

BIOREMEDIASI LOGAM BERAT OLEH FUNGI LAUT

Syafrina Sari Lubis^{1*}

¹Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Ar-Raniry

*E-mail: syafrinasarilbs@gmail.com

Abstract: *Heavy metals are compounds that have high toxicity and can cause serious health problems for humans and pose a serious threat to the sustainability of the ecosystem. Prokaryota microorganisms and eukaryotes have the ability to process bioremediation of heavy metals in the environment. Marine fungi as eukaryotic microbes that have high species diversity. The ability to live in marine fungi is influenced by environmental factors that differ from the terrestrial environment such as temperature, pressure, and salinity. Marine fungi have a characteristic structure of metabolites and their ability to bioremediate heavy metals in various processes, namely bioaccumulation, biomineralization, biosorption, and biotransformation. Bioremediation of heavy metals by marine fungi is related to the composition of cell wall structures that have many crosslinking polysaccharides (chitin, chitosan, glucans), glucuronic acid, galactosamine, a small amount of glycoprotein, together with melanin and phenolic polymers containing phenolic units, peptides, fatty acids, which provides quite a lot of oxygen-containing groups such as carboxyl, carbonyl, amino, hydroxyl, phosphate, methoxy and mercapto which are potentially metal binding sites.*

Keywords: *Bioremediation, heavy metals, marine fungi*

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. Mikroorganisme prokaryota dan eukaryota memiliki kemampuan dalam proses bioremediasi logam berat dilingkungan. Fungi laut sebagai mikroba eukaryot yang memiliki keanekaragaman spesies yang tinggi. Kemampuan hidup fungi laut dipengaruhi oleh faktor lingkungan yang berbeda dengan lingkungan darat seperti suhu, tekanan, dan salinitas. Fungi laut memiliki struktur senyawa metabolit yang khas dan kemampuan dalam proses bioremediasi logam berat dalam berbagai proses yaitu bioakumulasi, biomineralisasi, biosorpsi, dan biotransformasi. Bioremediasi logam berat oleh fungi laut berkaitan dengan komposisi struktur dinding sel yang memiliki banyak ikatan silang polisakarida (kitin, kitosan, glukon), 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 merkapto yang berpotensi situs pengikatan logam.

Kata Kunci: Bioremediasi, logam berat, fungi laut

PENDAHULUAN

Aktivitas antropogenik dan pengaruh faktor alam menyebabkan terjadinya peningkatan berbagai jenis polutan pada lingkungan. Polutan berupa logam berat merupakan ancaman bagi kesehatan manusia, hewan, tumbuhan dan ancaman bagi keberlangsungan ekosistem. Polutan organik dan polutan anorganik menyebabkan permasalahan serius bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Beberapa polutan mengandung logam berat, metalloid, radionuklida. Logam berat memiliki toksisitas yang tinggi, non-biodegradabilitas. Untuk mengatasi permasalahan polusi logam berat dapat dilakukan dengan immobilisasi, transfer dan detoksifikasi logam berat dari lingkungan dengan bioremediasi menggunakan mikroorganisme (Fomina & Gadd, 2014).

Sumber Logam berat (Pb, Zn, Cd, Cr, Cu, Ni) dialam ada 2 yaitu berasal dari alam dan aktivitas antropogenik. Diperkirakan 80% logam berat yang berasal dari aktivitas alam berasal dari bahan kerak bumi yang mengalami pelapukan, dan berasal dari aktivitas vulkanik. 10% logam berat berasal dari kebakaran hutan dan sumber biogenik lainnya. Data US Geological Survey (2013), emisi alami dari enam logam berat tersebut adalah 12 000 (Pb); 45 000 (Zn); 1400 (Cd); 43.000 (Cr); 28.000 (Cu); dan 29.000 (Ni) metrik ton per tahun, masing-masing. Logam berat yang berasal dari aktivitas antropogenik berasal dari pertambangan, industri cat, industri pupuk dan pestisida.

Kriteria toksik logam berat antara lain; a). toksisitas dapat bertahan lama di alam, b). Bioakumulasi dan biosorpsi logam menyebabkan terjadinya kerusakan fisiologis bagi makhluk hidup, c). logam hanya dapat bertransformasi valensi, tetapi tidak dapat didegradasi dengan metode apa pun termasuk biotreatment, d). toksisitas logam berat terjadi pada konsentrasi rendah 1,0-10 mg / L. (Wang & Chen, 2006).

Bakteri, Fungi, dan Alga merupakan mikroorganisme yang sering digunakan dalam bioremediasi logam berat.

Penggunaan mikroorganisme dalam bioremediasi merupakan pilihan yang menarik karena memiliki efisiensi tinggi, biaya rendah, kapasitas adsorpsi tinggi dan bersifat ramah lingkungan. Beberapa mikroorganisme ada yang bersifat resisten terhadap logam berat.

Mobilitas dan bioavailabilitas polutan ini dikendalikan oleh banyak proses kimia dan biokimia seperti presipitasi, penyerapan / desorpsi, kompleksasi / disosiasi dan oksidasi / reduksi. Peningkatan konsentrasi logam berat dan metaloid di lingkungan secara langsung akan mempengaruhi keanekaragaman mikroba, struktur komunitas dan aktivitas metabolisme, menyebabkan hilangnya spesies yang rentan, dan peningkatan toleran spesies atau peningkatan ekspresi mekanisme resistensi (Lima *et al.*, 2018).

Berdasarkan peran dan dampak biologis pada mikroorganisme logam dan metaloid dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kategori yaitu; 1). Logam esensial (Na, Ca, K, Mn, Mg, V, Fe, Cu, Co, Mo, Ni, Zn, dan W), logam ini diperlukan dalam proses biologis dalam jumlah yang kecil, tetapi bila jumlah ionnya meningkat dapat berubah menjadi beracun, 2). Logam beracun (Ag, Sn, Cd, Au, Ti, Hg, Pb, Al dan metaloid Ge, Sb, As, dan Se), tidak memiliki peran biologis dan dapat mengganggu proses seluler, 3). Logam non esensial (Rb, Sr, Cs, dan T), logam tidak memiliki peran biologis yang jelas dan tidak memiliki toksisitas (Prabhakaran *et al.*, 2016),

Berbagai teknik remediasi telah dilakukan untuk memperbaiki kondisi lingkungan yang tercemar logam berat. Proses perbaikan lingkungan yang tercemar dengan menggunakan makhluk hidup atau bioremediasi menjadi sebuah pilihan yang baik. Bioremediasi adalah teknik inovatif untuk menghilangkan dan memperbaiki ion logam berat menjadi bentuk yang lebih ringan dengan penggunaan organisme hidup seperti Bakteri, Fungi, Algae dan Tanaman (Dixit, *et al.*, 2015).

Keuntungan utama dari metode biologis ini adalah pengoperasian yang rendah biaya, selektivitas untuk remediasi logam tertentu, minimalisasi volume

lumpur kimia dan biologi, dan efisiensi tinggi dalam detoksifikasi. Mikroorganisme memiliki peran yang penting dan strategis dalam bioremediasi. Bakteri, Fungi, Alga pada beberapa penelitian menunjukkan kemampuan resisten terhadap beberapa jenis logam berat melalui berbagai proses dalam selnya.

MEKANISME BIOREMEDIASI LOGAM BERAT OLEH FUNGI

Remediasi mikroba digambarkan sebagai penggunaan mikroorganisme untuk melakukan penyerapan, presipitasi, oksidasi, dan reduksi logam berat di dalam tanah. Mikroorganisme memiliki jalur metabolisme yang memanfaatkan berbagai senyawa beracun sebagai sumber energi untuk pertumbuhan dan perkembangan, melalui respirasi, fermentasi, dan ko-metabolisme. Bioremediasi ion logam berat adalah untuk meminimalkan toksisitasnya. Yina *et al.* (2019), mikroorganisme dapat mengikat ion logam berat melalui gugus fungsi yang dimiliki dan dapat mengubah logam berat dari bentuk kompleks menjadi lebih sederhana melalui melalui reaksi redoks, toksisitas logam berat ion dapat berkurang secara efisien.

Mikroba memiliki enzim degradatif untuk kontaminan tertentu, dan mengembangkan beragam mekanisme untuk mempertahankan homeostasis dan tahan terhadap logam berat, serta mampu beradaptasi pada lingkungan tersebut. Mekanisme yang dimiliki oleh mikroba dalam proses bioremediasi antara lain bioakumulasi, biomineralisasi, biosorpsi, dan biotransformasi (Ayangbenro & Babalola, 2017).

Mekanisme toleransi logam terdiri dari dua jenis: ekstraseluler dan intraseluler. Mekanisme ekstraseluler terjadi melalui biosorpsi dan produksi kelatin ekstraseluler, sedangkan mekanisme intraseluler terjadi melalui pompa efluks, transformasi enzimatik, produksi protein metallothionein dan fitokelatin, kompleksasi dengan glutathione intraseluler, dan

kompartmentalisasi vakuola (Lotlikar, 2019).

Beberapa faktor yang mempengaruhi dan membatasi efisiensi bioremediasi meliputi suhu, pH, potensi redoks, nutrisi pada media pertumbuhan, kelembaban, dan komposisi kimia logam berat. Mikroba memiliki mekanisme perlindungan dari resistensi logam berat yaitu matriks ekstraseluler, dan transpor aktif ion logam (eflux), sekuestrasi intraseluler, dan reduksi ion logam

Fungi dapat bertahan dan hidup pada berbagai jenis habitat, seperti tanah, lingkungan air tawar, dan lingkungan air laut. Keragaman habitat dan kemampuan untuk mengeluarkan banyak enzim menyebabkan fungi memiliki potensi sebagai agen untuk bioremediasi pada berbagai situs (Desmukh *et al.*, 2016).

Fungi mampu berkembang pada bawah pH ekstrim, suhu dan kondisi variabilitas nutrisi, serta toleransi terhadap konsentrasi logam tinggi, dengan sifat ini proses remediasi menjadi lebih efektif. Spesies fungi mengadopsi satu atau lebih strategi toleransi terhadap logam meliputi penyerapan dan ekstraksi logam ekstraseluler, masuknya tertekan, peningkatan efflux logam, produksi enzim intra-seluler/ ekstraseluler, pengikatan logam ke dinding sel, penyerapan dan kompleksasi sel intraseluler (Oladipo *et al.*, 2018). Diagram berbagai proses Bioremediasi logam oleh Fungi (Zehra *et al.*, 2018).



Gambar 1. Berbagai Proses Bioremediasi Logam Oleh Fungi (Zehra *et al.*, 2018)

Definisi dan Diversitas Fungi Laut

Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan banyak spesies fungi yang diisolasi dari lingkungan laut, merupakan kelompok yang sama dengan fungi yang diisolasi dari lingkungan teresterial atau yang diisolasi dari tanaman. Terdapat korelasi yang kuat antara kondisi lingkungan abiotik dan gen data ekspresi yang menunjukkan bahwa setidaknya beberapa fungi menunjukkan kemampuan hidup pada kedua lingkungan (amfibious) yaitu laut dan teresterial.

Studi filogenetik menunjukkan bahwa banyak garis keturunan organisme laut yang merupakan organisme yang pindah dari organisme leluhur teresterial. Plastisitas ekologis fungi ini mendefinisikan pengertian fungi laut dalam 3 hal yaitu: 1) fungi laut merupakan organisme yang mampu tumbuh dan / atau berspora (pada substrata) di lingkungan laut; 2) fungi laut membentuk hubungan simbiosis dengan organisme laut lainnya; atau 3) fungi laut menunjukkan kemampuan beradaptasi dan berevolusi pada tingkat genetik atau menjadi aktif secara metabolik di lingkungan laut (Amend *et al.*, 2019)

Laut merupakan habitat yang memiliki sumber sedimen, air laut, habitat laut, serasah, dan ganggang. Fungi laut dapat diisolasi keanekaragaman yang tinggi. Balabanova *et al.* (2017), fungi laut tersebar pada dari berbagai substrat seperti invertebrat, dan detritus mangrove. Fungi laut memiliki sebaran geografis yang luas mulai dari iklim tropis dan subtropis dan bersifat kosmopolitan. Komunitas mikroba laut berperan secara ekologis dalam penyediaan energi, siklus nutrisi, dan dekomposer bahan organik. Fungi laut memiliki potensi sebagai sumber enzim bagi lingkungan dan industri. Beberapa enzim yang dihasilkan fungi laut antara lain, enzim hidrolitik, enzim oksidatif, alginateliase, amylase, selulase, kitinase, glukosidase, inulinase, keratinase, lignilase, lipase, nuklease, fitase, protease, xylanase (Santos *et al.*, 2015).

Dalam 5 tahun terakhir fungi laut telah berhasil diklasifikasikan menjadi

1.112 spesies (472 genus), 805 spesies *Ascomycota* (352 genus), 21 Spesies *Basidiomycota* (17 genus), *Chytridiomycota* dan filum yang terkait terdiri 26 spesies (13 genus), *Zygomycota* terdiri dari 3 spesies (2 genus), 1 spesies *Blastocladiomycota*, bentuk aseksual dari fungi berfilamen terdiri 43 spesies (26 genus), dan yeast laut *Ascomycota* 138 spesies (35 genus), *Basidiomycota* 75 spesies (26). Fungi ini terdiri dari 129 famili dan 65 ordo. Famili *Halosphaeriaceae* merupakan kelompok fungi laut terbesar dengan anggota 141 spesies terdiri dari 59 genus, yang dibagi kedalam *Aspergillus* (47 spesies), *Penicillium* (39 spesies) dan yeast *Candida* (64 spesies) (Jones *et al.*, 2015).

Keanekaragaman jamur laut berkaitan erat dengan faktor biologis, fisika, dan kimia meliputi ketersediaan substrat untuk kolonisasi, sifat substrat, suhu air, pH dan salinitas (Jones & Pang, 2012). Klasifikasi taksonomi yang telah dilakukan menunjukkan aspek ekologis dan potensi kimia fungi laut yang cukup besar. Fungi laut merupakan spesies yang potensial untuk dikembangkan dalam bioremediasi logam berat. Senyawa metabolit fungi laut berbeda dan unik bila dibandingkan dengan fungi teresterial lainnya karena kemampuan fungi laut beradaptasi dengan kondisi laut.

Fungi laut beradaptasi dengan kondisi salin tinggi dan pH ekstrim sehingga secara biologis lebih unggul dari fungi teresterial. Thatoi *et al.*, (2013), berbagai riset menunjukkan potensi fungi laut sangat besar untuk dikembangkan sebagai bahan obat, enzim, biodiesel, biopestisida, dan bioremediasi. Fungi laut memiliki potensi produksi metabolit sekunder, biosurfaktan, enzim baru, polisakarida dan asam lemak tak jenuh ganda yang dapat berperan aplikasi dalam bioremediasi hidrokarbon dan berat logam. Fungi laut dapat mentolerir konsentrasi tinggi logam berat seperti timah dan tembaga (Gazem & Nazaret, 2013).



Gambar 2. Keanekaragaman Morfologi Fungi Laut-Host Biotik *Ircinia variabilis* (Amend et al., 2019)

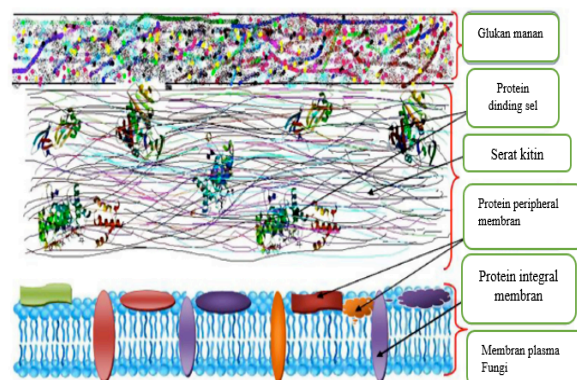
Struktur Dinding Sel Fungi dan Interaksinya dengan Logam Berat

Dinding sel merupakan bagian yang paling penting dalam interaksi fungi dengan lingkungannya. Dinding sel fungi mencapai 30% atau lebih banyak dari berat kering fungi. Strukturnya sangat kompleks mengelilingi membran plasma. Komponen utama terdiri dari polisakarida sekitar 80%, protein sekitar 3-20%, dan sisanya lipid, pigmen dan garam anorganik. Komposisi dinding sering sangat bervariasi antara spesies fungi. Dinding sel fungi miselia sebagian besar mengandung kitin, yang merupakan polimer dari n-asetilglukosamin dan dapat membentuk 25- 30% dari berat kering sel, dan dinding sel ragi mengandung sekitar 29% glukukan, 31% mannan, 13% protein, 8,5% lipid dan 3% abu (Dhankhar & Hooda, 2011).

Dinding sel fungi 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 merkaptio yang berpotensi situs pengikatan logam. 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 elektrostatik ion yang berlawanan.

Biopolimer seperti kitin dan glukukan dapat mengikat logam (Harms et al., 2011).

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. 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 elektrostatik dan logam kationik pada kompleksasi permukaan (Igiri et al., 2018). Interaksi logam dan dinding sel fungi dapat diperhatikan pada gambar berikut:



Gambar 3. Struktur Dinding Sel Fungi yang Akan Berikatan dengan Logam (Zehra et al., 2018)

Kelompok fungsional dinding sel memiliki sejumlah situs aktif yang mampu mengikat ion logam. Perbedaan komposisi dinding sel kemampuan fungi sebagai biosorben juga berbeda, sehingga jumlah dan jenis ion logam yang dapat diikat juga berbeda. Kemampuan bioremediasi fungi dan mekanismenya dapat berbeda antara spesies fungi. *R. arrhizus* konsentrasi biomassa dari 0,15 g /L – 1 hingga 0,50 g / L – 1 menunjukkan mampu menyerap (kapasitas biosorpsi) Cu sebesar 29,83 mg, dari larutan sintesis 30 mg/ L

(Dhankhar & Hooda, 2011). *Aspergillus flavus* dan *A. niger* memiliki kapasitas biosorpsi Cu (II) dan Pb (II). Kapasitas biosorpsi *A. flavus* adalah 20,75-93,65 mg g⁻¹ untuk Cu (II) dengan konsentrasi awal 200-1400 ppm. Kapasitas biosorpsi *A. niger* untuk Pb (II) berkisar antara 3,25-172,25 mg g⁻¹ dengan konsentrasi logam awal yang sama (Iram *et al.*, 2015)

Efisiensi biosorpsi logam berat oleh biomassa mikroba terutama dihubungkan dengan struktur dinding sel mikroorganisme dan akibatnya dengan sifat permukaan sel di mana struktur menentukan interaksi alami antara mikroorganisme dan kation logam. Dinding sel yeast bermuatan negatif, dan kemampuan yeast untuk mengikat kation logam berat kemungkinan karena interaksi elektrostatik. Logam berat dapat diserap oleh mikroba pada situs pengikatan pada struktur seluler tanpa keterlibatan energi (Bahafid *et al.*, 2015).

Glukan Sebagai Pengikat Logam Berat

Dinding sel fungi terdiri dari glikoprotein, kitin, dan α - dan β -glukan. Glukan adalah polimer glukosa dan diklasifikasikan sebagai polisakarida. Bersamaan dengan glikoprotein, glukan merupakan komponen dari dinding sel fungi. Senyawa ini membentuk sel fungi, menjadi penghalang, dan melindungi sel dari tekanan lingkungan. Bagian terluar lapisan dinding sel terdiri dari glikoprotein, dan di bawahnya adalah lapisan dalam, yang dibentuk oleh polimer glukosa (β -1,3-glukan, β -1,6-glukan, α -1,3-glukan dan kitin). β -glukan dihubungkan oleh ikatan kovalen dengan rantai kitin, dan jaringan ini berada di bawah lapisan glikoprotein.

Glukan adalah komponen paling banyak dari dinding sel jamur. Glukan merupakan sekelompok polimer D-Glukosa yang memiliki ikatan glikosidik, dengan konfigurasi β - dan α . β glucans paling banyak terdistribusi pada dinding sel fungi. α (1, 3) - glukan pada fungi patogen bagi manusia seperti *Cryptococcus* dan *Blastomyces* (Latha *et al.*, 2012). Lapisan (1 \rightarrow 3) - α -d-glukan

berada dibawah lapisan biopolimer, tepat di atas membran sitoplasma. Struktur dan distribusi homopolisakarida (mannan dan glukan) juga menentukan kapasitas biosorpsi logam dinding sel (Bahafid *et al.*, 2015).

Setiap spesies fungi memiliki kadar glukan yang berbeda-beda pada dinding selnya. (1 - 3) - α -D-glukan dalam hifa *Aspergillus wentii* dan jumlah yang sangat besar dalam hifa berseptata. α -glukan banyak terdapat kelas *Basidiomycetes* mencapai 44-53% dari berat kering. *Aspergillus niger* memiliki kandungan α -glukan 9%. Beberapa jenis yeast tidak memiliki α -glukan (misalnya, *Saccharomyces cerevisiae* dan *Candida albicans*) (Zlotko *et al.*, 2019).

(1 \rightarrow 3) - α -D-glukan merupakan polimer ini dengan sifat penyerapan logam yang baik. Karena memiliki permukaan yang berkembang baik, kristalinitas rendah, dan sejumlah besar gugus -OH. Mekanisme utama penyerapan logam adalah proses metabolisme-independen yang tergantung pada isi dan struktur spasial glukan yang terdapat pada di dinding sel (Nowak *et al.*, 2019). (1 \rightarrow 3) - α -d-glukan yang diisolasi dari berbagai spesies fungi, menunjukkan struktur ini merupakan sorben yang paling efektif dalam mengikat logam karena memiliki gugus fungsional di permukaan, yang mengandung oksigen (Zlotko *et al.*, 2019).

Protein Sebagai Pengikat Logam Berat

Protein merupakan komponen kecil dari dinding sel jamur, dengan jumlah berkisar dari 3% hingga 20% dari berat kering, kecuali pada beberapa spesies yaitu *Chaetomium globosum*, *Penicillium notatum* dan *Paracoccidioides brasiliensis* mengandung protein sebanyak 30%. Protein dinding sel tidak memiliki ciri khas dalam ukuran atau sifat hidrofobik untuk membedakannya dari protein intraseluler (Latha *et al.*, 2012).

Jika permukaan sel hidup jenuh dengan spesies logam, maka logam akan menembus ke bagian dalam sel melalui saluran ion. Logam yang terikat akan terimobilisasi di dalam sel atau dipompa

keluar dari sel. Logam dapat terpisah oleh kelator intraseluler berupa protein glutathione (GSH), metallothionein (MT) dan fitokelatin (PCs), atau terperangkap dalam organel seperti vakuola sebagai pertahanan mekanisme sel melawan racun. Kelasi logam akan disertai dengan peningkatan metabolisme sistein yang merupakan prekursor kelator logam. Dengan cara ini, pengurangan konsentrasi logam bebas dalam sitoplasma untuk mencegah kerusakan sel lebih lanjut, disertai dengan peningkatan tingkat spesies logam intraseluler secara keseluruhan. Detoksifikasi ini memungkinkan spesies logam terbentuk dipompa keluar melalui pompa efflux membran, menghasilkan penurunan kadar logam intraseluler (Yang *et al.*, 2016).

Metallothioneins adalah protein pengikat logam yang dapat memodulasi konsentrasi dan intraseluler ikat kedua logam esensial seperti Cu dan Zn dan logam tidak penting seperti Cd. Imobilisasi logam intraseluler melibatkan dua proses yaitu kompartemen dan kompleksasi vakuola oleh protein sitoplasma, disebut metallothioneins dan fitokelatin. Vakuola pada fungi memiliki peran penting dalam degradasi molekul, penyimpanan metabolit, pengaturan konsentrasi sitosol ion logam dan mendetoksifikasi ion logam yang berpotensi toksik (Siddiquee *et al.*, 2015).

Metallothioneins (MTs) juga berperan dalam menjaga homeostasis logam. Fungsi metallothioneins pada fungi oportunistik *Fusarium oxysporum*, menunjukkan adanya metallothioneins yang memiliki beberapa elemen responsif logam pada bagian promotornya dan memiliki sistein dalam urutan pengkodeannya. Protein ini pada spesies *Cryptococcus neoformans* dan *Candida albicans* berperan dalam resistensi terhadap Cu. Kemampuan pengikatan logam pada MTs dapat terjadi melalui mekanisme reservoir logam esensial, serta perlindungan terhadap kelebihan ion logam dan oksidasi radikal bebas (Lorenzo-Gutiérrez *et al.*, 2015).

Kitin sebagai Situs Pengikat Logam

Kitin dapat menjadi bahan biosorben yang efektif untuk logam dan radionuklida, seperti halnya kitosan dan derivat kitin lainnya. Polimer fenolik dan melanin pada fungi memiliki banyak situs pengikatan logam potensial dengan oksigen-mengandung kelompok termasuk karboksil, fenolik dan alkohol gugus hidroksil, karbonil, dan metoksil.

Kitin merupakan polimer alami yang mampu menyerap logam merkuri dengan kapasitas tinggi yang lebih tinggi mengikuti spesifisitas merkuri yang lebih tinggi oleh senyawa dengan gugus amino. Studi desorpsi menunjukkan bahwa sekali ikatan merkuri dengan kitin terbentuk, logam tidak mudah dilepaskan dari sorben. Hal ini karena adanya asam hidroklorik, pada konsentrasi asam pada tingkat sedang (0,5 mol l) dapat digunakan untuk pemulihan logam dan regenerasi kitin. Kitin memiliki kapasitas serapan merkuri yang lebih rendah daripada turunannya yang mengalami deasetilasi (Barriada *et al.*, 2008).

Biomassa Fungi dan Eksopolisakarida (EPS) sebagai Pengikat Logam Berat

Sel kering fungi menunjukkan kemampuan menghilangkan logam berat yaitu: Zn (II) (100%), Hg (II) (83,2%), Fluor (I) (83%), dan Co (II) (71,4%), dan kurang efisien pada Ag (I) (48%) dan Cu (37%). Sel kering fungi dapat menjadi akumulator logam yang efektif. Selain itu dapat juga menggunakan biomassa fungi sebagai biosorben untuk mengikat logam berat (Rodriguez *et al.*, 2018).

Biomassa fungi juga merupakan bahan biosorben untuk bioremediasi logam pada perairan, karena biomassa ini mudah tumbuh dan tersedia banyak sebagai limbah industri produk, mis. *A. niger* (produksi asam sitrat) dan *S. cerevisiae* (Fomina & Gadd, 2014). Mekanisme yang terlibat dalam detoksifikasi fungi pada lingkungan yang terkontaminasi logam berat yaitu transformasi valensi, endapan intra dan ekstraseluler serta serapan aktif.

Kandungan karboksil tinggi dalam asam mannuronik dan guluronik pada dinding sel polisakarida dapat meningkatkan biosorpsi logam berat.

Polisakarida ekstraseluler atau Eksopolisakarida (EPS) merupakan metabolit sekunder mikroba dengan berat molekul tinggi. EPS tidak hanya diproduksi oleh bakteri, tetapi jamur memiliki substansial kemampuan untuk menyediakannya. Pembentukan EPS oleh fungi lebih baik bila dibandingkan dengan bakteri adalah karena sifatnya yang beragam. Keragaman morfologi fungi membuatnya dapat beradaptasi pada suhu ekstrim, pH, dan konsentrasi logam tinggi.

Polisakarida fungi diklasifikasikan ke dalam beberapa kelompok yang berbeda menurut afinitas sistematis, struktur (linier dan bercabang), komposisi gula (homo dan heteropolisakarida), jenis ikatan antara monomer (β -(1 \rightarrow 3), β -(1 \rightarrow 6), dan α -(1 \rightarrow 3)) dan letaknya pada sel (polisakarida, eksopolisakarida, dan endopolisakarida). EPS memiliki fungsi yang berbeda sesuai dengan kedudukan ekologis fungi pada habitatnya (Jaroszuk *et al.*, 2015).

EPS dikeluarkan pada permukaan sel karena keberadaan logam berat beracun di lingkungan dan berfungsi melindungi mikroorganisme terhadap potensi kerusakan yang ditimbulkan oleh logam berat. Kompleksasi, pertukaran ion, mikro-presipitasi permukaan merupakan proses penting untuk mengikat logam berat pada EPS. Afinitas pengikatan logam ini tergantung pada komposisi EPS, ketersediaan berbagai situs pengikatan pada permukaan atau pori-pori EPS.

Logam berat membentuk kompleks organo-logam melalui ikatan dengan polisakarida, fosfolipid dan protein yang memiliki gugus hidroksil, karboksil dan gugus amina fosfat yang mengandung EPS. Kompleksasi disebabkan oleh pembentukan interaksi hidrofilik antara kelompok logam berat dan karboksilat / fosfat EPS. Interaksi hidrofobik membantu untuk melekatkan logam berat pada permukaan EPS. Aplikasi EPS di bidang makanan, industri farmasi, herbisida dan kosmetik, dan dalam bioremediasi air dan

tanah yang tercemar logam berat. (Raj K *et al.*, 2018).

KESIMPULAN

Bioremediasi adalah teknik menghilangkan dan memperbaiki ion logam berat menjadi bentuk yang lebih ringan dan berkurang derajat toksisitasnya, dengan menggunakan organisme hidup seperti Bakteri, Fungi, Algae dan Tanaman. Fungi laut memiliki struktur senyawa metabolit yang khas dan kemampuan dalam proses bioremediasi logam berat dalam berbagai proses yaitu bioakumulasi, biomineralisasi, biosorpsi, dan biotransformasi.

Fungi laut memiliki peranan penting dalam bioremediasi air limbah dan tanah yang terkontaminasi logam berat. Tiga strain dari *Mucor hiemalis* yang diisolasi dari perairan secara fisiologis kompatibel dan mampu melakukan remediasi pada berbagai jenis metal. Strain tersebut bersifat resisten pada berbagai jenis logam, hiper-akumulasi dan memiliki kekuatan elisitasi, sehingga berpeluang besar untuk dikembangkan dalam bioteknologi penghilangan, fraksinasi dan pengayaan ion logam secara simultan. Spora *Mucor hiemalis* dapat berkecambah dan dinding sel tidak mati. Isolat ini juga mampu menghilangkan Al, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, U hingga > 81-99% (Hoque & Fritscher, (2019). Genus *Aspergillus* dan *Penicillium* yang diisolasi dari air laut dan sedimen menunjukkan kapasitas penyerapan Cadmium (Cd) yang cukup signifikan pada media Potato Dextrosa Agar yang mengandung Cd dengan konsentrasi 25, 50, 75, dan 100 ppm, efisiensi penyerapan *Penicillium* sekitar 11,46%, *Aspergillus* sekitar 10-13, 87% (Manguilimotan & Bitacur, 2018).

Perlu beragam eksplorasi mendalam untuk mendapatkan spesies fungi laut yang memiliki potensi besar dalam bidang bioremediasi pada masa yang akan datang, karena kerusakan lingkungan akibat logam berat merupakan

permasalahan serius bagi kelangsungan ekosistem dan kehidupan manusia.

DAFTAR RUJUKAN

- Amend A., Burgaud G, Cunliffe M, Edgcomb V. P. Ettinger C. L., Gutierrez M. H., Heitman J, Hom E. F. Y., Laniri G., Jones A. C, Kagami M., Picard K. T., Quandt C. A., Raghukumar S., Riquelme M., Stajich J., Muniz J. V., Walker A. K., Yarden O, & Gladfelter A. S. (2019). Fungi in the Marine Environment: Open Questions and Unsolved Problems. *Ecological and Evolutionary Science Issue 2, 10*, 1-15. doi: 10.1128/mBio.01189-18. mbio.asm.org
- Ayangbenro, A.S., dan Babalola, O. O., (2015). Review: A New Strategy for Heavy Metal Polluted Environments: A Review of Microbial Biosorbents. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 14, 94, 1-16. doi:10.3390/ijerph14010094
- Bahafid W., Joutey N.T., Asri M., Sayel H., Tirry N., & Ghachtouli N.E. (2015). Yeast Biomass: An Alternative for Bioremediation of Heavy Metals. 269-289 <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.70559>
- Balabanova, L., Slepchenko, L., Son, O., Tekutyeva, L. (2018). Biotechnology Potential of Marine Fungi Degrading Plant and Algae Polymeric Substrates. *Frontiers in Microbiology*, 9, 1527, 1-15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01527>
- Barriada J. L., Herrero R., Rodríguez D. P, Sastre de Vicente M.E.S. (2008). Interaction of mercury with chitin: A physicochemical study of metal binding by a natural biopolymer. *Reactive & Functional Polymers*, 68, 1609–1618. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2008.09.002>
- Dhankhar R., & Hooda A., (2011). Fungal biosorption – an alternative to meet the challenges of heavy metal pollution in aqueous solutions, *Environmental Technology*, 32:5, 467-491. doi: 10.1080/09593330.2011.572922
- Damare S, Singh P, & Raghukumar S., (2012) Biotechnology of marine fungi. *Prog Mol Subcell Biol* 53, 277–297. doi:10.1007/978-3-642-23342-5_14
- Deshmukh, R., Khardenavis, A.A., Purohit, H.J., 2016. Diverse Metabolic Capacities of Fungi for Bioremediation. *Indian J Microbiol*, 56, 247–264. doi: 10.1007/s12088-016-0584-6
- Dixit, R.; Malaviya, D.; Pandiyan, K.; Singh, U.B.; Sahu, A.; Shukla, R.; Singh, B.P.; Rai, J.P.; Sharma, P.K.; Lade, H. (2015). Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: An overview of principles and criteria of fundamental processes. *Sustainability*, 7, 2189–2212. doi.org/10.3390/su7022189
- Fomina, M., & Gadd, G.M. (2014). Biosorption: current perspectives on concept, definition and application. *Bioresource Technology*, 160, 3-14. doi: 10.1016/j.biortech.2013.12.102.
- Gazem MAH & Nazareth S (2013) Sorption of lead and copper from an

- aqueous phase system by marine-derived *Aspergillus* species. *Ann Microbiol*, 63, 503–511. doi:10.1007/s13213-012-0495-7
- Harms H., Schlosser D., & Wick L.Y., (2011). Untapped Potential: Exploiting Fungi in Bioremediation of Hazardous Chemicals. *Nature Reviews, Microbiology*, 9, 177-192 doi:10.1038/nrmicro2519
- Hoque E., & Fritscher J., (2019). Multimetal bioremediation and biomining by a combination of new aquatic strains of *Mucor hiemalis*. *Scientific Reports*, 9, 10318,1-16 doi.org/10.1038/s41598-019-46560-7
- Iram S., Shabbir R., Zafar H., Javaid M. (2015). Biosorption and Bioaccumulation of Copper and Lead by Heavy Metal-Resistant Fungal Isolates. *Arab J Sci Eng*, 40:1867–1873. doi: 10.1007/s13369-015-1702-1
- Igiri B.I, Okoduwa S.I.R., Idoko G.O., Akabuogu E.P., Adeyi A.O., Ejiogu I.K., (2018). Toxicity and Bioremediation of Heavy Metals Contaminated Ecosystem from Tannery Wastewater: A Review. *Journal of Toxicology*, 2018, 1-16, <https://doi.org/10.1155/2018/2568038>
- Jaroszuk M. O., Wilkołazka A. J., Jaroszuk-S'ciseł J., Szałapata K., Nowak A., Jaszek M., Ozimek E., Majewska M. (2015). Extracellular polysaccharides from Ascomycota and Basidiomycota: production conditions, biochemical characteristics, and biological properties. *World J Microbiol Biotechnol*, 31, 1823–1844. DOI 10.1007/s11274-015-1937-8
- Jones, E.B. Gareth., dan Pang, Ka-Lai. (2012). *Marine Fungi and Fungal-like Organisms*. Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, Berlin/Boston
- Jones, G., Suetrong, S., Sakayaroj, S., Bahkali, A.H., Wahab, A.A.A., Boekhout, T., & Pang, K.L. (2015). Classification of marine Ascomycota, Basidiomycota, Blastocladiomycota and Chytridiomycota. *Fungal Diversity*, 1-72, DOI 10.1007/s13225-015-0339-4
- Latha J.N.L., Babu P.N., Rakesh P., Kumar K.A., Anupama M., & Susheela L. (2012). Fungal cell wall as protective barriers for toxic metals. *Advances in Medicine and Biology*. Volume 53, Chapter VIII, 181-198 ISBN:978-1-62081-565-6
- Lima, M.A., Urbieto, M.S., Donati, E.R. (2018). *Microbial Communities and the Interaction with Heavy Metals and Metalloids: Impact and Adaptation*. Book; *Heavy Metals In The Environment (Microorganisms and Bioremediation)*. CRC Press.
- Lorenzo-Gutiérrez D., Gómez-Gil L., Guarro J., Roncero M.I.G., Fernández-Bravo A., Capilla J., & López-Fernández L., (2019). Role of the *Fusarium oxysporum* metallothionein Mt1 in resistance to metal toxicity and virulence. *Metallomics*, 11, 1230–1240. DOI: 10.1039/c9mt00081j
- Lotlikar N.P. (2019). Physiological response of fungi from marine habitats to heavy metals. CSIR-National Institute of Oceanography. URI: <http://irgu.unigoa.ac.in/drs/handle/unigoa/5679>
- Manguilimotan L.C., & Bitacur J.G., (2018). Biosorption of Cadmium by

- Filamentous Fungi Isolated from Coastal Water and Sediments. *Hindawi Journal of Toxicology* Article ID 7170510, 1-7, <https://doi.org/10.1155/2018/7170510>
- Nowak K., Wiater A., Choma A., Wiącek D., Bieganowski A., Siwulski M., Waśko A. (2019). Fungal (1→3)- α -D-glucans as a new kind of biosorbent for heavy metals. *International Journal of Biological Macromolecules*, 137, 960-965. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.07.036>
- Oladipo, O. G., Awotoye O. O., Olayinka, A., Bezuidenhout, C.C., Mark Steve Maboeta, M. S., 2018. Heavy metal tolerance traits of filamentous fungi isolated from gold and gemstone mining sites. *Brazilian Journal of Microbiology*, 49, 29–37. doi: 10.1016/j.bjm.2017.06.003.
- Prabhakaran P., Ashraf M.A., Aqma W.S. Raj K. K., Sardar U. S., Bhargav E., Devi I., Bhunia B., Tiwari O. N. (2018). Advances in exopolysaccharides based bioremediation of heavy metals in soil and water: A critical review. *Carbohydrate Polymers*, 199, 353–364. doi:10.1016/j.carbpol.2018.07.037.
- Rodriguez I. A., Gonzalez G. F. C., Perez A. S. R., Oviedo J. T., & Juarez V. M. M. (2018). Bioremoval of Different Heavy Metals by the Resistant Fungal Strain *Aspergillus niger*. *Bioinorganic Chemistry and Applications*, 2018, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2018/3457196>
- Santos R.C.B., Vasconcelos M.R.S., Passarini M.R.Z., Vieira G.A.L., Lopes V.C.P., Mainardi P.H., Santos J.A.S., Duarte L.A., Otero I.V.R., Yoshida A.M.S., Feitosa V.A., Pessoa A., & Sette L.D., (2015). Marine-derived Fungi: Diversity of Enzymes and Biotechnological Applications. *Frontiers in Microbiology*, 6, 269, 1-15 <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00269>
- Siddiquee S, Rovina K, Azad SA, Naher L, Suryani S, et al. (2015) Heavy Metal Contaminants Removal from Wastewater Using the Potential Filamentous Fungi Biomass: A Review. *J Microb Biochem Technol*, 7, 384-393. doi:10.4172/1948-5948.1000243
- Thatoi H, Behera BC, & Mishra RR. (2013). Ecological role and biotechnological potential of mangrove fungi: a review. *Mycology*, 4, 54–71. doi:10.1080/21501203.2013.785448
- US Geological Survey. (2013). *Heavy Metals in the Environment – Historical Trend*. E Callender, Westerly, RI, USA Published by Elsevier Ltd. volume 9, 67–105, Published by Elsevier Ltd. *Treatise on Geochemistry 2nd Edition* <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00903-7>
- Yina K., Wang Q., I D., & Chena L. (2019). Microorganism remediation strategies towards heavy metals. *Chemical Engineering Journal*, 360, 1553–1563. doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.226
- Wang, J., & Chen, C. (2006). Biosorption of heavy metals by *Saccharomyces cerevisiae*: A review. *Biotechnology Advances*, 24, 427–451. doi: 10.1016/j.biotechadv.2006.03.001

- Yang, T., Wang, X.-Y., Wang, L.-Y., Chen, M.-L., & Wang, J.-H. (2016). Biological cells in the speciation analysis of heavy metals. *Analytical Methods*, 8(47), 8251–8261. doi:10.1039/c6ay02324j
- Zehra, A., Dubey, M.K., Meena, M., Aamir, M., Patel, C.B., Upadhyay, R.S. (2018). Role of Penicillium Species in Bioremediation Processes. *New and Future Developments in Microbial. Biotechnology and Bioengineering*, 247-268.
<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-63501-3.00014-4>,
- Złotko K., Wiater A., 2, Wańsko A., Pleszczyńska M., Paduch R., Jaroszuk-Scisiel J., & Bieganowski A. (2019). A Report on Fungal (1→3)- α -d-Glucans: Properties, Functions and Application. *Molecules*, 24, 3972, 1-20. doi:10.3390/molecules24213972