

Literature Review

Mikroalga *Chlorella* sp. Sebagai Bioremediator Logam Berat
Microalgae Chlorella sp. as A Bioremediator for Heavy Metal

Caroline Novela Dyah Irianto, L. Indah Murwani Yulianti*, B. Boy R. Sidharta

Fakultas Teknobiologi, Universitas Atma Jaya Yogyakarta

*E-Mail: indah.yulianti@uajy.ac.id

Paper submit : 2 Desember 2020, Paper publish: Maret 2022

Abstract - Heavy metal pollution and its implications for human health and the environment have led to an interest in the development of environmental biotechnology. Five heavy metals, such as arsenic (As), lead (Pb), mercury (Hg), cadmium (Cd), and chromium (Cr) are carcinogenic and show toxicity related to the amount that can threaten the ecological environment and humans. Microalgae has several applications in the industrial aspects, especially in reducing biofuel production costs. The use of microalgae in heavy metal phytoremediation due to several benefits including high availability, inexpensive and environmentally friendly. Tolerance and response of different microalgae strains to heavy metals and highly efficient bioaccumulation capabilities are priorities in the utilization of microalgae. *Chlorella* sp. is the highest species that is widely studied and used in heavy metal reduction applications in various types of waste. This literature aims to find out the potential of microalgae in reducing the concentration of heavy metals as well as provide scientific information that is useful to assist the development to efficient technologies that are commercially viable in bioremediation of heavy metals using microalgae.

Keywords: Bioremediation, Microalgae, Heavy Metals, *Chlorella*, Wastewater

Abstrak - Polusi logam berat dan implikasinya bagi kesehatan manusia dan lingkungan telah menyebabkan meningkatnya minat untuk mengembangkan pendekatan bioteknologi lingkungan. Lima logam berat, antara lain arsenik (As), timbal (Pb), merkuri (Hg), cadmium (Cd), dan kromium (Cr) bersifat karsinogenik serta menunjukkan toksisitas walaupun dalam jumlah yang sedikit yang dapat mengancam ekologi lingkungan dan kesehatan manusia. Mikroalga memiliki beberapa manfaat dalam bidang industri terutama dalam menurunkan biaya produksi biofuel. Penggunaan mikroalga dalam fikoremediasi logam berat dikarenakan beberapa manfaat termasuk ketersediannya yang melimpah, murah, serta ramah lingkungan. Toleransi dan respon dari strain mikroalga yang berbeda terhadap logam berat serta kemampuan bioakumulasinya yang sangat efisien menjadi prioritas dalam pemanfaatan mikroalga. *Chlorella* sp. adalah spesies teratas yang banyak dipelajari dan digunakan dalam aplikasi penurunan logam berat dalam berbagai jenis limbah. Tinjauan ini bertujuan untuk mengetahui potensi mikroalga dalam menurunkan konsentrasi logam berat serta memberi informasi ilmiah yang bermanfaat untuk membantu pengembangan teknologi yang efisien di masa depan yang layak secara komersial dalam bioremediasi logam berat menggunakan mikroalga.

Kata kunci : bioremediasi, mikroalga, logam berat, *Chlorella*, air limbah

PENDAHULUAN

Kegiatan industrialisasi di Indonesia saat ini membuat semakin banyak peningkatan akumulasi limbah, misalnya, industri percetakan, penyamakan kulit, agro-industri, pertambangan, dan farmasi. Menurut PP No. 22 tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan

Pengelolaan Lingkungan Hidup, limbah cair yang dihasilkan dari kegiatan industri tersebut masuk ke dalam kategori bahan berbahaya dan beracun (B3). Limbah cair dari kegiatan industri seperti industri penyamakan kulit, industri tekstil, industri percetakan umumnya mengandung beberapa logam berat. Logam berat

cenderung sulit untuk dilarutkan dalam air. Logam berat tersebut, antara lain timbal (Pb), krom (Cr), mangan (Mn), merkuri (Hg), cadmium (Cd), seng (Zn), dan besi (Fe) (Saleh dan Aglan, 2018).

Logam berat seperti aluminium (Al), arsenik (As), barium (Ba), kadmium (Cd), timbal (Pb), merkuri (Hg), krom (Cr), dan uranium (U), tidak memiliki fungsi biologis dan dianggap tidak esensial. Hal ini menjadi dasar bahwa ion logam berat berbahaya bagi tubuh manusia karena dapat merusak DNA dan perubahan konformasi yang dapat menyebabkan modulasi siklus sel, karsinogenesis atau apoptosis (Tchounwou dkk., 2012). Selama beberapa dekade terakhir, banyak metode konvensional yang digunakan untuk menghilangkan logam berat dari air limbah yang terkontaminasi. Metode yang umum digunakan termasuk presipitasi kimia (*precipitation*), ultra-filtrasi (*ultrafiltration*), pertukaran ion (*ion exchange*), dan nanofiltrasi (*nanofiltration*) (Derco dan Vrana, 2018). Metode di atas masih memiliki kelemahan seperti biaya yang besar dan tidak ramah lingkungan karena meninggalkan residu dalam sedimen limbah.

Berdasarkan hal di atas diperlukan metode alternatif yang ramah lingkungan untuk mengurangi pencemaran yang akan ditimbulkan dari proses pengolahan limbah tersebut. Bioremediasi dengan menggunakan mikroorganisme saat ini banyak digunakan untuk mengatasi hal tersebut. Mikroorganisme yang biasa digunakan sebagai biosorben logam berat, yaitu bakteri, jamur dan mikroalga. Fikoremediasi didefinisikan sebagai penggunaan mikroalga dan sianobakteria untuk menghilangkan atau mengubah kontaminan yang terdiri dari unsur hara organik dan inorganik serta senyawa beracun dari sumber alami atau antropogenik dan juga tanah tercemar. Alga merupakan cincin pertama dari rantai makanan dalam sistem akuatik dan sumber

oksigen dimana alga menyerap nutrisi dan menghasilkan oksigen ke lingkungan melalui fotosintesis selama proses fikoremediasi (Podder dan Majumder, 2015).

Mikroalga dapat menurunkan konsentrasi logam berat dalam suatu polutan melalui proses seperti adsorpsi (ekstraseluler) dan penyerapan (intraseluler) (Urrutia dkk., 2019). Mikroalga memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan biosorben lainnya karena tersedia dalam jumlah besar di beberapa wilayah di dunia, dapat dibudidayakan dalam air tawar dan air asin di bawah berbagai kondisi iklim, serta memiliki biaya rendah dalam persiapannya sebagai biosorben dan memiliki kapasitas penghilangan logam berat yang tinggi (Moreira dkk., 2019). Berbagai penelitian sebelumnya (Lalhmunsiana dkk., 2016; Sayadi dkk., 2019; Yaghmaeian dkk., 2018; Moreiera dkk., 2019; Poder dan Mjumder, 2015; Vidyalaxmi dkk., 2019; Li dkk., 2018; dan Ahmad dkk., 2017) menunjukkan bahwa berbagai jenis mikroalga mampu dijadikan sebagai biosorben logam berat. Tujuan dari naskah ini, yaitu untuk meninjau potensi mikroalga dalam menurunkan konsentrasi logam berat dari berbagai jenis dan asal limbah serta memberi informasi ilmiah dalam bidang biologi terkait dengan bioremediasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Biosorpsi

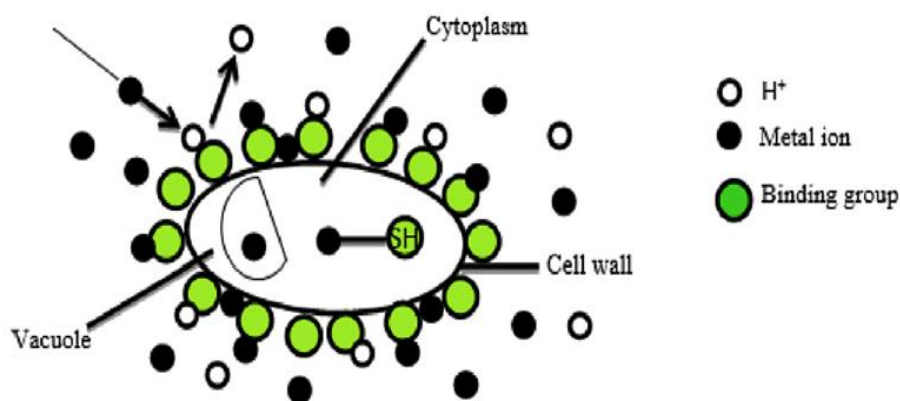
Biosorpsi merupakan suatu teknik menurunkan kadar atau konsentrasi logam berat dengan menggunakan bahan alami. Penghilangan logam berat atau zat beracun lainnya terjadi melalui mekanisme yang disebut adsorpsi melalui interaksi antara suatu molekul dalam larutan dengan permukaan suatu zat padat. Metode ini merupakan salah satu metode/proses yang sederhana dan dapat didaur ulang dengan

biaya yang relatif murah. Proses adsorpsi ini terdiri dari dua jenis, yaitu fisika dan kimia. Adsorpsi fisika terjadi karena adanya gaya *Van der Waals*. Pada saat terjadi adsorpsi, gaya tarik molekul antara larutan dan permukaan media lebih besar daripada gaya substansi terlarut dan larutan, maka substansi yang terlarut tersebut akan diadsorpsi oleh permukaan media. Adapun adsorpsi kimia terjadi ketika terbentuk suatu ikatan kimia antara substansi terlarut dalam larutan dengan molekul dalam media (Pratiwi dan Prinajati, 2018).

Dinding sel pada alga tersusun dari polisakarida, protein atau lipid pada dinding sel yang mengandung beberapa gugus fungsi seperti amino, hidroksil, karboksil dan sulfat yang dapat berperan sebagai tempat pertukaran ion logam (Deng., dkk, 2007, Sayadi dkk, 2019). Biosorpsi ion logam yang terjadi pada mikroalga diakibatkan oleh proses adsorpsi dan bioakumulasi. Tahap

pertama, ion-ion logam secara pasif teradsorpsi pada permukaan sel (baik oleh biomassa hidup atau tidak). Tahap selanjutnya, pada sel-sel yang hidup, ion akan diangkut perlahan ke dalam membran sel dan terakumulasi secara intraseluler. Bioakumulasi ini terjadi dalam kehidupan sel, melibatkan pengangkutan ion logam melintasi penghalang membran sel dan selanjutnya mengikat protein sitoplasma atau polisakarida atau ke kompartemen seluler tertentu seperti vakuola atau polifosfat yang dapat dilihat pada Gambar 1. (Rugnini dkk., 2017; Zeraatkar dkk., 2016).

Adanya kehadiran sejumlah besar kelompok fungsional di dinding sel mikroalga yang berkontribusi pada penghilangan unsur-unsur beracun dari air, membuat mikroalga dapat digunakan sebagai biosorben pengolahan air limbah (Saavedra, 2019), seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Biosorpsi logam ion oleh mikroalga (Zeraatkar dkk., 2016).

2. Mikroalga Sebagai Biosorben

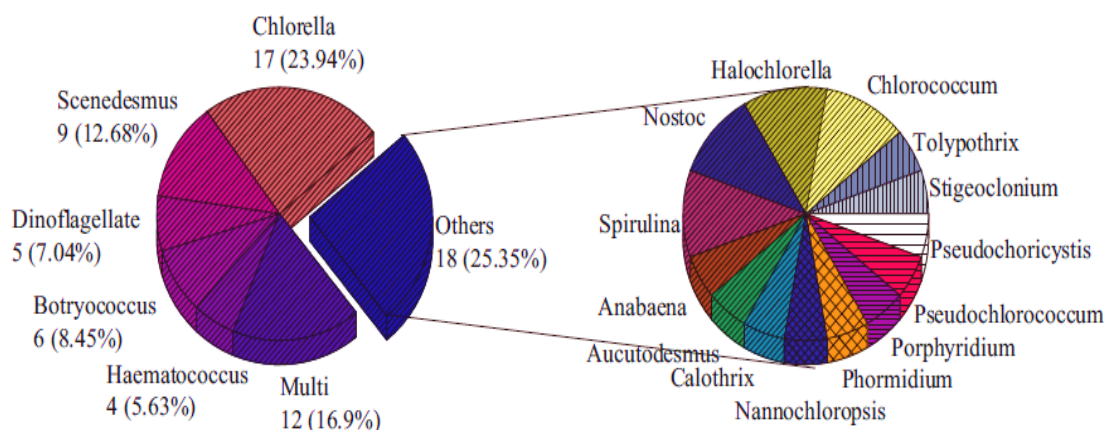
Alga merupakan tanaman air yang tidak memiliki akar dan juga batang. Baik itu mikro maupun makroalga, mereka autotrofik. Alga merupakan cincin pertama dari rantai makanan dalam sistem akuatik dan sumber oksigen dimana alga menyerap nutrisi dan meninggalkan oksigen ke lingkungan melalui

fotosintesis selama proses fikoremediasi. Alga dapat tumbuh dalam biomassa besar bahkan ketika habitat kondisinya lingkungannya malnutrisi. Mereka dianggap sebagai biosorben yang baik karena memiliki kapasitas penyerapan yang tinggi (Podder dan Majumder, 2015).

Mikroalga memiliki luas permukaan sel yang besar serta adanya gugus pengikat pada dinding sel permukaannya, sehingga mikroalga mampu mengikat logam berat (Saavedra dkk., 2018). Variasi dalam gugus fungsional pada permukaan dinding sel menimbulkan perbedaan dalam mekanisme biosorpsi. Gugus fungsional pada dinding sel alga yang penting untuk biosorpsi meliputi karbonil (keton), karboksil, sulfhidril (tiol), sulfonat, tioeter, amina, amina sekunder, amida, imina, imidazol, fosfonat dan fosfodiester. Dinding sel eukariotik terutama terdiri dari selulosa. dengan kelompok kimia pengikat logam potensial termasuk karboksilat, amina, imidazol, fosfat,

sulfhidril, sulfat, dan hidroksil (Alam dan Wang, 2019).

Diantara spesies mikroalga, ditemukan bahwa *Chlorella* adalah genus yang paling banyak dipelajari (Tabel 1). Dalam beberapa sistem, multi-spesies digunakan untuk mensimulasikan lingkungan alami. Spesies mikroalga biasanya dipilih berdasarkan adhesi pada media pendukung, bentuk dan ukuran sel, jumlah bahan polimer ekstraseluler (EPS), nilai produk sampingan, dan kemampuan antibakteri (Zhang dkk., 2019). Kedudukan strain *Chlorella* dalam penggunaannya sebagai biosorben, dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Distribusi spesies mikroalga yang diteliti sebagai biosorben dalam beberapa studi (Zhang dkk., 2018).

3. Penggunaan Sel Mikroalga Hidup atau Sel Mati

Secara umum, mikroalga adalah organisme uniseluler yang menggunakan sinar matahari, air dan CO₂ atmosfer untuk tumbuh. Strukturnya tidak mempunyai akar, batang dan daun. Komposisi umumnya adalah lipid (9,5 – 42%), karbohidrat (17 – 57%) dan protein (20 – 50%) dalam proporsi

yang bervariasi sesuai dengan spesies dan kondisi pertumbuhan (Raheem dkk., 2015; Jankowska dkk., 2017).

Mikroalga yang dimanfaatkan sebagai agen bioremediasi tidak hanya menggunakan mikroalga sel hidup (*living cells*) saja, melainkan dapat menggunakan mikroalga mati (*dead cells/biomassa*).

Tabel 1. Kemampuan *Chlorella* dalam menurunkan logam berat dalam kondisi mati (biomassa) dan hidup

Species	Jenis Sel (hidup/mati)	Kemampuan penurunan kadar logam berat	Referensi
<i>Chlorella vulgaris</i>	Mati (Biomassa)	Pb (II) > 90%	Lalhmunsiam, dkk (2016)
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Mati (biomassa)	Cu sebesar 83,14%	Moreira dkk., (2019)
<i>Chlorella</i> sp.	Mati (biomassa)	Pb (II) sebesar 63,58%	Li dkk., (2018)
<i>Chlorella coloniales</i>	Hidup	97% untuk menghilangkan berbagai logam berat (Cd, As, Cr, Co, dan Fe).	Yaghmaian dan Jaafari (2018)
<i>Chlorella</i>	Hidup	As (III) sebesar 85,217% As (V), sebesar 88,1534%.	Podder dan Majumder (2015)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Hidup	Cu sebesar 55% Mo sebesar 80,3%	Urrutia dkk., (2019)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Hidup	Mn sebesar 99,3% Zn sebesar 81,68%	Li dkk., (2019)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Hidup	Cu sebesar 39%	Rugnini dkk., (2017).

Berdasarkan hasil penelitian di atas (Tabel 1) terlihat bahwa strain *Chlorella vulgaris* paling banyak digunakan sebagai biosorben logam berat, baik sebagai biomassa atau mikroorganisme hidup. Persentase penurunan logam berat dari pemanfaatan keduanya berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa pemanfaatan biomassa mikroalga dan mikroalga hidup beberapa menunjukkan adanya perbedaan kemampuan. Biomassa mikroalga memiliki efisiensi yang lebih besar untuk menghilangkan logam berat, seperti hasil penelitian Lalhmunsiam, dkk (2016) dengan kemampuan adsorbs Pb (II) sebesar lebih dari 90%. Tetapi, keduanya baik kondisi mati atau hidup memiliki kemampuan untuk menghilangkan logam berat secara optimal berdasarkan kondisi lingkungannya. Perbedaan efisiensi yang lebih besar oleh biomassa mikroalga ini dapat juga dikarenakan pengaruh beberapa faktor

lingkungan seperti pH dan konsentrasi awal logam. Sementara itu untuk pada sel hidup mikroalga, selain kedua faktor tersebut juga dipengaruhi oleh aerasi, serta nutrisi dari medium.

Proses metabolisme pada alga hidup umumnya berkontribusi pada bioremediasi logam berat. Pemanfaatan mikroalga mati (biomassa) memang telah menjadi populer untuk biosorpsi ion logam berat dari suatu larutan. Keuntungan biosorpsi biomassa mikroalga termasuk biosorpsi logam berat beberapa kali lebih besar pada alga yang tidak hidup dibandingkan alga hidup (Sayadi dkk., 2019).

Keunggulan penggunaan biomassa (sel mati) mikroalga dibandingkan sel hidup adalah mereka tidak terpengaruh oleh ion logam beracun, membutuhkan lebih sedikit ruang, biaya perawatan yang relatif lebih murah serta tidak memerlukan manajemen intensif atau penambahan nutrisi

pertumbuhan lebih lanjut (Purchase, 2016). Selain itu, kemungkinan untuk mendaur ulang biomassa alga yang tidak hidup adalah karakteristik unik lainnya. Misalnya, ion logam yang terikat pada dinding sel alga dapat dihilangkan dengan mencuci biomassa dengan air deionisasi dan agen desorpsi (HCl, NaOH, CaCl₂) (Soares dkk., 2019). Di sisi lainnya, sel hidup rentan terhadap toksisitas logam dan karenanya bisa mati. Selain itu, mikroalga hidup biasanya membutuhkan nutrisi untuk proses pengolahan air limbahnya, yang dapat meningkatkan BOD dan COD dari efluen (Purchase, 2016).

Penggunaan mikroalga sebagai agen biosorpsi memiliki keunggulan dibanding adsorpsi secara fisika dan kimia. Namun ada faktor lingkungan yang dapat memengaruhi biosorpsi ion logam berat oleh mikroalga. Perubahan pH berdampak pada alga yang hidup pada tingkat yang lebih besar daripada alga yang tidak hidup karena sebagian besar alga tumbuh dalam media netral atau sedikit basa. Media asam dapat memengaruhi laju pertumbuhan alga dan media dasar mungkin menyebabkan pengendapan ion logam (Alam dkk., 2015). Dengan begitu, penghilangan logam berat dalam larutan dengan pH ekstrem lebih sesuai menggunakan biomassa mikroalga dibandingkan dengan yang hidup, karena menggunakan alga hidup menambah kompleksitas manajemen media kultur yang dapat menyebabkan presipitasi ion logam yang tidak diinginkan dan adanya gangguan bioremediasi (Alam dkk., 2015).

Singkatnya, sel-sel hidup yang memiliki aktivitas metabolisme mungkin menghasilkan penyerapan ion logam yang lebih tinggi dibandingkan dengan biomassa sel yang mati dan mereka juga dapat menyerap berbagai ion logam yang beragam. Namun, biomassa sel yang mati memiliki penyerapan kinetik lebih cepat dikarenakan luas permukaannya yang lebih luas dan bahan biomassa sel yang mati dapat juga digunakan

kembali dalam siklus adsorpsi-desorpsi berturut-turut (Purchase, 2016). Pada akhirnya, kebutuhan biaya yang rendah dan kemudahan penggunaan biomassa sel yang mati telah menjadi dasar pengembangan teknologi ini sehingga menjadi pilihan yang baik untuk bioremediasi dalam skala besar. Menurut Yaghmaeian dan Jaafari (2018), biosorpsi dengan biomassa mikroalga memberikan keuntungan karena dapat menekan biaya lebih besar dibanding dengan teknik konvensional lainnya.

4. Mikroalga Terimobilisasi

Imobilisasi mikroalga merupakan suatu metode atau teknik yang dikembangkan dalam bioteknologi untuk mengatasi remediasi baik itu logam berat maupun material organik lainnya. Mikroalga yang terimobilisasi dilaporkan memiliki kemampuan penyerapan logam yang lebih tinggi (Ahmad dkk., 2017). Imobilisasi adalah suatu proses perlekatan sel-sel ke permukaan *carrier* dalam sebagian besar *carrier*. Teknik imobilisasi harus dapat meminimalkan kerusakan sel-sel yang diimobilisasi serta dirancang untuk mengukur toksisitas zat dan limbah (Vasilieva dkk., 2017).

Teknik seperti flokulasi, adsorpsi pada permukaan, pengikatan kovalen terhadap pembawa, dan jebakan alga dalam matriks polimer digunakan untuk imobilisasi sel atau biomassa. Untuk mengimobilisasi biomassa, biopolimer alami (seperti agar dan alginat) atau senyawa sintetik (seperti silka gel) dapat digunakan. Dalam hal ini kalsium alginat telah banyak digunakan untuk imobilisasi sel ganggang dan banyak sumber biomassa lainnya (Zeraatkar dkk., 2016).

Teknik imobilisasi dapat memberikan kepadatan mikroalga yang lebih tinggi dalam fotobioreaktor yang baik. Dibandingkan dengan mikroalga bebas,

mikroalga amobil kurang sensitif terhadap kondisi eksternal seperti perubahan suhu dan pH. Hal ini dikarenakan sebagian besar gugus fungsional tertanam dalam butiran alginat (*beads*) sehingga juga berdampak pada efek transfer massa. Mikroalga yang terimobilisasi dapat berkontribusi pada pertumbuhan dan meningkatkan efisiensi

penghilangan nutrisi dan laju pertumbuhan mikroalga. Natrium alginat merupakan bahan polimer alami, maka perlu dilakukan penggantian atau pelapisan permukaan secara berkala bahwa cahaya dan media dapat ditransmisikan ke dalam bagian butiran atau manik (*beads*) (Valdez dkk., 2018; Derco dan Vrana, 2018).

Tabel 2. Kemampuan *Chlorella* hasil immobilisasi dalam penurunan kadar logam berat

Species	Kemampuan penurunan kadar logam berat	Referensi
<i>Chlorella vulgaris</i>	Fe (II) sebesar 13% Zn (II) sebesar 11,6 % Mn (II) sebesar 10.5 %.	Ahmad., dkk (2019)
<i>Chlorella</i> sp.	(Cd) sebesar 59,67%	Valdez dkk., (2018)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Cd (II) sebesar 76,448%	Sheekh., dkk (2019)
<i>Chlorella sorokiniana</i>	Cu, sebesar 97% Ni sebesar 51% Cd sebesar 74%.	Petrovic., dkk (2016)

Beberapa studi menunjukkan bahwa immobilisasi sel mikroalga memberikan pengaruh yang efisien dalam menurunkan konsentrasi logam berat maupun bahan organik lainnya. Ahmad., dkk (2019) melakukan percobaan penghilangan logam Fe (II), Mn (II) dan Zn (II) dengan menggunakan biomassa mikroalga *Chlorella vulgaris* bebas dan terimobilisasi. Matriks yang digunakan adalah kalsium alginat. Penyerapan logam Fe (II), Zn (II) dan Mn (II) oleh biomassa mikroalga masing-masing sebesar 7.5, 7 dan 6.5 %, sedangkan dengan biomassa terimobilisasi masing-masing sebesar 13, 11.6 dan 10.5 %. Hal ini menunjukkan bahwa biomassa terimobilisasi memiliki kemampuan yang lebih tinggi dalam kemampuan penyerapannya.

Chlorella sp. terimobilisasi dalam alginat dapat digunakan untuk proses bioremediasi kadmium pada konsentrasi rendah dari logam, karena keberadaan biomassa yang layak, mikroalga memiliki

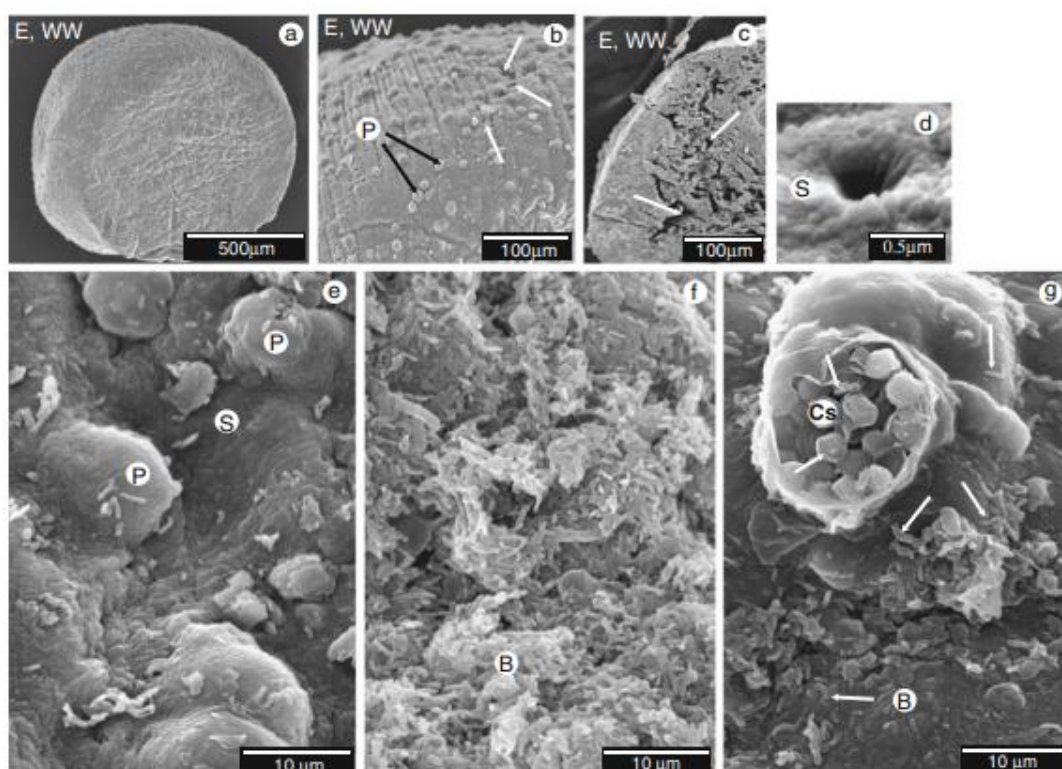
potensi kapasitas pemindahan alginat (Valdez dkk., 2018), yang juga melakukan percobaan penghilangan logam berat kadmium (Cd) dengan menggunakan matriks natrium alginat. Hasilnya menunjukkan bahwa penghilangan logam berat kadmium (Cd) menggunakan butiran alginat *Chlorella* sp. memiliki persentase sebesar 59,67% kadmium pada konsentrasi 20 ppm. Sheekh., dkk (2019) juga melaporkan hasil penelitiannya yang menggunakan biomassa strain mikroalga *Chlorella vulgaris* terimobilisasi dengan matriks Ca-alginat untuk penghilangan logam berat Cd (II). Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa efisiensi biosorpsi kadmium tertinggi adalah 76,448% dibandingkan dengan kontrol.

Penggunaan biomassa mikroalga amobil juga dilakukan dalam penelitian Petrovic., dkk (2016) dengan menggunakan biomassa mikroalga *Chlorella sorokiniana* terimobilisasi. Matriks yang digunakan yaitu kalsium alginat untuk penurunan konsentrasi logam Cu, Ni dan Cd. Hasil penelitian ini

melaporkan bahwa sel-sel *Chlorella sorokiniana* dapat menjadi biosorben yang efektif untuk Cu, Ni dan Cd. Namun, dalam kasus penghilangan Ni memiliki efisiensi biosorpsi lebih rendah daripada dua logam lainnya. Hasil penurunan untuk Cu, Ni dan Cd masing-masing sebesar 97, 51 dan 74%.

Imobilisasi sel dapat meningkatkan kapasitas biosorpsi seperti disampaikan Derco dan Vrana (2018). Adanya imobilisasi sel dapat meningkatkan kekuatan mekanik dengan adanya penambahan alginat yang bersifat *biocompatibility*. Material atau butiran alginat tersebut dapat tahan terhadap

bahan kimia sehingga kapasitas penghilangan logam menjadi lebih banyak. Biosorpsi logam sangat dipengaruhi oleh konsentrasi ion logam awal dan pH awal. Diameter dan konsentrasi biomassa dari butiran alga juga dapat memengaruhi efisiensi pemindahan logam biomassa (Petrovic dkk., 2016). Butiran alginat dapat digunakan secara efektif untuk menghilangkan dan memulihkan logam berat dari larutan dalam siklus yang berurutan (Ahmad dkk., 2019) dimana kenampakan visual dari imobilisasi mikroalga dengan alginat dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. a Mikrofotograf dengan SEM pada permukaan butiran alginat (*mengandung Chlorella sorokiniana* dan *Azospirillum brasilense* yang diimobilisasi bersama-sama) setelah inkubasi secara teratur air limbah setelah 48 jam. b Perbesaran subfigure a. Panah hitam menunjukkan tonjolan dan panah putih menunjukkan pori-pori. c Irisan butiran menunjukkan struktur rongga internal (panah) khas butiran alginat. d Rongga pori khas dari permukaan butiran. e Kolonisasi permukaan butiran oleh bakteri air limbah yang terendam dalam air limbah selama 48 jam, dan f setelah 96 jam, membentuk biofilm masif di permukaan. g Permukaan butiran dengan biofilm dan bakteri tunggal (panah) setelah pelepasan penutup alginat dari satu tonjolan pada permukaanbutiran. Ini menunjukkan struktur internal butiran yang mengandung sel dan bakteri tipe *Chlorella* (panah di sekitar mikroalga). WW air limbah, E eksterior butiran alginat, B biofilm bakteri, pembentukan tonjolan P (mengandung mikroorganisme amobil) di permukaan luar butiran alginat, S permukaan alginat, Cs *C. sorokiniana* (Sergio, dkk, 2011)

Jumlah sel terimobilisasi yang ditingkatkan dalam lingkungan beracun memberikan alternatif yang signifikan untuk mencapai bioremediasi yang cukup dari lingkungan yang terkontaminasi secara kimia. Alginat memiliki struktur makromolekul unik yaitu tersusun atas asam guluronat dan asam manuronat yang memungkinkan membentuk beberapa blok, antara lain blok polimanuronat (MM), blok poliguluronat (GG) dan blok campuran (MG) dan kapasitas pertukaran ion untuk mengikat ion logam berat secara selektif, dengan efisiensi penghilangan dan kapasitas adsorpsi yang dicapai melalui sejumlah situs pengikatan aktif dan kelompok fungsional di sepanjang rantai polimernya (Qin, 2018). Polusi logam berat masih merupakan masalah serius di banyak bagian dunia, penggunaan alginat khususnya dan rumput laut pada umumnya sebagai bahan makanan khusus dapat membantu melindungi orang dari efek berbahaya ion logam berat.

5. Faktor Biosorpsi

Penyerapan logam berat oleh biomassa mikroalga dipengaruhi oleh banyak faktor, seperti pH, suhu, konsentrasi ion logam awal, waktu kontak, dan terutama jenis mikroalga yang digunakan. pH bervariasi untuk sistem biosorpsi yang berbeda. Peningkatan pH hingga 5 menyebabkan peningkatan kapasitas biosorpsi (98%), tetapi peningkatan lebih lanjut dalam pH menyebabkan kapasitas berkurang. Hal ini juga bergantung pada jenis mikroalga serta kondisi lingkungan lainnya (Ahmad dkk., 2017). Sayadi, dkk (2019) menunjukkan bahwa penurunan logam berat Cu optimal pada pH 5, sedangkan untuk Cd optimal pada pH 6.

Suhu juga merupakan parameter penting yang memengaruhi proses penyerapan. Perubahan suhu mengubah parameter termodinamika, menghasilkan

variasi dalam kapasitas penyerapan. Pengaruh suhu pada proses penyerapan bergantung pada sifatnya. Dalam penyerapan proses endotermik, peningkatan suhu menyebabkan meningkatnya biosorpsi. Namun, peningkatan suhu menurunkan biosorpsi dalam kasus penyerapan eksotermik (Zeraatkar dkk., 2016).

Menurut Derco dan Vrana (2018), adsorpsi merupakan reaksi eksoterm dimana melalui reaksi ini terjadi pelepasan panas, selain itu ketika banyaknya molekul suatu adsorbat menempel di suatu permukaan adsorben terjadilah pembebasan sejumlah energi. Hal inilah yang menggolongkan adsorpsi bersifat eksoterm. Ketika suhu rendah atau menurun maka kemampuan adsorpsi nantinya akan meningkat dan adsorbat akan bertambah.

Penelitian Ahmad dkk. (2018) menunjukkan bahwa biosorpsi maksimum Fe (II) 129,83, Mn (II) 115,90 dan Zn (II) 105,29 mg/g dicapai dengan biomassa mikroalga amobil Ca-alginat pada suhu 25 °C. Hasil penelitian Kumar., dkk (2020) menunjukkan hasil bahwa pada proses biosorpsi merkuri dipelajari melalui percobaan batch suhu 35 °C dengan memperhatikan pengaruh waktu kontak, konsentrasi awal merkuri, pH dan desorpsi.

Waktu kontak biosorben memengaruhi total biosorpsi. Peningkatan waktu kontak hingga waktu kontak optimal akan meningkatkan biosorpsi; namun setelah itu menjadi biosorpsi akan relatif konstan. Waktu kontak optimal berbeda untuk berbagai jenis biosorben, seperti 60 menit untuk biomassa bebas (Sayadi dkk., 2019) dan 300 menit untuk biomassa terimobilisasi (Ahmad dkk., 2017).

Kompleksitas dari suatu limbah juga dapat memengaruhi proses biosorpsi. Limbah yang memiliki karakter lebih kompleks dibandingkan limbah buatan dari senyawa murni mampu menghambat kinerja

bisorben terutama jika biomassa hidup (*living cells*) dalam mengadsorpsi logam berat. Maka dari itu, diperlukan uji karakteristik limbah terlebih dahulu sebelum nantinya diberi perlakuan menggunakan biosorben. Selain itu kemampuan adaptasi mikroalga dipengaruhi oleh kandungan organik dan anorganik dalam media yang digunakan sebagai sumber nutrisi ataupun sebagai nutrisi pembatas bagi pertumbuhan mikroalga. Jika kandungan limbah jumlahnya terlalu besar (kompleks) maka proses reduksi senyawa baik itu organik maupun anorganik serta pertumbuhan mikroalga akan terhambat dikarenakan toksisitasnya terlalu tinggi sehingga menyebabkan kematian mikroalga dan dapat mematikan mikroalga (Derco dan Vrana, 2018).

Faktor lainnya, yaitu konsentrasi awal ion logam atau adsorbat. Jika dalam suatu larutan terdapat adsorbat dengan konsentrasi yang tinggi, maka akan ada semakin banyak substansi yang terkumpul di permukaan adsorben (Do, 1998). Sedangkan

menurut Derco dan Vrana (2018), konsentrasi awal memberi kekuatan pendorong penting dalam perpindahan logam antara adsorben dan adsorbat. Persentase optimal penghilangan logam terjadi pada konsentrasi logam awal yang rendah. Dengan demikian, pada konsentrasi biosorben tertentu, penyerapan logam dapat meningkat dengan meningkatnya konsentrasi awal biosorbat.

SIMPULAN

Kemampuan menyerap ion logam yang tinggi, biaya budidaya yang rendah, selektivitas logam, dan sifat sel yang cocok untuk produksi skala besar menjadikan mikroalga sebagai pilihan yang cocok untuk bioremediasi logam berat. Mikroalga dengan genus *Chlorella* memiliki kemampuan lebih baik untuk mengurangi konsentrasi logam berat dalam air limbah. Pemanfaatan biomassa mikroalga secara bebas maupun terimobilisasi lebih efisien daripada mikroalga hidup dalam menurunkan kadar logam berat.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, A., Bhat, A. H. dan Buang, A. 2017. Biosorption of transition metals by freely suspended and Ca-alginate immobilized with *Chlorella vulgaris*: kinetic and equilibrium modeling. *Journal of Cleaner Production* 171 : 1361 – 1375. DOI: 10.1016/j.jclepro .2017.09.252.
- Alam, A. dan Wang, Z. 2019. *Microalgae Biotechnology for Development of Biofuel and Wastewater Treatment*. Springer, Singapore.
- Alam, A., Wan, C., Zhao, X. Q., Chen, L. J., Chang, J. S., dan Bai, F. W. 2015. Enhanced removal of Zn^{2+} dan Cd^{2+} by the flocculating *Chlorella vulgaris* JSC-7. *Journal of Hazardous Materials* 289 : 38 – 45. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015 .02.012.
- Derco, J. dan Vrana, B. 2018. *Biosorption*. IntechOpen, United Kingdom. Hal. 1 - 21.
- Do, D. D. 1998. *Adsorption Analysis : Equilibria and Kinetics*. Imperial College Press, United Kingdom.
- Jankowska, E., Sahu, A.K., Oleskowicz-Popiel, P., 2017. Biogas from microalgae: review on microalgae's cultivation, harvesting and pretreatment for anaerobic digestion. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 75 : 692–709. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.045.

- Kumar, M., Singh, A. K. dan Sikandar, M. 2020. Biosorption of Hg (II) from aqueous solution using algal biomass: kinetics and isotherm studies. *Heliyon* 6 (1) : 1 – 10. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03321.
- Lalhmunsiamaa., Gupta, P. L., Jung, H., Tiwari, D., Kong, S. H., dan Lee, S. K. 2016. Insight into the mechanism of Cd(II) and Pb(II) removal by sustainable magnetic biosorbent precursor to *Chlorella vulgaris*. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 71 : 1 – 8. DOI:10.1016/j.jtice.2016.12.007.
- Li, H., Zhang, Y., Liu, J., Shen, Z., Li, A., Ma., T., Feng, Q., dan Sun, Y. 2019. Treatment of high-nitrate wastewater mixtures from MnO₂ industry by *Chlorella vulgaris*. *Bioresource Technology* 291 : 121 – 836. DOI:10.1016/j.biortech.2019 .121836.
- Li, Y., Song, S., Xia, L., Yin, H., Meza, J. V. G., dan Ju, W. 2018. Enhanced Pb(II) removal by algalbased biosorbent cultivated in high-phosphorus cultures. *Chemical Engineering Journal* 361 : 167 – 179. DOI: 10.1016/j.cej.2018.12.070.
- Moreira, V. R., Lebron, Y. A. R., Freire, S. J., Santos, L. V. S., Palladino, F., dan Jacob, R. S. 2019. Biosorption of copper ions from aqueous solution using *Chlorella pyrenoidosa*: Optimization, equilibrium and kinetics studies. *Microchemical Journal* 145 : 119 – 129. DOI: 10.1016/j.microc.2018.10.027.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia, 2021, PP Nomor 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan Dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2021 Nomor 32, Jakarta
- Petrovic, A. dan Simonic, M. 2016. Removal of heavy metal ions from drinking water by alginate-immobilized *Chlorella sorokiniana*. *International Journal Environment Science Technology* 13 : 1761 – 1780. DOI; 10.1007/s13762-016-1015-2.
- Podder, M. S. dan Majumder, C. B. 2015. Phycoremediation of arsenic from wastewaters by *Chlorella pyrenoidosa*. *Groundwater for Sustainable Development* 1 : 78 – 91. DOI: 10.1016/j.gsd.2015.12.003.
- Pratiwi, R. dan Prinajati, D. P. S. 2018. Adsorption of lead removal by chitosan from shrimp shells. *Indonesian Journal of Urban Environmental Technology* 2 (1) : 35 – 46. DOI: 10.25105/urbanenvirotech.v2i1.3554.
- Purchase, D. 2016. *Fungal Biology : Fungal Applications in Sustainable Environment Biotechnology*. Springer, London. Hal. 146 - 147.
- Qin, Y. 2018. *Bioactive Seaweeds For Good Applications: Natural Ingredients for Healthy Diets*. Academic Press, United States. Hal. 259 - 261.
- Raheem, A., Wan Azlina, W.A.K.G., Taufiq Yap, Y.H., Danquah, M.K., dan Harun, R. 2015. Optimization of the microalgae *Chlorella vulgaris* for syngas production using central composite design. *RSC Adv.* 5 DOI:10.1039/c5ra10503jomer.
- Rugnini, L., Gosta, G., Congestri, R., dan Bruno, L. 2017. Testing of two different strains of green microalgae for Cu and Ni removal from aqueous media. *Science of the Total Environment* 601 – 602 : 059 – 967. DOI:10.1016/j.scitotenv .2017.05.222.
- Saavedra, R., Munoz, R., Taboada, M. E., dan Balado, S. 2019. Influence of organic matter and CO₂ supply on bioremediation of heavy metals by *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus almeriensis* in a multimetallic matrix. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 182 : 109 – 393. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.109393.

- Saavedra, R., Munoz, R., Taboada, M. E., Vega, M., dan Balado, S. 2018. Comparative uptake study of arsenic, boron, copper, manganese and zinc from water by different green microalgae. *Bioresource Technology* 263 : 49 – 57. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.04.101.
- Saleh, H. E. D. M. dan Aglan, R. F. 2018. *Heavy Metals*. IntechOpen, United Kingdom. Hal. 1 - 13.
- Sayadi, M. H., Raskhi, O. dan Shahri, E. 2019. Application of modified *Spirulina platensis* and *Chlorella vulgaris* powder on the adsorption of heavy metals from aqueous solutions. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 7 : 1 – 9. DOI: 10.1016/j.jece.2019.103169.
- Sergio A. Covarrubias, Luz E. de-Bashan, Manuel Moreno, Yoav Bashan, 2011, Alginate beads provide a beneficial physical barrier against native microorganisms in wastewater treated with immobilized bacteria and microalgae, *Appl Microbiol Biotechnol* (2012) 93:2669–2680 DOI 10.1007/s00253-011-3585-8
- Sheekh, M. E., Sabagh, S. E., Souod, G. A. E., dan Elbeltagy, A. 2019. Biosorption of cadmium from aqueous solution by free and immobilized dry biomass of *Chlorella vulgaris*. *International Journal of Environmental Research* 13 (5) : 511 – 521. DOI: 10.1007/s41742-019-00190-z.
- Sun, R., Yang, J., Xia, P., Wu, S., Lin, T., dan Yi, Y. 2020. Contamination features and ecological risks of heavy metals in farmland along shoreline of Caohai plateau wetland, China. *Chemosphere* 254 : 1 – 9. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.126828.
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., dan Sutton, D. J. 2012. *Heavy Metals Toxicity and Environment*. Jackson State University, USA. Hal 2-3, 13.
- Urrutia, C., Mansilla, E. Y. dan Jeison, D. 2019. Bioremoval of heavy metals from metal mine tailings water using microalgae biomass. *Algal Research* 43 : 1 – 9. DOI: 10.1016/j.algal.2019.101659.
- Valdez, C., Perenguez, Y. dan Matyaz, B. 2018. Analysis of removal of cadmium by action immobilized *Chlorella* sp. micro-algae in alginate beads. *F1000Research* 7 (54) : 1 – 8. DOI: 10.12688/f1000research.13527.1.
- Vasilieva, S. G., Lobakova, E. S, Lukyanov, A. A., dan Solovchenko, A. E. 2016. Immobilized microalgae in biotechnology. *Moscow University Biological Science Bulletin* 71 (3) : 170 - 176. DOI: 10.3103/s0096392516030135.
- Vidyalaxmi., Kaushik, G. dan Raza, K. 2019. Potential of novel *Dunaliella salina* from sambhar salt lake, India, for bioremediation of hexavalent chromium from aqueous effluents: An optimized green approach. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 180 : 430 – 438. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.05.039.
- Yaghmaeian, K. dan Jaafari, J. 2018. Optimization of heavy metal biosorption onto freshwater algae (*Chlorella coloniales*) algae cells using response surface methodology (RSM). *Chemosphere* 217 : 447 – 455. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.10.205.
- Zeraatkar, A. K., Ahmadzadeh, H. dan Talebi, A. F. 2016. Potential use of algae for heavy metal bioremediation, a critical review. *Journal of Environmental Management* 181 : 917 – 931 DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.06.059.
- Zhang, J., Zhou, F., Liu, Y., Huang, F., dan Zhang, C. 2019. Effect of extracellular polymeric substances on arsenic accumulation in *Chlorella pyrenoidosa*. *Science of The Total Environment* 13 : 53 - 68. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.135368.