rendah di kawasan utara, sebesar $20,08 \pm 9,34 \mu\text{g/kg}$. Kandungan merkuri tertinggi dalam makroalga merah *Gracilaria salicornia* ditemukan di kawasan barat sebesar $48,72 \pm 17,54 \mu\text{g/kg}$ dan paling rendah sebesar $32,74 \pm 12,06 \mu\text{g/kg}$ di kawasan utara Pulau Pari.

Gambar 2 memperlihatkan grafik *boxplot* sebaran data tidak normal dari kedua spesies makroalga. Garis horizontal tebal menunjukkan median yang berdekatan dengan rata-rata dari konsentrasi merkuri pada kedua spesies makroalga. Nilai median untuk makroalga cokelat ada pada $21,65 \mu\text{g/kg}$ dan median untuk makroalga merah ada pada $41,73 \mu\text{g/kg}$. Dari Gambar 2, terdapat satu nilai *outlier* konsentrasi merkuri pada makroalga cokelat. Konsentrasi merkuri berdasarkan uji statistik menunjukkan perbedaan nyata antara kedua spesies (Gambar 2).

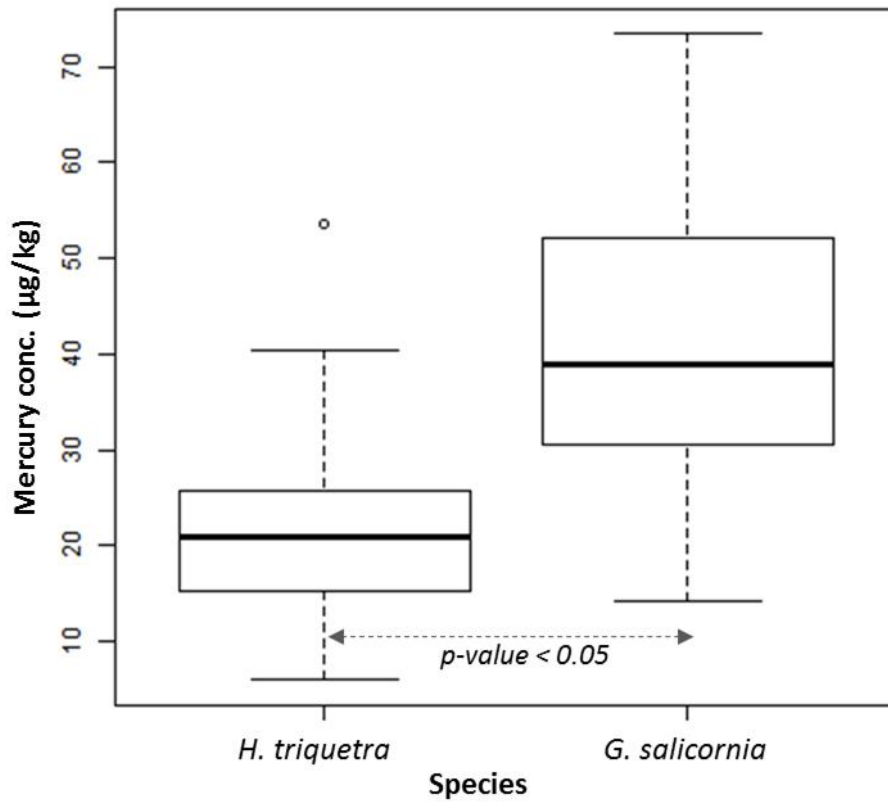
Gambar 3 memperlihatkan grafik *boxplot* yang menunjukkan sebaran data tidak normal dari kedua spesies makroalga dari setiap lokasi pengambilan sampel. Garis horizontal tebal menunjukkan median yang berdekatan dengan rata-rata konsentrasi merkuri dalam kedua spesies makroalga. Dari Gambar 3, terdapat empat nilai *outlier* konsentrasi merkuri, yakni satu nilai *outlier* pada makroalga cokelat yang diambil dari kawasan utara, dua nilai *outlier* pada makroalga cokelat yang diambil dari kawasan timur, dan satu nilai *outlier* pada makroalga merah yang diambil dari kawasan timur. Namun, berdasarkan hasil analisis lebih lanjut yang ditampilkan dalam Gambar 3, tidak ada perbedaan nyata kandungan merkuri dalam masing-masing spesies makroalga di seluruh lokasi pengambilan sampel.

Kandungan merkuri paling tinggi dalam sedimen ditemukan di sebelah barat Pulau Pari ($68,28 \mu\text{g/kg}$) dan terendah di sebelah utara ($34,05 \mu\text{g/kg}$). Konsentrasi merkuri dalam sedimen berturut-turut dari yang paling tinggi ke yang paling rendah ditemukan di sebelah barat ($68,28 \mu\text{g/kg}$), sebelah timur ($56,26 \mu\text{g/kg}$), sebelah selatan ($55,28 \mu\text{g/kg}$), dan sebelah utara yang paling rendah dengan konsentrasi $34,05 \mu\text{g/kg}$.

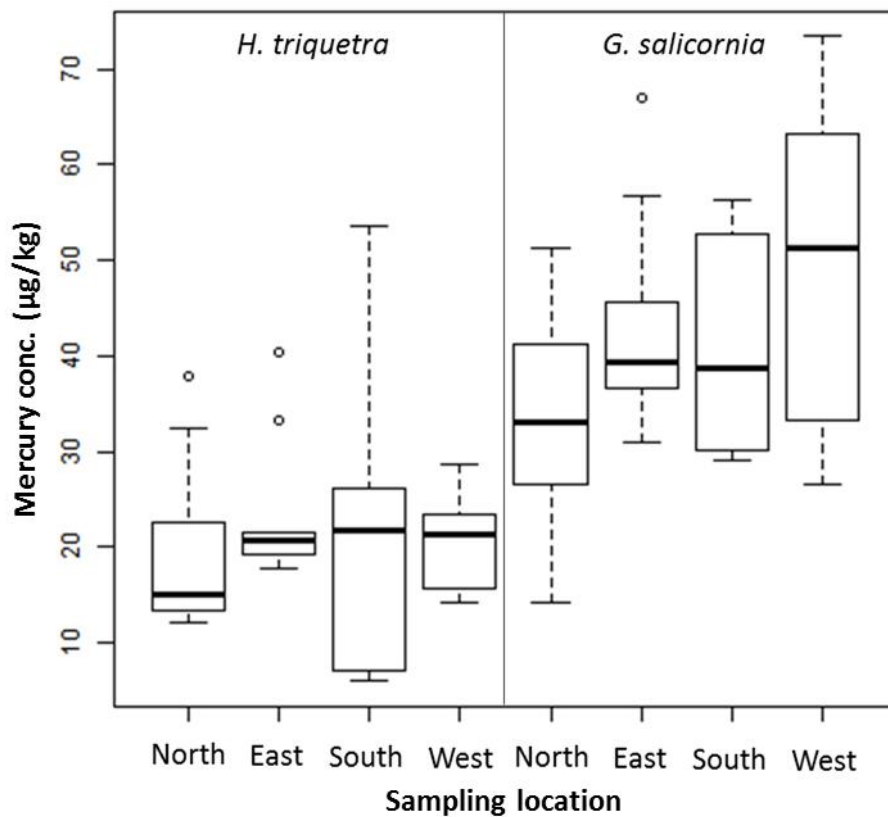
Tabel 2. Kandungan merkuri pada sampel makroalga

Table 2. Mercury content on macroalgae samples

No	Species	n	Sampling Location	[Hg] ($\mu\text{g/kg}$)
1	<i>H.triquetra</i>	3	North	20.08 ± 9.34
2	<i>H. triquetra</i>	3	East	23.65 ± 7.80
3	<i>H. triquetra</i>	3	South	21.57 ± 14.82
4	<i>H. triquetra</i>	3	West	20.70 ± 5.14
5	<i>G. salicornia</i>	3	North	32.74 ± 12.06
6	<i>G. salicornia</i>	3	East	43.61 ± 11.56
7	<i>G. salicornia</i>	3	South	40.73 ± 10.95
8	<i>G. salicornia</i>	3	West	48.72 ± 17.54



Gambar 2. Konsentrasi merkuri dalam kedua spesies makroalga.
Figure 2. Mercury concentration in two species of macroalgae.



Gambar 3. Konsentrasi merkuri dalam makroalga berdasarkan area sampling.
Figure 3. Mercury concentration in macroalgae based on sampling areas.

Pembahasan

Konsentrasi merkuri rata-rata dalam makroalga cokelat *H. triquetra* sebesar $21,50 \pm 9,59 \mu\text{g/kg}$, dan dalam makroalga merah *G. salicornia* $41,45 \pm 14,00 \mu\text{g/kg}$. Perbedaan tersebut terjadi karena adanya perbedaan kandungan gugus fungsi yang mempengaruhi kemampuan spesies makroalga dalam mengakumulasi logam berat (Al-Shwafi dan Rushdi 2008, Diaz et al. 2011). Selain itu perbedaan struktur dinding sel pada alga cokelat (Phaeophyta) dan alga merah (Rhodophyta) menyebabkan kemampuan pengikatan logam berat berbeda (Henriques et al. 2015). Dinding sel menyediakan ligan dengan gugus fungsional yang mampu mengikat ion dari logam (Davis et al. 2003). Ada beberapa kelompok gugus fungsional dalam biomassa makroalga yang dapat menarik dan menyerap logam, yakni acetamido, amino, amido, sulfidril, sulfat, dan karboksil (Gardea-Torresdey et al. 1990; Volesky, 1991; Schiewer and Volesky 2000).

Konsentrasi merkuri yang lebih rendah dalam alga cokelat diduga disebabkan kandungan gugus fungsi karboksil dan sulfat yang terutama disusun oleh selulosa, asam alginat, dan polisakarida sulfat. Dinding sel alga merah mengandung selulosa, agar-agar, karagenan, polisakarida sulfat, glikoprotein yang terdiri dari asam amino, karboksil, sulfat, dan kelompok hidroksil (Henriques et al. 2015; El Shoubaky dan Salem 2014; Tabarsa et al. 2012). Gugus fungsi yang lebih banyak akan membuat pengikatan logam berat pada dinding sel lebih besar. Kratochvil dan Volesky (1998) memperkirakan pengikatan logam berat oleh gugus fungsional sebesar 10% dari total keseluruhan pengikatan logam berat. Dalam penelitian ini, karena lebih banyaknya gugus fungsional, makroalga merah membuat pengikatan merkuri yang lebih tinggi dibandingkan pada makroalga cokelat (El Shoubaky dan Salem 2014; Tabarsa et al. 2012). Sebagian besar penyerapan logam mengikuti mekanisme kompleks termasuk pertukaran ion dalam konsep biosorpsi (Davis et al. 2003) dan kompleksasi dengan reaksi oksidasi/reduksi (Volesky dan Holan 1995).

Biomaterial makroalga yang kompleks membuat mekanisme pengikatan logam bergantung pada jenis rumput laut, jenis logam berat serta lingkungannya (Volesky dan Holan 1995, Sheng et al 2004). Logam berat masuk pada sistem selular makroalga melalui transporter atau saluran endositosis, dengan cara

penghambatan potensi proses impor fisiologis membran. Varotto et al., (2013) menyatakan logam berat mengkontaminasi dan mengikat molekul kecil (seperti GSH) dan sebagai pengangkut yaitu apoprotein (seperti sitokrom c oksidase, superoxide dismutase) serta chaperons (seperti metallothionein/MTs, ferritin). Chaperon dan apoprotein dapat mengganti proses ligan alami dari kation endogen sehingga mengganggu proses homeostasis Ca^{++} dan menumpuk juga dalam butiran atau mineral yang kaya logam (Varotto et al., 2013).

Kandungan merkuri paling rendah untuk kedua spesies ditemukan di perairan sebelah utara Pulau Pari. Konsentrasi merkuri tertinggi dalam makroalga cokelat ditemukan di sebelah timur, sedangkan dalam makroalga merah ditemukan di sebelah barat Pulau Pari. Hal ini berbanding lurus dengan kandungan merkuri dalam sedimen yang tinggi di sebelah barat, yang berarti kandungan merkuri di perairan Pulau Pari bagian barat lebih tinggi dibanding bagian yang lain. Konsentrasi merkuri dalam sedimen yang berbeda di semua kawasan penelitian, dipengaruhi oleh ukuran partikel sedimen, kandungan bahan organik, dan pH sedimen (Topcuoğlu et al. 2003; Sanusi 2006). Sedimen dengan partikel-partikel berukuran kecil akan memiliki luas permukaan yang lebih besar daripada sedimen dengan partikel-partikel berukuran besar, sehingga proses adsorpsi logam berat oleh sedimen berpartikel kecil akan semakin efektif (Mucha et al. 2004; Ryan et al. 2012; Ivanov 2014). Kecenderungan peningkatan konsentrasi logam berat dalam sedimen merupakan akibat dari konsentrasi logam berat yang tinggi dalam air (Singh et al. 2005).

Konsentrasi merkuri dalam sedimen di perairan Pulau Pari dibandingkan dengan kadar alamiah berdasarkan Réseau National d'Observation (Heral et al. 1984) menunjukkan konsentrasi merkuri dalam sedimen di perairan Pulau Pari telah melebihi kisaran normal ($>20 \mu\text{g/kg}$). Namun, berdasarkan nilai kisaran alamiah yang ditetapkan United Kingdom (1990) konsentrasi merkuri dalam sedimen belum melewati batas yang ditetapkan ($<200 \mu\text{g/kg}$). Berdasarkan nilai baku mutu IADC/CEDA (1997) konsentrasi merkuri juga belum melewati ambang batas $100 \mu\text{g/kg}$ dan ambang target $150 \mu\text{g/kg}$. Ambang batas merupakan konsentrasi kontaminan dalam sedimen yang memiliki nilai maksimum yang dapat ditoleransi oleh manusia atau ekosistem. Sebaliknya, ambang target merupakan konsentrasi kontaminan dalam sedimen yang memiliki nilai yang lebih kecil

daripada nilai ambang batas. Oleh karena itu, substansi yang ada dalam sedimen tidak terlalu berbahaya bagi lingkungan.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Nuriwati dan Hartati (1985) dan Chakraborty et al. (2014) diketahui ada proses akumulasi logam berat merkuri dalam makroalga. Secara khusus, Henriques et al. (2015) menyatakan *Ulva lactuca* (makroalga hijau), *Gracilaria gracilis* (makroalga merah) dan *Fucus vesiculosus* (makroalga cokelat) memiliki kemampuan akumulasi merkuri antara 20.8-208 µg/g, lebih tinggi dibandingkan akumulasi merkuri pada makroalga merah (*Gracilaria salicornia*) dan makroalga cokelat (*Hormophysa triquetra*) pada penelitian ini. Namun demikian, diperlukan penelitian lebih lanjut terkait ketersediaan kedua jenis makroalga yang menjadi objek penelitian serta kajian konsentrasi merkurnya sepanjang tahun. Akumulasi merkuri dalam kedua spesies yang dipelajari, menunjukkan potensi kedua spesies makroalga tersebut menjadi bioakumulator untuk logam berat merkuri.

Kesimpulan

Kompleksitas gugus fungsi membuat kandungan merkuri lebih tinggi dalam makroalga merah dibandingkan dalam makroalga cokelat. Kemampuan akumulasi terhadap merkuri membuat spesies makroalga merah (*Gracilaria salicornia*) dan makroalga cokelat (*Hormophysa triquetra*) berpotensi untuk menjadi bioakumulator logam berat merkuri di perairan Pulau Pari.

Persantunan

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada UPT Loka Pengembangan SDM Pulau Pari LIPI, kepada R. Mueller atas bantuan identifikasi makroalga, kepada Bapak Muhayar atas bantuan pengambilan dan penyiapan sampel di lapangan dan kepada Bapak Eston Matondang atas bantuan dalam penyiapan sampel di laboratorium.

Daftar Pustaka

- Akcali, I. and F. Kucuksezgin. 2011. A Biomonitoring Study: Heavy Metals in Macroalgae from Eastern Aegean Coastal Areas. *Marine Pollution Bulletin* 62(3):637–45. doi:10.1016/j.marpolbul.2010.12.021.
- Aldor, I., E. Fourest and B. Volesky. 1995. Desorption of Cadmium from Algal Biosorbent. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 73(4):516–22. doi:10.1002 / cjce . 5450730412.
- Al-Shwafi, N. A. and A. I. Rushdi. 2008. Heavy Metal Concentrations in Marine Green, Brown and Red Seaweeds from Coastal Waters of Yemen, the Gulf of Aden. *Environmental Geology* 55(3):653–60. doi:10.1007/s00254-007-1015-0.
- Black, W. A. P. and R. L. Mitchell. 1952. Trace Elements in the Common Brown Algae and in Sea Water. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 30(03):575–84. doi:10.1017/S00253154000-12984.
- Bryan, G. W. and W. J. Langston. 1992. Bioavailability, Accumulation and Effects of Heavy-Metals in Sediments with Special Reference to United-Kingdom Estuaries - a Review. *Environmental Pollution* 76(2):89–131. doi: 10.1016/0269-7491(92)90099-V.
- Chakraborty, S., T. Bhattacharya, G. Singh, and J. P. Maity. 2014. Benthic Macroalgae as Biological Indicators of Heavy Metal Pollution in the Marine Environments: A Biomonitoring Approach for Pollution Assessment. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 100(1):61–68. doi: 10.1016 / j.ecoenv. 2013 . 12 . 003.
- Chmielewská, E., J. Medved' and S. Republic. 2001. Bioaccumulation of Heavy Metals by Green Algae *Cladophora glomerata* in a Refinery Sewage Lagoon. *Croatica Chemica Acta* 74(1):135–45.
- Diaz, J. H. J., R. D. Thilaga, C. Veerabahu and Radhika. 2011. Bioaccumulation Capacity of Some Seaweed from Thoothukudi Coast Tamil Nadu, India. *World Journal of Fish and Marine Sciences*. IDOSI Publications 3(3):247–51. [http://www.idosi.org/wjfm3\(3\)11/13.pdf](http://www.idosi.org/wjfm3(3)11/13.pdf).
- Davis, T. A., B. Volesky and A. Mucci. 2003. A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae. *Water Research*. 37:4311-4330.
- El Shoubaky, G. A. and E. A. Salem. 2014. Terpenes and Sterols Composition of Marine Brown Algae *Padina pavonica* (Dictyotales) and *Hormophysa triquetra* (Fuciales). *International Journal of Pharmacognosy and Phytochemical Research* 6(4):894–900.
- FAO. 2016. Food and Agriculture Organization of the United Nations Yearbook. Fishery and

- Aquaculture Statistics. 2014. FAO. http://www.fao.org/fi/oldsite/eims_search/1_de tt.asp? Calling=simple_s_result&lang=en& pub_id=316853.
- Flouty, R. and G. Estephane. 2012. Bioaccumulation and Biosorption of Copper and Lead by a Unicellular Algae *Chlamydomonas Reinhardtii* in Single and Binary Metal Systems: A Comparative Study. *Journal of Environmental Management* 111:106–14. doi:10.1016/j.jenvman.2012.06.042.
- Foster, P. 1976. Concentrations and Concentration Factors of Heavy Metals in Brown Algae. *Environmental Pollution* 10(1): 45–53. doi:10.1016/0013-9327(76)90094-X.
- Gardea-Torresdey J. L., M. K. Becker-Hapak, J. M. Hosea and D. W. Darnall. 1990. Effect of chemical modification of algal carboxyl groups on metal ion binding. *Environmental Science and Technology* 24(9):1372–1378.
- Guiry, M. D. and G. M. Guiry. 2016. *AlgaeBase*. World-Wide Electronic Publication. National University of Ireland. doi:<http://www.algaebase.org>.
- Henriques, B., L. S. Rocha, C. B. Lopes, P. Figueira, R. J. R. Monteiro, A.C. Duarte, M.A. Pardal and E. Pereira. 2015. Study on Bioaccumulation and Biosorption of Mercury by Living Marine Macroalgae: Prospecting for a New Remediation Biotechnology Applied to Saline Waters. *Chemical Engineering Journal* 281:759–70. doi:10.1016/j.cej.2015.07.013.
- Heral, M., D. Razet, J. M. Deslous-Paoli, F. Manaud, I. Truquet and J. Garnier. 1984. *Hydrobiologie du Bassin de Marennes-Oléron - Résultats du Réseau National d'Observation: 1977 à 1981*. Musée d'Histoire Naturelle, La Rochelle. *Annales de La Société des Sciences Naturelles de La Charente-Maritime* 7(2):259–77. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00000/2934/>
- Hyman, M. 2004. The Impact of Mercury on Human Health and the Environment. *In Alternative Therapies in Health and Medicine* 10:70–75. doi:10.1590/S0325-00752012000-300017.
- IADC/CEDA. 1997. *Environmental Aspects of Dredging: 2a. Conventions, Codes and Conditions: Marine Disposal*. Netherlands: International Association of Dredging Companies.
- Ivanov, M. V. 2014. Mercury in Bottom Sediments of Marginal Seas of Northeast Asia. *Russian Journal of Pacific Geology* 8(4):288–99. doi:10.1134/S1819714014040046.
- Jalali, R., H. Ghafourian, Y. Asef, S. J. Davarpanah and S. Sepehr. 2002. Removal and Recovery of Lead Using Nonliving Biomass of Marine Algae. *Journal of Hazardous Materials* 92(3):253–62. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00021-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00021-3).
- Khaled, A., A. Hessein, A. M. Abdel-Halim and F. M. Morsy. 2014. Distribution of Heavy Metals in Seaweeds Collected along Marsa-Matrouh Beaches, Egyptian Mediterranean Sea. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 40(4):363–71. doi:10.1016/j.ejar.2014.11.007.
- Kratochvil D and B. Volesky. 1998. Advances in the biosorption of heavy metals. *Trends Biotechnology* 16:291–300.
- Lee, Y. C. and S. P. Chang. 2011. The biosorption of heavy metals from aqueous solution by *Spirogyra* and *Cladophora* filamentous macroalgae. *Bioresource Technology* 102(9):5297–5304. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.12.103>
- Liu, G., Y. Cai and N. O'Driscoll. 2011. *Environmental Chemistry and Toxicology of Mercury*. doi:10.1002/9781118146644.
- Mucha, A. P, A. A Bordalo and M. T. S. D. Vasconcelos. 2004. Sediment Quality in the Douro River Estuary Based on Trace Metal Contents, Macrobenthic Community and Elutriate Sediment Toxicity Test (ESTT). *Journal of Environmental Monitoring* 6(7):585–92. doi:10.1039/b401855a.
- Naser, H. A. 2013. Assessment and Management of Heavy Metal Pollution in the Marine Environment of the Arabian Gulf: A Review. *Marine Pollution Bulletin*. doi:10.1016/j.marpolbul.2013.04.030.
- Nichols, T., and A. Holmes. 2007. Non-Parametric Procedures. *In Statistical Parametric Mapping: The Analysis of Functional Brain Images*. Pages 253–72. doi:10.1016/B978-012372560-8/50021-8.
- Nuriwati, D. dan S. T. Hartati. 1985. Pengaruh Logam Berat Merkuri terhadap Pertumbuhan Makroalga (*Gracilaria lichenoides*) serta Daya Serapnya di Teluk Jakarta. *Jurnal Penelitian Perikanan Laut (Indonesia)* 33: 21–26.
- Rai, L. C., J. P. Gaur and H. D. Kumar. 1981. Phycology and Heavy-Metal Pollution. *Biological Reviews* 56:99–151. doi:10.1111/j.1469-185X.1981.tb00345.x.
- Rainbow, P. S. 1995. Biomonitoring of Heavy Metal Availability in the Marine Environment. *Marine Pollution Bulletin* 31(4-12):183–92. doi:10.1016/0025-326X(95)00116-5.

- Rodríguez-Figueroa, G. M., E. Shumilin and I. Sánchez-Rodríguez. 2009. Heavy metal pollution monitoring using the brown seaweed *Padina durvillaei* in the coastal zone of the Santa Rosalía mining region, Baja California Peninsula, Mexico. *Journal of Applied Phycology* 21(1):19–26. doi:10.1007/s10811-008-9346-0.
- Ryan, S., P. McLoughlin and O. O'Donovan. 2012. A Comprehensive Study of Metal Distribution in Three Main Classes of Seaweed. *Environmental Pollution* 167:171–77. doi:10.1016/j.envpol.2012.04.006.
- Sanusi, H. S. 2006. *Kimia Laut Proses Fisik Kimia dan Interaksinya Dengan Lingkungan*. Bogor: Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Institut Pertanian Bogor.
- Schiewer S and B. Volesky. 2000. Biosorption processes for heavy metal removal. In: Lovley DR, editor. *Environmental microbe– metal interactions*. Washington, DC: ASM Press. p 329–357.
- Sedgwick, P. 2012. Parametric v Non-Parametric Statistical Tests. *Bmj* 344(mar14 2):e1753. doi:10.1136/bmj.e1753.
- Shams El-Din, N. G., L. I. Mohamedein and K. M. El-Moselhy. 2014. Seaweeds as bioindicators of heavy metals off a hot spot area on the Egyptian Mediterranean Coast during 2008-2010. *Environmental Monitoring and Assessment* 186(9):5865–5881. doi:10.1007/s10661-014-3825-3
- Sheng, P. X., Y. P. Ting, J. P. Chen and L. Hong. 2004. Sorption of lead, copper, cadmium, zinc, and nickel by marine algal biomass: characterization of biosorptive capacity and investigation of mechanisms. *Journal of Colloid and Interface Science* 275:131-141
- Singh, K. P., A. Malik, S. Sinha, V. K. Singh and R. C. Murthy. 2005. Estimation of Source of Heavy Metal Contamination in Sediments of Gomti River (India) Using Principal Component Analysis. *Water, Air, and Soil Pollution* 166(1-4):321–341. doi:10.1007/s11270-005-5268-5.
- Tabarsa, M., M. Rezaei, Z. Ramezanpour and J. R. Waaland. 2012. Chemical Compositions of the Marine Algae *Gracilaria salicornia* (Rhodophyta) and *Ulva lactuca* (Chlorophyta) as a Potential Food Source. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 92(12):2500–2506. doi:10.1002/jsfa.5659.
- Tongkumchum, P. 2005. Two-dimensional boxplot. *Songklanakarin Journal Science Technology* 27(4):859-866
- Topcuoğlu, S., K. C. Güven, N. Balkıs and Ç. Kırbasoğlu. 2003. Heavy Metal Monitoring of Marine Algae from the Turkish Coast of the Black Sea, 1998–2000. *Chemosphere* 52(10):1683–1688. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00301-1.
- United Kingdom. 1990. *Environmental Protection Act*. *Environmental Protection Act*. http://www.legislation.gov.uk/ukpga/1990/43/pdfs/ukpga_19900043_en.pdf.
- Volesky B. 1991. *Biosorption of heavy metals*. Boca Raton, FL: CRC Press, Inc.
- Volesky, B. and Holan, Z. R. 1995. Biosorption of heavy metal. *Biotechnology Progress* 11(3):235-250.
- Varotto, L., S. Domeneghetti, U. Rosani, C. Manfrin, M. P. Cajaraville, S. Raccanelli, A. Pallavicini and P. Venier. 2013. DNA Damage & Transcriptional Changes in the Gills of *Mytilus galloprovincialis* Exposed to Nanomolar Doses of Combined Metal Salts (Cd, Cu, Hg). *PLoS ONE* 8 (1). doi:10.1371/journal.pone.0054602.
- Zeraatkar, A. K., H. Ahmadzadeh, A. F. Talebi, N. R. Moheimani and M. P. McHenry. 2016. Potential use of algae for heavy metal bioremediation, a critical review. *Journal of Environmental Management*. 181:817-831. ISSN 0301-4797. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.059>