



TINJAUAN
BIOSORPSI LOGAM BERAT Pb DAN Cd OLEH JAMUR MAKRO
REVIEW
BIOSORPTION OF HEAVY METALS Pb AND Cd BY MACRO FUNGI

Noverita^{1,2*}, Nuniek Ina Ratnaningtyas², Endang Sukara¹, Nuraeni Ekowati², Sri Lestari²

¹Universitas Nasional, Jl. Sawo Manila No.61. Pejaten Barat, Jakarta Selatan, 12520

²Universitas Jendral Soedirman, Jl. DR. Soeparno No.63, Karang Bawang,
Kec. Purwokerto Utara, Jawa Tengah, 53122

*Corresponding author: noverita.unas@yahoo.co.id

Naskah Diterima: 31 Januari 2022; Direvisi: 14 September 2022; Disetujui: 6 November 2022

Abstrak

Keberadaan logam berat perlu ditanggulangi, salah satunya dengan cara biosorpsi. Biosorpsi merupakan salah satu metode remediasi yang paling tepat digunakan dalam menanggulangi pencemaran logam berat. Proses secara efisien dapat menyerap logam berat terlarut bahkan logam berat yang ada dalam larutan kompleks yang sangat encer. Jamur makro merupakan contoh biosorben yang dapat digunakan dalam biosorpsi. Pemanfaatan jamur makro sebagai biosorben sangat tepat dilakukan karena keanekaragaman jenisnya tinggi, cepat tumbuh dengan kemampuan metabolisme yang beragam pada berbagai senyawa organik dan anorganik, mudah didapatkan, lebih aman karena tidak menyebabkan korosi atau menghasilkan bahan berbahaya, teknologinya sederhana, perawatannya mudah dan produk akhir dapat didaur ulang, serta dapat mengakumulasi logam berat dengan konsentrasi tinggi. Jenis-jenis jamur makro yang sudah digunakan dalam biosorpsi logam berat di beberapa negara antara lain *Agaricus bisporus*, *Auricularia polytricha*, *Calocybe indica*, *Ganoderma carnosum*, *Flammulina velutipes*, *Fomes fasciatus*, dan *Volvariella volvacea*. Sementara itu, penelitian menggunakan jamur makro di Indonesia dalam biosorpsi logam berat sangat terbatas yakni pada jenis *Phanerochaete chrysosporium*, *Omphalina* sp., dan *Pholiota* sp. Mengingat tingginya keanekaragaman jamur makro di Indonesia, maka potensi biosorpsi logam berat khususnya Pb dan Cd oleh jamur makro sangat berpeluang untuk diteleti lebih lanjut.

Kata Kunci: Biosorpsi; Jamur makro; Logam Pb dan Cd; Pencemaran

Abstract

*Heavy metals can accumulate in seawater, sediments and in the marine biota that live in them, eventually entering the food chain which is very dangerous to health. The presence of these heavy metals needs to be overcome, one of which is by means of biosorption. Biosorption is one of the most appropriate remediation methods used in tackling heavy metal pollution. The biosorption process can efficiently absorb dissolved heavy metals and even heavy metals present in very dilute complex solutions. Macro fungi are examples of biosorbents that can be used in biosorption. Utilization of macro fungi as biosorbents is very appropriate because of the high diversity of species, fast growing with diverse metabolic abilities on various organic and inorganic compounds, easy to obtain, strong morphology, safer because they do not cause corrosion or produce harmful materials, simple technology, easy maintenance and the final product can be recycled, can accumulate heavy metals with high concentrations. The types of macro fungi that have been used in the biosorption of heavy metals in several countries include *Agaricus bisporus*, *Auricularia polytricha*, *Calocybe indica*, *Ganoderma carnosum*, *Flammulina velutipes*, *Fomes fasciatus*, and *Volvariella volvacea*. Meanwhile in Indonesia, research on the use of macro fungi in heavy metal biosorption is very limited to the *Phanerochaete chrysosporium*, *Omphalina* sp. and *Pholiota* sp. Considering the high diversity of macro fungi in Indonesia, the potential for biosorption of heavy metals, especially Pb and Cd by macro fungi, is very likely to be investigated further.*

Keywords: Biosorption; Macro fungi; Pb and Cd metals; Pollution

Permalink/DOI: <http://dx.doi.org/10.15408/kauniyah.v16i2.24569>

PENDAHULUAN

Pertumbuhan populasi penduduk dan urbanisasi yang terus meningkat di seluruh dunia, menjadi salah satu pemacu meningkatnya kegiatan industri, pertanian, dan eksploitasi sumber daya alam. Kegiatan ini menciptakan dampak buruk bagi lingkungan (Hidayat, 2015; Barh et al., 2019). Kemajuan teknologi yang terjadi saat ini sangat erat terkait dengan proses percepatan di bidang industri (Kryczyk et al., 2017; Ayangbenro & Babalola, 2017), termasuk industri penghasil limbah logam berat (Kryczyk et al., 2017; Joshi, 2018; Shamim, 2018), yang menjadi penyebab utama pencemaran logam berat (Shamim, 2018; Khan et al., 2019; Ali et al., 2019). Di samping itu pencemaran logam berat juga terkait dengan proses urbanisasi dan pertanian (Ali et al., 2019).

Berbagai jenis kegiatan berkontribusi pada proses meningkatnya pencemaran logam berat di lingkungan. Penggunaan agro-kimia di sektor pertanian yang tidak terkelola dengan baik, pembakaran bahan bakar fosil dan pembuangan lumpur limbah industri, limbah dari situs pertambangan dan peleburan bijih besi, pabrik pengolahan logam, industri cat, pelapisan, dan penyamakan kulit. Pencemaran logam berat juga diperparah oleh proses alami seperti emisi vulkanik, kebakaran hutan, ventilasi laut dalam, dan *geyser* (Shamim, 2018; Kapahi & Sachdeva, 2019).

Cemaran logam berat di lingkungan sangat membahayakan kesehatan manusia. Logam berat dapat masuk ke dalam rantai makanan dan terakumulasi atau mengalami biomagnifikasi pada biota yang ada di lingkungan tercemar. Jika biota di lingkungan tersebut dikonsumsi oleh manusia, logam berat dapat masuk ke dalam tubuh manusia dan dapat mengancam kesehatan (Khan et al., 2019; Ali et al., 2019). Akumulasi logam berat di lingkungan juga dapat mengakibatkan dampak negatif terhadap kelestarian keanekaragaman hayati dan mengganggu aktivitas biota yang ada di lingkungan yang tercemar logam berat tersebut (Atakan et al., 2018).

Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd) merupakan dua contoh logam berat yang paling berbahaya dan paling banyak ditemukan di lingkungan (Ali et al., 2019). Logam berat tersebut dalam konsentrasi tinggi sangat membahayakan bagi lingkungan (Ratnawati et al., 2010), dapat terakumulasi pada air laut, sedimen, dan biota laut yang hidup di dalamnya (Barokah et al., 2019). Cemaran logam Pb menyebabkan kelumpuhan, dan kebutaan, sedangkan logam Cd dapat menyebabkan pelunakan dan fraktur (patah) tulang punggung multipel (Said, 2010). Kasus paparan Pb dan Cd terus berlanjut bahkan meningkat di beberapa daerah (Mandal, 2017). Salah satunya terjadi di perairan laut Teluk Jakarta, dan dilaporkan sudah berdampak terhadap biota laut seperti kerang hijau (*Perna viridis*) (Lestari, 2004; Kusuma et al., 2015; Barokah et al., 2019)

Kehadiran logam berat Pb dan Cd serta bahan pencemar lainnya selalu meningkat di lingkungan tanah dan air. Cemaran logam Pb dan Cd tersebut terikat kuat pada bahan organik dan non organik serta sulit terurai menjadi bentuk yang tidak beracun dan juga tidak mudah ditangani, oleh karenanya logam berat tersebut harus menjadi perhatian utama dan perlu ada strategi yang tepat untuk menanggulangnya agar tidak masuk ke dalam rantai makanan dan mengalami proses biomagnifikasi dalam tubuh manusia, yang akan menimbulkan gangguan kesehatan serius (Purohit et al., 2018; Oladipo et al., 2018).

Beberapa cara yang telah dilakukan untuk menanggulangi cemaran logam berat di lingkungan adalah proses reduksi oksidasi kimia, proses pertukaran ion, filtrasi, dialisis, absorpsi, elektro kimia, dan proses *reverse osmosis* (Said, 2010; Purohit et al., 2018). Cara-cara tersebut dipandang kurang efektif karena selain biaya yang tinggi, aplikasi, dan prospeknya terbatas. Pemulihan secara kimia memerlukan asam dalam skala besar yang akan menghasilkan sejumlah besar limbah berbahaya lainnya termasuk emisi gas (Anahid et al., 2011; Ayangbenro & Babalola, 2017). Penanganan logam Pb dan Cd secara kimia juga memerlukan *treatment* tambahan sebelum dibuang ke lingkungan (Setiawan et al., 2019), oleh karenanya, cara ini hampir ditinggalkan oleh para praktisi lingkungan (Das, 2005; Purohit et al., 2018).

Metode biologis untuk mengatasi pencemaran logam berat di lingkungan menggunakan mikroba saat ini menjadi pilihan utama (Das, 2005; Ahmad, 2018). Mikroba memiliki peran yang berbeda-beda dan memiliki keunikan tersendiri dalam proses detoksifikasi lingkungan tercemar. Jamur makro merupakan salah satu contoh mikroba yang dipakai sebagai agen detoksifikasi di lingkungan (Chatterjee et al., 2017; Ahmad, 2018; Dutta & Hyder, 2019). Pemanfaatan jamur makro

untuk mengatasi cemaran logam berat atau disebut mikoremediasi telah dilaporkan oleh Purohit et al. (2018), Dutta dan Hyder (2019). Siswati et al. (2009) sudah melakukan penelitian terkait mikoremediasi (biosorpsi) logam berat timbal oleh jamur makro *Phanerochaete chrisosporium* terhadap limbah pabrik peleburan baja skala laboratorium. Hasilnya menunjukkan bahwa jamur *Phanerochaete chrisosporium* mempunyai kemampuan untuk menyerap logam timbal (Pb), dimana proses penyerapannya dipengaruhi oleh faktor pengadukan dan konsentrasi biomassa jamur.

Mikoremediasi merupakan satu metode yang menjanjikan, karena sederhana, hemat biaya, dan ramah lingkungan serta mampu mengubah senyawa beracun dan sulit terurai menjadi produk yang ramah lingkungan (Deshmukh et al., 2016). Mikoremediasi melibatkan mekanisme reduksi, baik secara intraselular maupun ekstraselular (Kurniawan & Ekowati, 2016). Mikoremediasi tersebut dapat dilakukan secara *in situ* maupun *ex situ* (Thomas et al., 2009; Purohit et al., 2018). Mikoremediasi *in situ* dilakukan langsung di lokasi tercemar, sedangkan mikoremediasi *ex situ* dilakukan di tempat lain (Dutta & Hyder, 2019).

Proses mikoremediasi dapat dilakukan dengan beberapa cara antara lain; biosorpsi, bioakumulasi, biopresipitasi, bioreduksi, dan *bioleaching* (Dixit et al., 2015; Chaturvedi et al., 2015; Ahmad, 2018). Biosorpsi merupakan salah satu metode mikoremediasi yang dilaporkan paling tepat digunakan dalam menanggulangi pencemaran logam berat. Proses biosorpsi secara efisien dapat menyerap logam berat terlarut bahkan logam berat yang ada dalam larutan kompleks yang sangat encer. Biosorpsi dianggap sebagai model yang cocok untuk menghilangkan logam berat secara *in situ* (Ahmad et al., 2013; Tsezos et al., 2006; Gelagutashvili, 2013). Biosorpsi merupakan proses untuk menyerap cemaran logam berat secara biologis (Das, 2005; Gelagutashvili, 2013) dan bertujuan untuk mengikat logam dan unsur metaloid lainnya dari larutan. Biosorpsi dapat dilakukan dengan menggunakan biomassa hidup atau mati atau komponen penyusunnya (Ayangbenro & Babalola, 2017; Shamim, 2018).

Kinerja biosorpsi dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain suhu, pH, sifat biosorben, rasio luas permukaan biosorbent terhadap volume cemaran, konsentrasi biosorben, konsentrasi ion logam awal, dan afinitas logam terhadap biosorben (Kanamarlapudi et al., 2018, Shamim, 2018). Berbagai model biosorpsi telah dikembangkan termasuk model Freundlich dan model Langmuir yang dapat digunakan untuk menggambarkan kinerja biosorpsi tersebut (Abbas, 2014; Abdi & Kazemi, 2015; Shamim, 2018).

Berbagai jenis jamur sudah diaplikasikan sebagai biosorben. Jenis jamur yang dipakai untuk keperluan tersebut dapat berupa jamur mikro dalam bentuk miselium dan bersel tunggal (*yeast* atau khamir), ataupun jamur makro dalam bentuk tubuh buah (Bosco & Mollea, 2019; Dutta & Hyder, 2019). Beberapa jenis jamur makro yang sudah diketahui memiliki potensi sebagai agensia dalam proses mikoremediasi, di antaranya adalah *Polyporus squamosus*, *P. Sulphureus*, dan *Armillaria mellea* yang jenis liarnya diperoleh dari Laut Hitam Timur dan diketahui dapat mengakumulasi logam berat seperti Hg, Pb, Cd, dan Cu (Demirbaş, 2001; Raj et al., 2011). Jenis lain yang juga sudah diaplikasikan dalam mikoremediasi adalah *Pleurotus platypus* dan *P. tuber-regium* untuk logam Cu, Zn, Fe, Cd, Pb, Ni, serta *P. sajor-caju* untuk logam Zn (Kapahi et al., 2019).

Beberapa jenis jamur yang berpotensi digunakan dalam proses mikoremediasi juga ditemukan di beberapa Kawasan Hutan di Sumatera Barat, seperti di Kawasan Cagar Alam Lembah Anai dan Cagar Alam Batang Palupuh Sumatera. Jenis jamur yang berpotensi tersebut antara lain adalah *Polyporus* spp. (Noverita et al., 2017), selanjutnya di Kawasan Suaka Margasatwa Bukit Rimbang Bukit Baling (SMBRBB) Provinsi Riau, Sumatera juga ditemukan banyak jenis yang berpotensi untuk mikoremediasi tersebut, yaitu *Polyporus* spp. dan *Pleurotus* spp. (Noverita et al., 2019).

Penulisan artikel ini bertujuan untuk mengetahui *state of the art* jenis-jenis jamur makro yang digunakan dalam proses biosorpsi Pb dan Cd di lingkungan tercemar, merumuskan metode biosorpsi serta aplikasinya dalam proses penanggulangan pencemaran logam berat Pb dan Cd.

Logam Berat Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd)

Timbal (plumbum) dikenal juga dengan timah hitam (Pb) merupakan logam berat golongan IVA dalam sistem periodik unsur kimia, dengan nomor atom 82, berat atom 207,2 g/mol, berat

jenis $11,34 \text{ g/cm}^3$, pada suhu kamar berbentuk padat, titik lebur $327,4 \text{ }^\circ\text{C}$, titik didih logam ini $1.725 \text{ }^\circ\text{C}$, berwarna abu-abu kebiruan, dan bersifat lunak (Jusuf et al., 2008; Gusnita, 2012; Handayanto et al., 2017). Plumbum (Pb) jarang ditemukan dalam keadaan bebas di alam, tetapi ditemukan dalam bentuk senyawa yang berikatan dengan molekul lain, seperti dalam bentuk PbBr_2 dan PbCl_2 (Gusnita, 2012). Sebagai mineral, Pb berkombinasi dengan unsur belerang dalam bentuk PbS atau PbSO_4 atau dengan oksigen dalam bentuk PbCO_3 (Handayanto et al., 2017).

Logam berat Pb merupakan salah satu logam *non-ferrous* yang paling banyak digunakan untuk kebutuhan sehari-hari (Neeti & Prakash, 2013). Pb banyak dimanfaatkan dalam pembuatan baterai, pembungkus kabel, amunisi, solder, pipa, pigmen, dan dempul (Handayanto et al., 2017). Pb memiliki efek negatif yang membahayakan pada organisme hidup (Neeti & Prakash, 2013). Para peneliti toksikologis melaporkan gejala dan penyakit abnormal yang terjadi akibat akumulasi Pb (II) dalam jaringan tubuh manusia, antara lain hematopoiesis (anemia), kerusakan sistem saraf, pencernaan, kardiovaskular, bahkan dapat menyebabkan efek parah lainnya, seperti kerusakan permanen pada kognisi dan sistem reproduksi, serta penyakit neurodegeneratif (Babel & Kurniawan, 2003). Timbal (Pb) menyebabkan keracunan sistemik dengan gejala: rasa logam di mulut, garis hitam pada gusi, gangguan pencernaan, anoreksia, muntah-muntah, *encephalitis*, *wrist drop*, *irritable*, perubahan kepribadian, kelumpuhan, dan kebutaan (Blakley, 2011).

Kadmium (Cd) merupakan kelompok logam golongan IIIB, memiliki nomor atom 48, dengan berat atom sebesar $112,4 \text{ g/mol}$, berat jenis $8,65 \text{ g/cm}^3$, titik leleh $320,9 \text{ }^\circ\text{C}$, dan titik didih $765 \text{ }^\circ\text{C}$. Kadmium dalam bentuk Cd^{2+} bersifat tidak stabil (Istarani & Pandebesie, 2014). Cd bersama Pb dan Hg merupakan tiga besar logam berat beracun yang belum diketahui fungsi biologisnya (Handayanto et al., 2017). Logam Cd berwarna putih perak, lunak, mengkilap, tahan panas, tahan terhadap korosi, tidak larut dalam basa, mudah bereaksi, dan menghasilkan kadmium oksida bila dipanaskan. Umumnya logam kadmium terdapat dalam kombinasi dengan klor membentuk kadmium klorida (CdCl_2) atau dengan belerang membentuk kadmium sulfid (CdS).

Kadmium banyak digunakan dalam pembuatan baterai, pelapis pada badan kapal dan kendaraan lain untuk mencegah korosi, sebagai pigmen, pestabil untuk *polyvinyl chloride* (PVC) pada senyawa aluminium dan senyawa elektronik, pengotor pada produk pupuk fosfat, deterjen, dan produk olahan minyak. Selain itu hujan asam serta pemasaman tanah meningkatkan mobilitas geokimia Cd, yang mengakibatkan konsentrasi Cd meningkat pada air permukaan seiring dengan menurunnya pH air. Kadmium sangat resisten terhadap proses biologis, kadmium yang terserap oleh tubuh akan tetap berada dalam tubuh selama bertahun-tahun (Handayanto et al., 2017).

Kadmium (Cd) penyebab keracunan akut, dengan gejala gastrointestinal, penyakit ginjal. Gejala klinis keracunan Cd sangat mirip dengan penyakit *glomerulo-nephritis* biasa. Hanya pada fase lanjut dari keracunan Cd ditemukan pelunakan dan fraktur (patah) tulang punggung multipel (Blakley, 2011).

Cemaran Logam Berat Pb dan Cd

Di lingkungan, cemaran logam berat Pb dan Cd dapat ditemukan di semua tipe habitat, baik di air laut, di air tawar, di dalam tanah, dan di udara, serta pada organisme lain yang hidup di lingkungan tersebut. Pb dan Cd merupakan 2 jenis logam berat yang sering ditemukan di lingkungan tercemar termasuk di laut, dalam jumlah yang cukup tinggi. Kedua jenis logam berat tersebut di samping Cr, Ni, Cu, Zn, Hg, dan As tergolong berbahaya (Endrinaldi, 2009; Ali & Khan, 2018). Logam berat tersebut berada di urutan teratas di antara berbagai ion logam, bersama dengan logam Fe yang disebut "tiga besar" berada di pusat perhatian para peneliti karena dampak negatif yang ditimbulkan terhadap lingkungan (Abbas, 2014). Menurut Dixit et al. (2015), kadmium (Cd) dan timbal (Pb) adalah logam berat yang berbahaya bagi kesehatan manusia, sehingga Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat (US-EPA) menetapkan kadar logam maksimum dalam sedimen adalah 5 ppm untuk Cd dan 15 ppm untuk Pb. Batas baku kedua jenis logam tersebut di Indonesia menurut

Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 51 Tahun 2004 adalah 0,008 ppm untuk Pb dan 0,05 ppm untuk Cd.

Sumber limbah logam berat di lingkungan sangat beragam, namun pada umumnya berasal dari berbagai aktivitas manusia seperti industri, kapal dan pelabuhan, tumpahan minyak, pengolahan limbah maupun kegiatan pertambangan (Nilandita, 2015). Sebagai contoh di perairan Teluk Jakarta, sebagian besar sumber limbah logam beratnya berasal dari daratan seperti aktivitas pelabuhan (pengecetan kapal, pembuangan air *ballast*, *docking* kapal, dan pengisian bahan bakar) dan dari aktivitas industri (pabrik kimia, cat, tekstil, dan batu baterai) yang membuang limbahnya melalui sungai atau drainase menuju Teluk Jakarta (Kusuma et al., 2015). Cemaran logam berat tersebut akan terakumulasi pada sedimen laut dan biota laut yang hidup di dalamnya (Barokah et al., 2019). Rochyatun dan Rozak (2010) melaporkan bahwa kandungan logam berat dalam sedimen perairan Teluk Jakarta di bagian barat, tengah dan timur pada bulan Juni dan September 2003 terdapat perbedaan, kandungan logam berat dalam sedimen di bagian barat Teluk Jakarta lebih tinggi dibandingkan di bagian tengah dan timur Teluk Jakarta. Kandungan logam berat dalam sedimen di bagian barat Teluk Jakarta berkisar antara Pb= 8,49–31,22 ppm, Cd= <0,001–0,47 ppm, di bagian tengah Teluk Jakarta kadar Pb berkisar antara 2,21–69,22 ppm, Cd= <0,001–0,28 ppm, dan bagian timur Teluk Jakarta, kadar Pb berkisar antara 0,25–77,42 ppm, Cd= <0,001–0,42 ppm. Tekstur sedimen di bagian Barat Teluk Jakarta berupa lumpur dan berwarna hitam, karena akumulasi kandungan logam berat yang cukup tinggi. Setiyanto et al. (2012) juga menyatakan bahwa perairan Teluk Jakarta telah mengalami pencemaran logam berat khususnya Pb dan Cd, hal tersebut dapat dilihat dari kandungan logam Pb dan Cd pada gonad jantan kerang hijau, yaitu $359,75 \pm 272,41$ ppb untuk Pb dan $36.559 \pm 21,90$ ppb untuk Cd.

Pencemaran di perairan Teluk Jakarta sangat berdampak pada perairan di pulau-pulau sekitarnya, yaitu perairan di Kepulauan Seribu. Hasil penelitian Riani et al. (2017) di Pulau Panggang dan Pulau Karya Kepulauan Seribu pada bulan April, Juli, dan Oktober tahun 2017 menunjukkan bahwa kualitas air di kedua pulau tersebut mengarah ke kurang baik (pH berkisar 7,2–7,6, salinitas menurun berkisar 23–31 psu, dan temperatur tinggi berkisar 29–32 °C). Kontaminasi logam berat Cd dan Pb di bulan April dan Juli di kedua pulau tersebut masih berada di bawah baku mutu Kepmen LH No. 51 tahun 2004, namun pada Oktober (awal musim penghujan), Cd dan Pb melebihi baku mutu. Kontaminasi Cd dan Pb pada sedimen di kedua pulau di bawah baku mutu RNO (1981), sedangkan kontaminasi Cd dalam sedimen di Pulau Karya pada bulan Juli dan Oktober di atas baku mutu Dirjen POM RI No HK 00.06.1.52.4011 Tahun 2009. Hasil penelitian Nugraha (2009) pada air dan sedimen di Perairan Socah dan Kwanyar Kabupaten Bangkalan, menyatakan bahwa kandungan logam berat terutama Cd, dan Pb di perairan tersebut masih di bawah ambang batas baku mutu air laut, sedangkan kandungan logam berat di sedimen melebihi ambang batas baku mutu air laut, karena logam berat mempunyai sifat yang mudah mengikat dan mengendap di dasar perairan yang akhirnya menyatu dengan sedimen.

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Wulandari et al. (2013) di Perairan Prigi Trenggalek Jawa Timur terkait kandungan logam berat Pb pada air dan tiram *Saccostre glomerata* sebagai bioindikator Pb, menyatakan bahwa perairan Prigi sudah terkontaminasi logam berat Pb, yang diketahui dari kandungan logam berat Pb di perairan berkisar dari $0,060 \pm 0,013$ ppm sampai dengan $0,211 \pm 0,0135$ ppm yang sudah melebihi ambang batas maksimum berdasarkan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 51 tahun 2004, dan Kandungan Pb pada tiram *S. glomerata* antara $0,517 \pm 0,297$ ppm sampai dengan $2,960 \pm 0,505$ ppm, telah melebihi ambang batas maksimum dari Direktorat Jenderal Pengawasan Obat dan Makanan (POM) No. 03725/B/SK/VII/89. Hasil penelitian Wardani et al. (2014) terkait akumulasi logam berat Pb pada daging kerang hijau (*Perna viridis*) yang hidup di Muara Sungai Banjir Kanal Barat Semarang, menyatakan bahwa kerang hijau yang terdapat di muara sungai Banjir Kanal Barat Semarang sudah terakumulasi logam timbal berat Pb meskipun kadarnya masih di bawah ambang batas, namun seyogyanya kerang tersebut tidak dikonsumsi karena sifat timbal yang akumulatif, sehingga dapat membahayakan kesehatan.

Langkah Pengendalian Logam Berat Pb dan Cd

Langkah yang dilakukan untuk menghilangkan cemaran logam berat baik itu Pb dan Cd, maupun logam berat lainnya pada prinsipnya sama. Cemaran logam berat di lingkungan dapat dihilangkan atau dikeluarkan dengan perlakuan secara fisika meliputi filtrasi, dialisis, proses absorpsi, proses reverse osmosis, dan secara kimia meliputi proses reduksi oksidasi kimia, proses pertukaran ion, dan proses elektrokimia (Said, 2010; Abbas, 2014; Purohit et al., 2018). Tidak satupun dari cara-cara tersebut yang efektif untuk menghilangkan cemaran limbah logam berat. Selain biaya yang lebih tinggi, aplikasi terbatas, serta ketidak mampuan untuk meningkatkan kesehatan lingkungan, membuat cara tersebut sudah tidak banyak digunakan (Purohit et al., 2018). Proses-proses yang telah disebutkan di atas memerlukan biaya yang relatif mahal dan tidak efektif, terutama ketika konsentrasi logamnya rendah, pemulihan secara kimia terhadap logam mulia juga memerlukan asam dalam skala besar yang akan menghasilkan sejumlah besar limbah berbahaya dan emisi gas (Anahid et al., 2011; Ayangbenro & Babalola, 2017; Kanamarlapudi et al., 2018), sehingga diperlukan *treatment* lebih lanjut sebelum dibuang ke lingkungan (Setiawan et al., 2019).

Saat ini metode untuk mengatasi pencemaran akibat logam berat dapat dilakukan dengan pencegahan dan pengendalian limbah di lokasi tercemar secara biologi menggunakan mikroorganisme (Fomina & Gadd, 2014; Ahmad, 2018; Dutta & Hyder, 2019). Peran mikroorganisme yang berbeda dan unik dalam detoksifikasi lingkungan yang tercemar telah banyak diketahui, salah satunya melalui jamur makro dan jamur mikro yang disebut dengan proses mikoremediasi (Ahmad, 2018; Dutta & Hyder, 2019; Barh et al., 2019).

Mikoremediasi merupakan salah satu pendekatan biologis menggunakan jamur secara bioteknologi industri dan lingkungan yang terfokus pada “teknologi bersih” yang penekanannya pada produksi maksimum, pengurangan timbunan limbah, pengolahan, dan konversi limbah menjadi beberapa produk yang bermanfaat (Purnomo et al., 2013; Kulshreshtha et al., 2014). Mikoremediasi dapat dianggap sebagai pendekatan yang hemat biaya dan ramah lingkungan untuk degradasi kontaminan tanah serta polutan air untuk kesejahteraan manusia dalam jangka panjang (Pandey et al., 2018; Chun et al., 2019).

Mikoremediasi logam berat bertujuan untuk meningkatkan stabilitas logam, yang pada gilirannya mengurangi bioavailabilitas logam (Shamim, 2018). Selain limbah logam berat, mikoremediasi juga memainkan peran penting dalam mengolah limbah pulp dan kertas yang mengandung banyak zat beracun seperti hidrokarbon, senyawa poliklorinasi, turunan penolik, lignin konsentrasi tinggi, dan selulosa (Singh & Sharma, 2013), selain hal tersebut mikoremediasi juga dapat mendegradasi residu pestisida di lingkungan (Puspitasari & Khairuddin, 2016).

Teknologi mikoremediasi merupakan keuntungan besar yang akan membantu dalam memperbaiki situasi yang ada dan meminimalkan masalah lingkungan kesehatan yang terkait dengan limbah industri kertas dan polutan. Selanjutnya menurut Bharath et al. (2019), teknologi tersebut terbukti ekonomis dan efisien dibandingkan teknologi kimia konvensional. Mikoremediasi limbah di lingkungan dapat dilakukan dengan cara biodegradasi, biosorpsi, dan biokonversi (Kulshreshtha et al., 2014; Dutta & Hyder, 2019), teknologi mikoremediasi juga dapat menghilangkan limbah dengan cara bioakumulasi, biopresipitasi, bioreduksi, dan *bioleaching* (Kurniawan & Ekowati, 2016). Sementara itu untuk mereduksi logam berat biasanya dilakukan dengan cara biosorpsi, bioakumulasi, biopresipitasi, dan *bioleaching* (Dixit et al., 2015; Chaturvedi et al., 2015; Li et al., 2019). Biosorpsi merupakan cara remediasi yang sangat tepat digunakan untuk menghilangkan limbah logam berat terutama di perairan, karena metode biosorpsi secara efisien dapat menyerap logam berat terlarut bahkan logam berat yang ada dalam larutan kompleks yang sangat encer sekalipun.

Biosorpsi

Biosorpsi adalah proses fisika-kimia dan metabolisme-independen berdasarkan berbagai mekanisme termasuk penyerapan, adsorpsi, pertukaran ion, kompleksasi permukaan, dan presipitasi. Sebagai cabang bioteknologi, biosorpsi telah ditujukan untuk menghilangkan atau memulihkan zat organik dan anorganik dari larutan dengan bahan biologis yang dapat mencakup mikroorganisme hidup atau mati dan komponennya, bahan tanaman, limbah industri, dan pertanian serta residu alami.

Selama beberapa dekade, biosorpsi telah diperkenalkan sebagai bioteknologi pembersihan yang menjanjikan dan hemat biaya (Gadd et al., 2009; Fomina & Gadd, 2014; Abbas, 2014; Shamim, 2018).

Istilah biosorpsi tidak dapat dilepaskan dari istilah *bioremoval* karena biosorpsi merupakan bagian dari *bioremoval*. *Bioremoval* dapat diartikan sebagai terkonsentrasi dan terakumulasinya bahan penyebab polusi atau polutan dalam suatu perairan oleh material biologi, yang mana material biologi tersebut dapat memulihkan kembali polutan sehingga dapat dipisahkan dan dapat dibuang serta ramah terhadap lingkungan (Sinly & Johan, 2007). Berdasarkan kemampuannya untuk membentuk ikatan antara logam berat dengan mikroorganisme, maka biosorpsi merupakan kemampuan material biologi untuk mengakumulasi logam berat dari air limbah secara metabolik (dengan menggunakan ATP) atau jalur fisika-kimia serapan spontan (tanpa ATP) atau sebagai properti dari jenis tertentu dari biomassa mikroba tidak aktif yang tidak hidup dengan cara mengikat dan memekatkan logam berat dari larutan encer (Abbas, 2014; Shamim, 2018).

Biosorpsi merupakan penghapusan atau penghilangan logam dari suatu larutan dengan menggunakan bahan biologis (Gadd et al., 2009; Gelagutashvili, 2013). Biosorpsi juga diartikan sebagai bentuk penyerapan ion logam dari larutan dengan biomassa hidup atau biomassa tidak hidup (bahan yang sudah kering) (Gavrilescu, 2004), atau biosorpsi merupakan kemampuan biologis bahan untuk mengakumulasi logam berat dari air limbah melalui penyerapan metabolisme atau jalur fisika-kimia (Rao & Prabhakar, 2011; Fomina & Gadd, 2014), dan independen berdasarkan berbagai mekanisme, termasuk penyerapan, adsorpsi, pertukaran ion, kompleksasi permukaan, dan presipitasi (Fomina & Gadd, 2014). Tujuan biosorpsi adalah untuk menghilangkan atau mereduksi logam dan metaloid dari larutan, menggunakan biomassa hidup atau mati beserta komponennya (Ayangbenro & Babalola, 2017).

Biosorpsi dapat terjadi karena adanya material biologis yang disebut biosorben dan adanya larutan yang mengandung logam berat dengan afinitas yang tinggi sehingga mudah terikat dengan biosorben (Sinly & Johan, 2007; Gadd et al., 2009; Ratnawati et al., 2010), sementara logam beratnya sendiri disebut biosorbat/sorbat. Fomina dan Gadd (2014), menegaskan bahwa proses biosorpsi melibatkan fase padat (sorben atau biosorben; adsorben; bahan biologis) dan fase cair (pelarut biasanya air) yang mengandung spesies terlarut atau tersuspensi untuk diserap (*sorbate*) (Ahalya et al., 2003; Gadd et al., 2009; Abbas, 2014). Proses tersebut berlanjut hingga kesetimbangan terbentuk antara jumlah spesies teradsorpsi padat dan bagiannya yang tersisa dalam larutan, dengan demikian istilah biosorpsi menggambarkan sistem apa pun di mana permukaan padat dari matriks biologis berinteraksi dengan sorbat yang mengakibatkan pengurangan konsentrasi larutan sorbat (Gadd et al., 2009). Hal tersebut yang membuat biosorpsi menjadi pilihan menarik karena tersedianya berbagai bahan biosorben yang melimpah seperti jamur, bakteri, *yeast*, alga, dan biopolimer seperti alginat dan kitosan yang merupakan produk samping industri perikanan (Ratnawati et al., 2010; Gelagutashvili, 2013; Shamim, 2018). Tidak hanya organisme hidup, sisa jasad mikroorganisme juga menunjukkan sifat-sifat biosorben, termasuk juga limbah pertanian seperti biji, kulit, dan ranting tanaman (Shamim, 2018).

Pengikatan logam berat dalam suatu larutan terjadi dengan cara pertukaran ion. Ion-ion pada dinding sel mikroorganisme digantikan oleh ion-ion dari logam berat (Martins et al., 2006). Selanjutnya kompleksitas ion logam berat yang bermuatan positif berinteraksi dengan pusat aktif yang bermuatan negatif pada permukaan dinding sel atau dalam polimer ekstraseluler, seperti protein dan polisakarida sebagai sumber gugus fungsi yang berperan penting dalam mengikat ion logam berat (Ratnawati et al., 2010; Shamim, 2018).

Faktor yang Memengaruhi Biosorpsi Logam Berat

Suhu. Secara umum kisaran suhu dalam proses biosorpsi antara 20–35 °C, walaupun suhu tinggi di atas 50 °C dapat meningkatkan biosorpsi dalam beberapa kasus, tetapi suhu tinggi dapat menyebabkan kerusakan protein, yang berakibat kerusakan permanen pada sel-sel hidup mikroba akhirnya memengaruhi proses penyerapan logam (Abbas, 2014; Shamim, 2018).

Keasaman (pH). Derajat keasaman (pH) merupakan parameter terpenting dalam proses

biosorpsi. pH memengaruhi kelarutan ion logam dan situs pengikatan biomassa, pH memengaruhi kimia larutan logam, aktivitas gugus fungsi dalam biomassa dan persaingan ion logam. Rentang umum pH untuk penyerapan logam adalah antara 2,5–6. Nilai pH optimal sangat penting untuk mendapatkan penyerapan logam tertinggi, dan kapasitas ini akan berkurang dengan semakin meningkatnya nilai pH (Goyal et al., 2003; Abbas, 2014; Dixit et al., 2015; Shamim, 2018).

Sifat Biosorben. Sifat biosorben (biomassa) atau produk turunannya dapat dianggap sebagai salah satu faktor penting, termasuk sifat penerapannya seperti sel mikroba bebas atau imobil, atau biofilm. Perlakuan fisik seperti perebusan, pengeringan, autoklaf, dan gangguan mekanis lainnya akan memengaruhi sifat pengikatan, sementara perlakuan kimia seperti asam dan alkali sering meningkatkan kapasitas biosorpsi (Abbas, 2014). Pertumbuhan dan nutrisi pada biomassa, dan umur mikroorganisme juga dapat memengaruhi biosorpsi karena terjadi perubahan ukuran sel, komposisi dinding, dan pembentukan produk ekstraseluler (Wang & Chen, 2006; Abbas, 2014; Shamim, 2018).

Rasio Luas Permukaan terhadap Volume. Luas permukaan memainkan peran penting dalam menghilangkan logam berat dari media secara efisien, terutama untuk sel-sel atau partikel individu, serta luas permukaan biosorben. Makin luas permukaan biosorben, maka adsorpsi yang terjadi makin besar karena kemungkinan zat yang menempel pada permukaan biosorben bertambah (Abbas, 2014; Shamim, 2018).

Konsentrasi Biomassa. Konsentrasi biomassa juga dapat memengaruhi efisiensi biosorpsi dengan pengurangan penyerapan per unit berat yang terjadi dengan meningkatnya konsentrasi biomassa. Konsentrasi biomassa berbanding lurus dengan penyerapan logam. Interaksi elektrostatis antara sel memainkan peran penting dalam penyerapan logam. Pada kesetimbangan tertentu, biomassa mengadsorpsi lebih banyak ion logam pada kepadatan sel yang rendah daripada kepadatan tinggi. Penyerapan logam tergantung pada situs pengikatan. Lebih banyak konsentrasi biomassa maka akan lebih banyak ion logam yang membatasi akses ke situs pengikatan (Goyal et al., 2003; Oyedepo, 2011; Abbas, 2014).

Konsentrasi Ion Logam Awal. Konsentrasi ion logam awal memberikan kekuatan pendorong yang penting untuk mengatasi semua hambatan perpindahan massa logam antara fase cair dan padat. Peningkatan jumlah logam yang diserap oleh biomassa sejalan dengan meningkatnya konsentrasi logam awal. Persentase optimal pelepasan logam dapat diambil pada konsentrasi logam awal yang rendah, pada konsentrasi biomassa tertentu penyerapan logam meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi awal (Abbas, 2014).

Afinitas Logam terhadap Biosorben. *Pretreatment* fisik/kimia memengaruhi permeabilitas dan muatan permukaan biomassa, sehingga membuat kelompok pengikat logam dapat diakses untuk mengikat logam. Hal tersebut dapat dimanipulasi dengan pretreatment biomassa baik dengan alkali, deterjen, asam dan panas, yang kesemuanya dapat meningkatkan jumlah penyerapan logam (Abbas, 2014).

Faktor Fenotip. Faktor fenotip yang dimaksud dalam hal ini adalah struktur dan komponen dinding sel dari mikroorganisme yang digunakan. Struktur dan komponen sel sangat menentukan kemampuan biosorpsi terhadap logam berat, karena dinding sel merupakan struktur pertama yang berintegrasi dengan ion logam (Zimmermann & Wolf, 2002; Ratnawati et al., 2010).

Jamur Makro untuk Biosorpsi Logam Berat

Jamur merupakan organisme yang unik karena karakter morfologi, fisiologi, dan genetiknya, dapat ditemukan di mana-mana, serta mampu membentuk koloni di semua habitat (tanah dan air) (Gupta & Shrivastava, 2014). Jamur mampu tumbuh pada lingkungan yang heterogen dan mampu beradaptasi pada matriks tanah yang kompleks dan ekstrem (Bharath et al., 2019). Jamur dapat menguraikan bahan organik dan dapat dengan mudah beradaptasi. Jamur telah digunakan sebagai produk pangan sejak lama, karena rasa dan kaya protein, yang dianggap sebagai sumber protein sel tunggal, dengan jumlah asam amino yang tinggi, serat tinggi, rendah gula, serta rendah kolesterol. Disamping itu jamur juga dapat menyerap polutan melalui miseliumnya dalam proses biosorpsi, oleh karenanya perlu sekali menjadi perhatian sumber substrat tumbuh yang digunakan dalam budi daya jamur, agar jamur hasil budi daya aman untuk dikonsumsi (Kulshreshtha et al., 2014), karena jamur

adalah akumulator logam berat potensial; khususnya jamur *Basidiomycetes* yang dapat menyerap logam berat dari tanah melalui miselium dan mengakumulasikan di tubuh buahnya (Dutta & Hyder, 2019).

Peran Utama Jamur dalam Biosorpsi Logam Berat

Biosorpsi merupakan salah satu teknologi pengolahan limbah logam berat menggunakan material biologis yang disebut biosorben, salah satunya jamur. Jamur memainkan peran utama dalam biosorpsi logam berat karena memiliki beberapa keunggulan seperti: (1) Jamur memiliki morfologi yang kuat dan kemampuan metabolismenya yang beragam (Deshmukh et al., 2016); (2) Jamur dapat mengakumulasi logam berat dalam konsentrasi tinggi di atas konsentrasi maksimum dalam pertumbuhannya (Yazdani et al., 2010; Riani et al., 2017; Salman et al., 2015; Kapahi et al., 2019); (3) Jamur memiliki toleransi yang tinggi terhadap konsentrasi logam dan lingkungan yang merugikan seperti beragam kondisi pH dan suhu (Qazilbash, 2004; Yazdani et al., 2010; Salman et al., 2015); (4) Jamur memiliki masa hidup lebih pendek, kapasitas akumulasi lebih tinggi dan mudah menghilangkan biomasanya (Raj et al., 2011); (5) Jamur memiliki kemampuan untuk memodifikasi atau memengaruhi bioavailabilitas secara kimiawi (Prakash, 2017); (6) Jamur memiliki kitin pada dinding selnya yang dapat mentoleransi konsentrasi logam yang tinggi dan mampu tumbuh pada medium dengan pH dan suhu rendah yang menunjukkan potensi mikoremediasi yang sangat baik; (7) Jamur bertindak sebagai alat biosorpsi yang efektif, karena kemampuannya yang sangat baik dalam menurunkan kandungan senyawa polutan (Das, 2005); (8) Jamur memiliki afinitas penyerapan logam yang tinggi, karena jamur memiliki *bindingsite* potensial, yang terdiri dari kelompok acetoamino dari kitin, amino, sulfhidril dari protein dan peptida, hidroksil, fosfat, dan karboksil dari asam organik, polisakarida, polifenol dan melanin (Fomina & Gadd, 2014).

Jenis-Jenis Jamur Makro yang Digunakan dalam Biosorpsi Logam Berat

Berbagai jenis jamur sudah diaplikasi dalam mengendalikan lingkungan melalui proses mikoremediasi, baik jamur mikro dalam bentuk miselium ataupun jamur makro dalam bentuk tubuh buah dan miselium (Bosco & Mollea, 2019). Jamur yang terlibat dalam mikoremediasi dapat berupa khamir (*yeast*), jamur berfilamen (jamur mikro), dan jamur makro (seperti jamur pelapuk putih) (Dutta & Hyder, 2019).

Jamur makro dipilih dalam biosorpsi logam berat, karena struktur hifa yang lebih kuat dan kompak dibandingkan jamur mikro. Di samping itu jamur makro memiliki tubuh buah yang dapat dilihat dengan mata telanjang tanpa bantuan mikroskop. Bentuk tubuh buah bervariasi, seperti kipas, kerang, payung, dan lain-lain, yang dilengkapi tangkai atau tanpa tangkai. Jamur makro di lingkungan sangat penting sebagai dekomposer, beberapa jenis dapat dimakan dan sebagai bahan obat. Sebagian besar jamur makro masuk kelompok *Basidiomycota* dan beberapa *Ascomycota* (Hibbett et al., 2007, Noverita et al., 2019). Jamur makro selain dimanfaatkan sebagai bahan pangan dan bahan obat, juga banyak dimanfaatkan dalam mikoremediasi, salah satunya dalam mengendalikan cemaran logam berat (Dutta & Hyder, 2019).

Pleurotus merupakan jamur pangan yang sudah banyak dibudidayakan secara komersil di banyak negara termasuk di Indonesia. Jamur *Pleurotus* selain dimanfaatkan sebagai bahan pangan dan bahan obat, juga banyak dimanfaatkan dalam mikoremediasi (Dutta & Hyder, 2019). Potensi mikoremediasi jamur *Pleurotus* tersebut sangat tinggi, karena kemampuannya dalam menghasilkan biomassa miselium untuk dalam menyerap logam berat, dan sangat efektif dalam biosorpsi logam berat serta berbagai kontaminan lain di lingkungan (Kapahi et al., 2019).

Li et al. (2019) menggunakan jamur *Pleurotus ostreatus* HAU-2 dalam penelitiannya untuk mengamati toleransi dan mekanisme akumulasi (penyerapan) logam berat Cd dan Cr oleh jamur tersebut. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa *P.ostreatus* HAU-2 memiliki kemampuan yang sangat baik dalam menyerap Cd dan Cr, walaupun konsentrasi yang tinggi dapat menekan pertumbuhan jamur tersebut dan menghasilkan variasi mikromorfologi. Selain logam Cd dan Cr, logam Hg juga ditemukan terakumulasi dalam tubuh buah *P. ostreatus* tersebut.

Jenis lain dari *Pleurotus* yang juga sudah diaplikasikan dalam mikoremediasi adalah *P. platypus* dan *P. tuber-regium* terhadap logam berat Cu, Zn, Fe, Cd, Pb, Ni, serta *P. sajor-caju* terhadap logam

berat Zn (Kapahi et al., 2019). *P. ostreatus*, *P. sajor-caju*, *P. cornucopiae*, *P. sapidus*, *P. platypus* dan *P. ostreatoroseus* merupakan jenis jamur marga *Pleurotus* yang banyak ditemukan di seluruh dunia, terutama di hutan. Jamur tersebut memiliki enzim seperti lakase (LAC) dan Mn peroksidase (MnP), yang dapat menurunkan residu lignoselulosa menjadi sumber nutrisi yang memungkinkan jamur tersebut tumbuh dan beradaptasi dengan baik pada kondisi lingkungan yang beragam pada limbah pertanian. Selain *Pleurotus*, jamur *Boletus*, *Agaricus*, *Armillaria*, *Polyporus*, *Russula*, *Termitomyces* merupakan beberapa contoh jamur yang dilaporkan punya potensi yang lebih tinggi dalam penyerapan logam berat (Agrahar-Murugkar & Subbulakshmi, 2005, Raj et al., 2011). Jenis-jenis jamur makro yang sudah digunakan dalam penelitian biosorpsi logam berat di beberapa negara disajikan pada Tabel 1, dan jenis-jenis jamur yang diteliti di Indonesia ditampilkan di Tabel 2.

Tabel 1. Beberapa jenis jamur makro yang mampu mengabsorpsi logam berat

Jenis jamur	Jenis logam	Referensi
<i>Agaricus bisporus</i>	Cu, Cd, Pb, Zn, Mn, Fe, Cr, dan Ni	(Isildak et al., 2004)
	Cd	(Nagy et al., 2014, Kapahi et al., 2019)
	Cu, Zn, Cd, Pb, dan Ni	(Vimala & Das, 2009)
<i>A. macrosporus</i>	Cd, Hg, Pb, Cu, dan Zn	(Garcia et al., 2005)
<i>Auricularia polytricha</i>	Cd, Cu, dan Pb	(Huang et al., 2012)
<i>Calocybe indica</i>	Cu, Zn, Cd, Fe, Cd, Pb dan Ni	(Vimala & Das, 2009)
<i>Ganoderma carnosum</i>	Pb	(Akar et al., 2006)
<i>Ganoderma lucidum</i>	Cu	(Muraleedharan & Venkobachar, 1990)
<i>Flammulina velutipes</i>	Cu	(Luo et al., 2013)
<i>Fomes fasciatus</i>	Cu	(Sutherland & Venkobachar, 2013)
<i>Lactarius piperatus</i>	Cd	(Nagy et al., 2014, Kapahi et al., 2019)
<i>Lentinus edodes</i>	Cd, Pb, dan Cr	(Chen et al., 2008)
<i>Lentinus sajor-caju</i>	Fe	
<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Pb, Cu, dan Zn	(Iqbal & Edyvean, 2004)
	Pb dan Ni	(Çeribasi & Yetis, 2001)
	Cu dan Cr	(Erriek, 2012)
<i>Polyporus squamosus</i>	Hg, Pb, Cd, dan Cu	(Demirbaş, 2001, Raj et al., 2011)
<i>Polyporus sulphureus</i>	Hg, Pb, Cd, dan Cu	(Demirbaş, 2001, Raj et al., 2011)
<i>Pleurotus tuber-regium</i>	Pb, Zn, Cu, dan Mn	(Oyetayo et al., 2012)
<i>Pleurotus ostreatus</i>	Cd	(Tay et al., 2011)
	Cd dan Pb	(Kocaoba & Arisoy, 2018)
	Cr, Fe, Pb, Cu, dan Zn	(Arbanah et al., 2012)
<i>Pleurotus platypus</i>	Cu, Zn, Cd, Pb, dan Ni	(Vimala & Das, 2009)
<i>Trametes versicolor</i>	Cu, Pb, dan Zn	(Bayramoğlu et al., 2003)
<i>Volvarella volvacea</i>	Pb, Hg, dan Cu	(Purkayastha & Mitra, 1992)

Konsep Dasar Biosorpsi Logam Berat Pb dan Cd Menggunakan Jamur Makro

Proses pengikatan logam berat dalam suatu larutan terjadi melalui pertukaran ion yang ada pada dinding sel jamur makro sebagai biosorben, dengan ion-ion dari logam berat di lingkungan. Kompleksitas ion logam berat yang bermuatan positif berinteraksi dengan pusat aktif yang bermuatan negatif pada permukaan dinding sel jamur atau dalam polimer ekstra seluler, seperti protein (kelompok amino), polisakarida (gugus karboksil, hidroksil), dan kitin/kitosan (Ratnawati et al., 2010). Umumnya komponen utama penyusun dinding sel sebagai biosorben mengandung β -D-glukosa berulang. Gugus hidroksil polar selulosa inilah yang berperan dalam reaksi kimia dan mengikat logam berat dari larutan. Modifikasi gugus fungsional ini dapat mengubah sifat-sifat permukaan yang pada akhirnya akan memengaruhi kemampuan adsorpsi bahan (Igwe & Abia, 2006, Kurniasari, 2010).

Tabel 2. Penelitian biosorpsi logam berat di Indonesia

Judul penelitian	Bentuk penelitian
Biosorpsi logam berat plumbum (Pb) menggunakan biomassa <i>P. chrysosporium</i> (Siswati et al., 2009)	Penelitian laboratorium menggunakan limbah pabrik peleburan baja
Biosorpsi logam Cu (II) dan Cr (VI) pada limbah elektroplating dengan menggunakan biomassa <i>Phanerochaete chrysosporium</i> (Erriek, 2012)	Penelitian laboratorium menggunakan limbah elektroplating
Biosorpsi logam berat kadmium (Cd) pada limbah cair industri tekstil dengan menggunakan jamur <i>Phanerochaete chrysosporium</i> (Nurulhusna, 2014)	Penelitian laboratorium menggunakan limbah cair tekstil
Biosorpsi ion tembaga dalam limbah tailing menggunakan jamur pelapuk putih (<i>Omphalina</i> sp. dan <i>Pholiota</i> sp.) (Dimawarnita et al., 2016)	Penelitian laboratorium menggunakan media cair PDB (<i>Potato Dextrose Broth</i>) yang mengandung logam tembaga
Biosorpsi ion merkuri menggunakan jamur pelapuk putih (JPP) imobil menggunakan jamur pelapuk putih (<i>Omphalina</i> sp. dan <i>Pholiota</i> sp.) (Dimawarnita et al., 2017)	Penelitian laboratorium menggunakan medium cair PDB (<i>Potato Dextrose Broth</i>) yang mengandung logam merkuri
Biosorpsi logam Pb oleh <i>Phanerochaete chrysosporium</i> , heliofungia <i>Actiniformis</i> , dan <i>Trichoderma asperellum</i> TNJ-6 (Suarsa, 2017)	Penelitian laboratorium menggunakan limbah cair yang mengandung Pb.

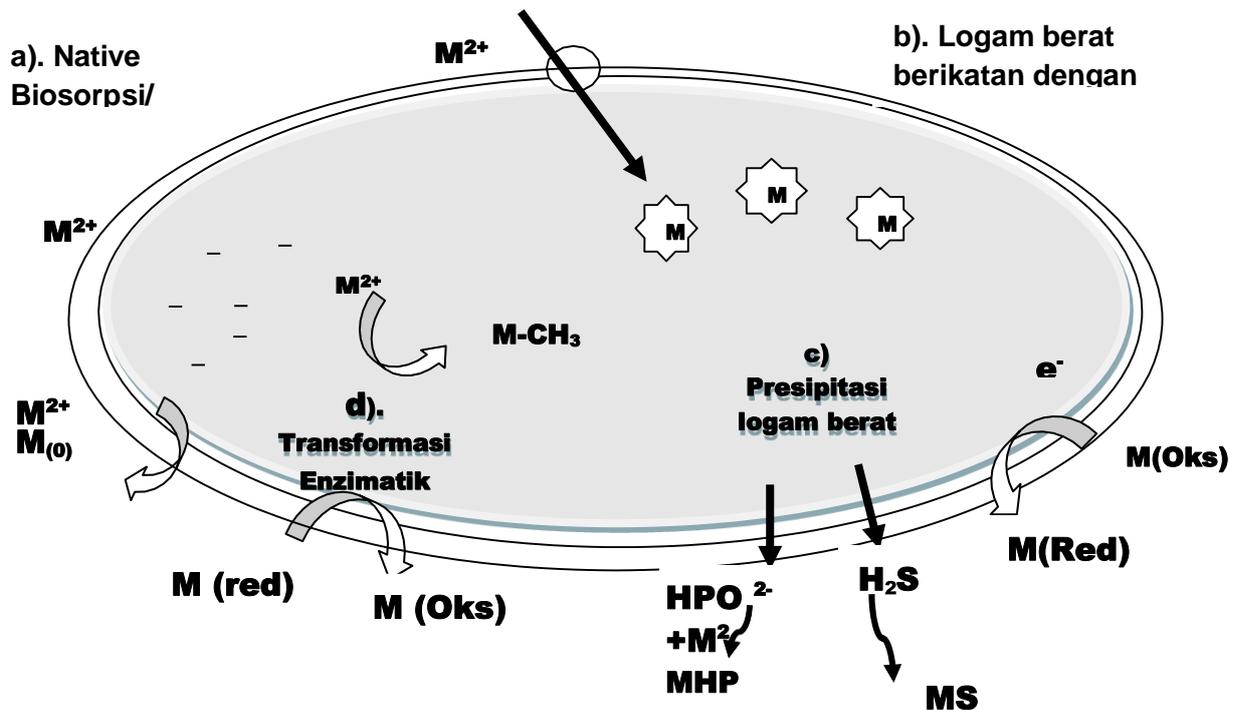
Ada tiga mekanisme yang dapat terjadi ketika biosorben mengabsorpsi logam-logam yang ada di larutan, yaitu 1) Akumulasi atau pengendapan ekstraseluler; 2) Penjerapan atau pembentukan kompleks pada permukaan sel, dan 3) Akumulasi intraseluler (Igwe & Abia, 2006; Kurniasari, 2010). Proses akumulasi atau pengendapan ekstraseluler dapat dilakukan dengan mikroorganisme hidup, yang terjadi baik di dalam larutan maupun pada permukaan sel. Proses tersebut dapat bergantung pada metabolisme mikroorganisme, kehadiran logam berat menyebabkan mikroorganisme menghasilkan senyawa yang mendukung proses presipitasi, atau dapat terjadi tanpa bergantung pada metabolisme, yaitu interaksi logam berat dengan permukaan sel. Penjerapan atau pembentukan kompleks pada permukaan sel dapat dilakukan dengan mikroorganisme hidup maupun mati. Proses tersebut terjadi karena adanya interaksi fisika-kimia antara logam berat dengan gugus fungsional yang ada pada permukaan sel mikroba berdasarkan adsorpsi fisik, pertukaran ion dan penyerapan kimia seperti kompleksasi, koordinasi dan tidak tergantung pada metabolisme sel (Dhankhar & Hooda, 2011). Akumulasi intraseluler membutuhkan aktivitas mikroba. Biosorpsi tersebut hanya dapat terjadi pada sel-sel yang aktif, sehingga sering dikaitkan dengan sistem pertahanan aktif jamur saat bereaksi dengan logam berat (Ahalya et al., 2003).

Sinly dan Johan (2007), Ratnawati et al. (2010), menyatakan bahwa mekanisme biosorpsi logam berat oleh biosorben terjadi berdasarkan; 1) metabolisme sel (proses yang bergantung pada metabolisme dan yang tidak bergantung pada metabolisme sel; 2) posisi logam berat yang disisihkan/diremoval (akumulasi ekstraseluler/presipitasi, akumulasi intraseluler dan penyerapan) oleh permukaan sel; dan 3) cara pengambilan logam berat (penangkapan pasif/biosorpsi/*passive uptake*, penangkapan aktif/bioakumulasi/*active uptake*, biopresipitasi, bioreduksi, dan *bioleaching*). Penangkapan pasif (*passive uptake*) yang lebih dikenal dengan biosorpsi. Proses tersebut terjadi ketika ion logam berat terikat pada dinding sel dengan dua cara yang berbeda. Pertama pertukaran ion *monovalent* dan *divalent* seperti Na, Mg, dan Ca pada dinding sel digantikan oleh ion-ion logam berat, dan kedua adalah pembentukan kompleks ion-ion logam berat dengan gugus fungsional seperti *carbonyl*, amino, *thiol*, *hydroxy*, *phosphate*, dan *hydroxy-carboxyl* yang berada pada dinding sel. Proses biosorpsi tersebut bersifat bolak-balik dan cepat. Proses bolak-balik ikatan logam berat di permukaan sel tersebut dapat terjadi pada sel mati dan sel hidup dari suatu biomassa. Proses biosorpsi dapat lebih efektif dengan kehadiran pH tertentu dan kehadiran ion-ion lainnya sehingga logam berat dapat terendapkan sebagai garam yang tidak terlarut. Misalnya pH optimum biosorpsi ion Pb, Ni, dan

Cu oleh bakteri *Zooglearamigera* adalah berkisar 4,0 hingga 4,5; sedangkan untuk Fe adalah pH 2,0 (Sinly & Johan, 2007; Ratnawati et al., 2010).

Penangkapan aktif (*active uptake*) dapat terjadi pada berbagai sel hidup. Mekanisme tersebut secara simultan terjadi sejalan dengan konsumsi ion logam untuk pertumbuhan mikroorganisme atau akumulasi intra seluler ion logam. Logam berat dapat juga diendapkan pada proses metabolisme dan ekskresi pada tingkat kedua. Proses tersebut tergantung pada energi yang terkandung dan sensitifitasnya terhadap parameter-parameter yang berbeda seperti pH, suhu, kekuatan ionik, dan cahaya. Proses tersebut dapat dihambat oleh suhu yang rendah, tidak tersedianya sumber energi dan penghambat-penghambat metabolisme sel, di sisi lain, biosorpsi logam berat dengan sel hidup tersebut terbatas karena akumulasi ion yang menyebabkan racun terhadap mikroorganisme. Kedua mekanisme tersebut dapat berjalan secara serentak (Sinly & Johan, 2007; Ratnawati et al., 2010).

Secara umum mekanisme pemulihan logam oleh mikroorganisme dapat terjadi sebagai berikut, a) kation logam berikatan dengan permukaan sel (biosorpsi) atau terakumulasi di dalam dinding sel (bioakumulasi); b) ion logam secara aktif terikat ke dalam sel melalui protein pengikat logam; c) logam berat bereaksi dengan polimer ekstra seluler atau dengan anion sel (seperti sulfida atau fosfat; dan d) logam dipulihkan melalui enzim biotrans-formasi (Gambar 1).



Gambar 1. Mekanisme penyerapan logam berat pada permukaan sel mikroba (Ahemad et al., 2013)

SIMPULAN DAN SARAN

Biosorpsi merupakan metode alternatif yang sangat tepat digunakan dalam menanggulangi cemara logam berat terutama di perairan, karena secara efisien dapat menyerap logam berat terlarut bahkan logam berat yang ada dalam larutan kompleks yang sangat encer. Berbagai jenis jamur makro dapat digunakan untuk menanggulangi cemaran limbah logam berat melalui proses biosorpsi. Pemanfaatan jamur makro sebagai biosorben sangat tepat dilakukan untuk mengurangi cemaran limbah logam berat, di samping karena jenisnya yang beragam, jamur juga cepat tumbuh dengan kemampuan metabolisme yang beragam, mudah didapatkan, memiliki morfologi yang kuat, lebih aman karena tidak menyebabkan korosi atau menghasilkan bahan kimia berbahaya, bekerja pada berbagai senyawa organik dan anorganik, teknologinya lebih sederhana, perawatannya mudah dan produk akhir dapat didaur ulang, memiliki toleransi terhadap logam berat, serta dapat mengakumulasi logam berat dalam konsentrasi yang tinggi. Penelitian terkait biosorpsi limbah logam berat menggunakan jamur makro sudah dilakukan di Indonesia, namun sangat terbatas pada jenis jamur

makro tertentu (jamur pelapuk putih), maka potensi biosorpsi logam berat khususnya Pb dan Cd oleh jamur makro sangat berpeluang untuk diteleti lebih lanjut.

REFERENSI

- Abbas, S. H., Ismail, I. M., Mostafa, T. M., & Sulaymon, A. H. (2014). Biosorption of heavy metals: A review. *Journal of Chemical Science and Technology*, 3, 74-102.
- Abdi, O., & Kazemi, M. J. J. M. E. S. (2015). A review study of biosorption of heavy metals and comparison between different biosorbents. *Journal Material Environment Science*, 6, 1386-1399.
- Agrahar-Murugkar, D., & Subbulakshmi, G. (2005). Nutritional value of edible wild mushrooms collected from the Khasi hills of Meghalaya. *Food Chemistry*, 89, 599-603.
- Ahalya, N., Ramachandra, T., & Kanamadi, R. (2003). Biosorption of heavy metals. *Research Journal of Chemistry and Environment*, 7, 71-79.
- Ahemad, M., Kibret, M. J. B., & Biology, M. (2013). Recent trends in microbial biosorption of heavy metals: A review. *Biochemistry and Molecular Biology*, 1, 19-26.
- Ahmad, R. Z. J. W. (2018). Mikoremediasi menghilangkan polusi logam berat pada lahan bekas tambang untuk lahan peternakan. *Wartazoa*, 28, 41-50.
- Akar, T., Cabuk, A., Tunali, S., & Yamac, M. (2006). Biosorption potential of the macrofungus *Ganoderma carnosum* for removal of lead (ii) ions from aqueous solutions. *Journal of Environmental Science and Health part A*, 41, 2587-2606.
- Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2019). Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of chemistry*, 2019, 1-14.
- Ali, H., & Khan, E. (2018). What are heavy metals? Long-standing controversy over the scientific use of the term 'heavy metals'—proposal of a comprehensive definition. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 100, 6-19.
- Anahid, S., Yaghmaei, S., & Ghobadinejad, Z. (2011). Heavy metal tolerance of fungi. *Scientia Iranica*, 18, 502-508.
- Atakan, A., Özkaya, H. Ö., & Erdoğan, O. (2018). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi (amf) on heavy metal and salt stress. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 6, 1569-1574.
- Arbanah, M., Najwa, M. M., & Halim, K.K. (2012). Biosorption of cr (iii), fe (ii), cu (ii), zn (ii) ions from liquid laboratory chemical waste by *Pleurotus ostreatus*. *International Journal of Biotechnology for Wellness Industries*, 1, 152-162.
- Ayangbenro, A. S., & Babalola, O. O. (2017). A new strategy for heavy metal polluted environments: A review of microbial biosorbents. *International journal of environmental research and public health*, 14, 1-16.
- Babel, S., & Kurniawan, T. A. (2003). Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 97, 219-243.
- Barh, A., Kumari, B., Sharma, S., Annepu, S. K., Kumar, A., Kamal, S., & Sharma, V. P. (2019). *Mushroom mycoremediation: Kinetics and mechanism-Smart Bioremediation Technologies*. India: Academic Press.
- Barokah, G. R., Dwiytitno, D., & Nugroho, I. (2019). Kontaminasi logam berat (hg, pb, dan cd) dan batas aman konsumsi kerang hijau (*Perna viridis*) dari perairan Teluk Jakarta di musim penghujan. *Jurnal Pascapenan dan Bioteknologi Kelautan dan Perikanan*, 14, 95-106.
- Bharath, Y., Singh, S., Keerthiga, G., & Prabhakar, R. (2019). Mycoremediation of contaminated soil in MSW sites-*Waste Management and Resource Efficiency*. Singapore: Springer.
- Blakley, B. R. (2011). Arsenic poisoning, mercury poisoning. Merck Manual. Retrieved from <https://www.merckmanuals.com/PetHealth/Special-Subjects/Poisoning/ArsenicPoisoning/Mercury-Poisoning>
- Bosco, F., & Mollea, C. (2019). Mycoremediation in soil. *Biodegradation Processes*. Intech Open. doi: 10.5772/intechopen.84777.

- Bayramoğlu, G., Bektaş, S., & Arıca, M. Y. (2003). Biosorption of heavy metal ions on immobilized white-rot fungus *Trametes versicolor*. *Journal of Hazardous Materials*, 101, 285- 300.
- Çeribasi, I. H., & Yetis, U. (2001). Biosorption of ni (ii) and pb (ii) by *Phanerochaete chrysosporium* from a binary metal system–kinetics. *WaterSA*, 27, 15-20.
- Chatterjee, S., Sarma, M. K., Deb, U., Steinhäuser, G., Walther, C., & Gupta, D. K. (2017). Mushrooms: From nutrition to mycoremediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 19480-19493.
- Chaturvedi, A. D., Pal, D., Penta, S., & Kumar, A. (2015). Ecotoxic heavy metals transformation by bacteria and fungi in aquatic ecosystem. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 31, 1595-1603.
- Chen, G., Zeng, G., Tang, L., Du, C., Jiang, X., Huang, G., ... Shen, G. (2008). Cadmium removal from simulated wastewater to biomass by product of *Lentinus edodes*. *Bioresource Technology*, 99, 7034-7040.
- Chun, S. C., Muthu, M., Hasan, N., Tasneem, S., & Gopal, J. J. A. S. (2019). Mycoremediation of pcbs by *Pleurotus ostreatus*: Possibilities and prospects. *Applied Sciences*, 9, 4185.
- Das, N. (2005). Heavy metals biosorption by mushrooms. *NISCAIR online periodicals repository*, 4, 454-459.
- Demirbaş, A. (2001). Heavy metal bioaccumulation by mushrooms from artificially fortified soils. *Food chemistry*, 74, 293-301.
- Deshmukh, R., Khardenavis, A. A., & Purohit, H. J. (2016). Diverse metabolic capacities of fungi for bioremediation. *Indian Journal of Microbiology*, 56, 247-264.
- Dhankhar, R., & Hooda, A. (2011). Fungal biosorption—an alternative to meet the challenges of heavy metal pollution in aqueous solutions. *Environmental Technology*, 32, 467-491.
- Dimawarnita, F., Suharyanto., Tri-Panji., Richana, N., & Zainudin, A. (2016). Biosorpsi ion tembaga dalam limbah tailing menggunakan jamur pelapuk putih (*Omphalina* sp. dan *Pholiota* sp.). *Menara Perkebunan*, 83(1). doi: 10.22302/iribb.jur.mp.v83i1.11.
- Dimawarnita, F., Panji, T., & Mulyoprawiro, S.J. (2017). Biosorpsi ion merkuri menggunakan jamur pelapuk putih imobil (Biosorption of mercury ion using immobile white- rot fungi). *E-Journal Menara Perkebunan*, 85, 28-36.
- Dixit, R., Malaviya, D., Pandiyan, K., Singh, U. B., Sahu, A., Shukla, R., ... Lade, H. J. S. (2015). Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: an overview of principles and criteria of fundamental processes. *Sustainability*, 7, 2189-2212.
- Dutta, S. D., & Hyder, M. D. (2019). Mycoremediation: A potential tool for sustainable management. *Mycopathological Research*, 57, 25-34.
- Endrinaldi, E. (2009). Logam-logam berat pencemar lingkungan dan efek terhadap manusia. *Jurnal Kesehatan Masyarakat Andalas*, 4, 42-46.
- Erriek, A. (2012). Biosorpsi logam cu (ii) dan cr (vi) pada limbah elektroplating dengan menggunakan biomassa *Phanerochaete Chrysosporium*. *Jurnal Teknik Kimia*, 4, 250-254.
- Fomina, M., & Gadd, G. M. (2014). Biosorption: Current perspectives on concept, definition and application. *Bioresource technology*, 160, 3-14.
- Gadd, G. M. (2009). Biosorption: Critical review of scientific rationale, environmental importance and significance for pollution treatment. *Bioresource technology*, 84, 13-28.
- Garcia, M.A., Alonso, J., & Melgar, M. J. (2005). *Agaricus macrosporus* as a potential bioremediation agent for substrates contaminated with heavy metals. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology*, 80,325-330.
- Gavrilescu, M. (2004). Removal of heavy metals from the environment by biosorption. *Engineering in Life Sciences*, 4, 219-232.
- Gelagutashvili, E. (2013). Comparative study on heavy metals biosorption by different types of bacteria. *Open Journal of Metal*, 3, 62-67.
- Goyal, N., Jain, S., & Banerjee, U. C. (2003). Comparative studies on the microbial adsorption of heavy metals. *Advances in Environmental Research*, 7, 311-319.

- Gupta, M., & Shrivastava, S. (2014). Mycoremediation: A management tool for removal of pollutants from environment. *Indian Journal of Applied Research*, 4, 289-291.
- Gusnita, D. J. (2012). Pencemaran logam berat timbal (pb) di udara dan upaya penghapusan bensin bertimbal. *Berita Dirgantara*, 13, 5-101.
- Handayanto, E., Nuraini, Y., Muddarisna, N., Syam, N., & Fiqri, A. (2017). *Fitoremediasi dan phytomining logam berat pencemar tanah*. Malang: Universitas Brawijaya Press.
- Hibbett, D. S., Binder, M., Bischoff, J. F., Blackwell, M., Cannon, P. F., Eriksson, O. E., ... Lumbsch, H. T. (2007). A higher-level phylogenetic classification of the fungi. *Mycological research*, 111(5), 509-547.
- Hidayat, B. (2015). Remediasi tanah tercemar logam berat dengan menggunakan Biochar. *Jurnal Pertanian Tropik*, 2, 31-41.
- Huang, H., Cao, L., Wan, Y., Zhang, R., & Wang, W. (2012). Biosorption behavior and mechanism of heavy metals by the fruiting body of jelly fungus (*Auricularia polytricha*) from aqueous solutions. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 96, 829-840.
- Isildak, Ö., Turkecul, I., Elmastas, M., & Tuzen, M. (2004). Analysis of heavy metals in some wild-grown edible mushrooms from the middle black sea region, Turkey. *Food Chemistry*, 86, 547-552.
- Iqbal, M., & Edyvean, R. G. J. (2004). Biosorption of lead, copper and zinc ions on loofa sponge immobilized biomass of *Phanerochaete chrysosporium*. *Minerals Engineering*, 17, 217-223.
- Igwe, J., & Abia, A. (2006). A bioseparation process for removing heavy metals from waste water using biosorbents. *African Journal of Biotechnology*, 5, 1167-1179.
- Istarani, F., & Pandebesie, E. S. (2014). Studi dampak arsen (as) dan kadmium (cd) terhadap penurunan kualitas lingkungan. *Jurnal Teknik Pomits*, 3, 53-58.
- Joshi, N. C. (2018). Biosorption: Agreeen approach for heavy metals removal from water and waste waters. *Research Journal of Life Sciences, Bioinformatics, Pharmaceutical and Chemical Sciences (RJLBPCS)*, 4, 1-59.
- Jusuf, R., Sastiono, A., & Widowati, W. (2008). *Efek toksik logam pencegahan dan penanggulangan pencemaran*. Yogyakarta: Penerbit Andi.
- Kocaoba, S., & Arisoy, M. (2018). Biosorption of cadmium (ii) and lead (ii) from aqueous solutions using pleurotus ostreatus immobilized on bentonite. *Separation Science and Technology*, 53, 1703-1710.
- Kanamarlapudi, S., Chintalpudi, V. K., & Muddada, S. (2018). Application of biosorption for removal of heavy metals from wastewater. *Biosorption*, 18, 69-116.
- Kapahi, M., & Sachdeva, S. (2019). Bioremediation options for heavy metal pollution. *Journal of Health and Pollution*, 9, 1-20.
- Khan, I., Aftab, M., Shakir, S., Ali, M., Qayyum, S., Rehman, M. U., ... Touseef, (2019). Mycoremediation of heavy metal (cd and cr)-polluted soil through indigenous metallotolerant fungal isolates. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191, 1-11.
- Kryczyk, A., Piotrowska, J., Sito, M., Sulkowska-Ziaja, K., Dobosz, K., Opoka, W., & Muszyńska, B. (2017). Remediation capacity of cd and pb ions by mycelia of *Imleria badia*, *Laetiporus sulphureus*, and *Agaricus bisporus* in vitro cultures. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 52, 617-622.
- Kulshreshtha, S., Mathur, N., & Bhatnagar, P. (2014). Mushroom as a product and their role in mycoremediation. *AMB Express*, 4, 1-7.
- Kurniasari, L. (2010). Pemanfaatan mikroorganisme dan limbah pertanian sebagai bahan baku biosorben logam berat. *Majalah Ilmiah Momentum*, 6, 5-8.
- Kurniawan, A., & Ekowati, N. (2016). Potensi mikoremediasi logam berat. *Jurnal Bioteknologi & Biosains Indonesia (JBBI)*, 3, 36-45.
- Kusuma, A. H., Prartono, T., Atmadipoera, A. S., & Arifin, T. (2016). Sebaran logam berat terlarut dan terendapkan di perairan teluk Jakarta. *Jurnal Teknologi Perikanan dan Kelautan*, 6, 41-49.
- Lestari, E. (2004). Dampak pencemaran logam berat terhadap kualitas air laut dan sumber daya perikanan (Studi kasus kematian massal ikan-ikan di Teluk Jakarta). *Makara Sains*, 8, 52-58.

- Li, C., Zhou, K., Qin, W., Tian, C., Qi, M., Yan, X., & Han, W. (2019). A review on heavy metals contamination in soil: Effects, sources, and remediation techniques. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 28, 380-394.
- Luo, D., Xie, Y. F., Tan, Z. L., & Li, X. D., (2013). Removal of Cu²⁺ ions from aqueous solution by the abandoned mushroom compost of *Flammulina velutipes*. *Journal of Environmental Biology*, 34, 359-365.
- Mandal, P. (2017). An insight of environmental contamination of arsenic on animal health. *Emerging Contaminants*, 3, 17-22.
- Martins, B. L., Cruz, C. C., Luna, A. S., & Henriques, C. A. (2006). Sorption and desorption of Pb²⁺ ions by dead *Sargassum* sp. biomass. *Biochemical Engineering Journal*, 27, 310-314.
- Muraleedharan, T. R., & Venkobachar, C. (1990). Mechanism of biosorption of copper (ii) by *Ganoderma lucidum*. *Biotechnology and bioengineering*, 35, 320-325.
- Nagy, B., Măicăneanu, A., Indolean, C., Mânzatu, C., Silaghi-Dumitrescu, L., & Majdik, C., (2014). Comparative study of Cd (ii) biosorption on cultivated *Agaricus bisporus* and wild *Lactarius piperatus* based biocomposites. Linear and nonlinear equilibrium modelling and kinetics. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45, 921-929.
- Neeti, K., & Prakash, T. (2013). Effects of heavy metal poisoning during pregnancy. *International Research Journal of Environmental Sciences*, 2, 88-92.
- Nilandita, W. (2015). Studi literatur teknologi fitoremediasi untuk pemulihan ekosistem laut terkontaminasi logam berat. *Journal Teknik Lingkungan*, 1, 47-51.
- Noverita, N., Sinaga, E., & Setia, T. M. (2017). Jamur makro berpotensi pangan dan obat di Kawasan Cagar Alam Lembah Anai dan Cagar Alam Batang Palupuh Sumatera. *Jurnal Mikologi Indonesia*, 1, 15-27.
- Noverita, N., Armanda, D. P., Matondang, I., Setia, T. M., & Wati, R. (2019). Keanekaragaman dan potensi jamur makro di Kawasan Suaka Margasatwa Bukit Rimbang Bukit Baling (SMBRBB) Propinsi Riau, Sumatera. *Pro-Life*, 6, 26-43.
- Nugraha, W. A. (2009). Kandungan logam berat pada air dan sedimen di perairan socah dan kwanyar Kabupaten Bangkalan. *Jurnal Kelautan: Indonesian Journal of Marine Science and Technology*, 2, 158-164.
- Nurulhusna, I. U. (2014). Biosorpsi logam berat kadmium (cd) pada limbah cair industri tekstil dengan menggunakan jamur *Phanerochaete chrysosporium* (Disertasi doctoral). UIN Sunan Gunung Djati Bandung, Bandung, Indonesia.
- Oladipo, O. G., Awotoye, O. O., Olayinka, A., Bezuidenhout, C. C., & 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.
- Oyedepo, T. A., (2011). biosorption of lead (ii) and copper (ii) metal ions on *Calotropis procera* (Ait.). *Science Journal of Pure and Applied Chemistry*, 12, 1-7.
- Oyetayo, V.O., Adebayo, A.O., & Ibileye, A. (2012). Assessment of the biosorption potential of heavy metals by *Pleurotus tuber-regium*. *International Journal of Advanced and Biological and Biomedical Research*, 2, 293-297.
- Pandey, C., Prabha, D., & Negi, Y. K. (2018). Mycoremediation of common agricultural pesticides. *Mycoremediation and Environmental Sustainability*, 155-179.
- Prakash, V. (2017). Mycoremediation of environmental pollutants. *International Journal of ChemTech Research*, 10, 149-155.
- Purkayastha, R. P., & Mitra, A. K. (1992). Metal uptake by mycelia during submerged growth and by sporocarps of an edible fungus *Volvariella volvacea*. *Indian Journal of Experimental Biology*, 30, 1184-1187.
- Purnomo, A. S., Mori, T., Putra, S. R., & Kondo, R. (2013). Biotransformation of heptachlor and heptachlor epoxide by white-rot fungus *Pleurotus ostreatus*, 82, 40-44.
- Purohit, J., Chattopadhyay, A., Biswas, M. K., & Singh, N. K. (2018). *Mycoremediation of agricultural soil: Bioprospection for sustainable development-Mycoremediation and environmental sustainability*. Springer International Publishing.

- Puspitasari, D. J., & Khairuddin, K. (2016). Kajian bioremediasi pada tanah tercemar pestisida. *KOVALEN: Jurnal Riset Kimia*, 2, 8-106.
- Qazilbash, A. A. (2004). Isolation and characterization of heavy metal tolerant biota from industrially polluted soils and their role in bioremediation (Disertasi doktoral). Quaid-i- Azam University Islamabad, Pakistan.
- Raj, D. D., Mohan, B., & Vidya Shetty, B. M. (2011). Mushrooms in the remediation of heavy metals from soil. *International Journal of Environmental Pollution Control and Management*, 3, 89-101.
- Rao, L. N., & Prabhakar, G. (2011). Removal of heavy metals by biosorption-an overall review. *Journal of Engineering Studies and Research*, 2, 17-22.
- Ratnawati, E., Ermawati, R., & Naimah, S. (2010). Teknologi biosorpsi oleh mikroorganisme, solusi alternatif untuk mengurangi pencemaran logam berat. *Jurnal Kimia dan Kemasan* 32, 34-40.
- Riani, E., Johari, H. S., & Cordova, M. R. (2017). Bioakumulasi logam berat kadmium dan timbal pada kerang kapak-kapak di Kepulauan Seribu. *Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 20, 131-142.
- Rochyatun, E., & Rozak, A. (2010). Pemantauan kadar logam berat dalam sedimen di perairan Teluk Jakarta. *Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 20, 131-142.
- Said, N. I. (2010). Metoda penghilangan logam berat (as, cd, cr, ag, cu, pb, ni dan zn) di dalam air limbah industri. *Jurnal Air Indonesia*, 6, 136-148.
- Salman, M., Athar, M., & Farooq, U. (2015). Biosorption of heavy metals from aqueous solutions using indigenous and modified lignocellulosic materials. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 14, 211-228.
- Setiawan, A., Basyiruddin, F., & Dermawan, D. (2019). Biosorpsi logam berat cu (ii) menggunakan limbah *Saccharomyces cerevisiae*. *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 16, 29-35.
- Setiyanto, D. D., Sumantadinata, K., Riani, E., & Ernawati, Y. (2012). Akumulasi logam berat dan pengaruhnya terhadap spermatogenesis kerang hijau (*Perna viridis*). *Jurnal Ilmu-Ilmu Perairan dan Perikanan Indonesia*, 15, 77-83.
- Shamim, S. (2018). Biosorption of heavy metals, biosorption, Jan Derco and Branislav Vrana. *Intech Open*, 2, 21-49.
- Singh, A., & Sharma, R. (2013). Mycoremediation an eco-friendly approach for the degradation of cellulosic wastes from paper industry with the help of cellulases and hemicellulase activity to minimize the industrial pollution. *International Journal of Environmental Engineering and Management*, 4, 199-206.
- Sinly, E., & Johan, A. (2007). Bioremoval, metode alternatif untuk menanggulangi pencemaran logam berat (Artikel). Universitas Lampung, Indonesia.
- Siswati, N. D., Indrawati, T., & Rahmah, M. (2009). Biosorpsi logam berat plumbum (pb) menggunakan biomassa *Phanerochaete chrysosporium*. *Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, 1, 67-72.
- Suarsa, I. W. (2017). Biosorpsi logam Pb oleh *Phanerochaete chrysosporium*, *Heliofungia actiniformis* dan *Trichoderma asperellum* tnj-6 (Karya ilmiah). Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Udayana, Bali, Indonesia.
- Sutherland, C., & Venkobachar, C. (2013). Equilibrium modeling of cu (ii) biosorption onto untreated and treated forest macro-fungus *Fomes fasciatus*. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences*, 3, 193-203.
- Tay, C. C., Liew, H. H., Yin, C. Y., Abdul-Talib, S., Surif, S., Suhaimi, A. A., & Yong, S. K. (2011). Biosorption of cadmium ions using *Pleurotus ostreatus*: Growth kinetics, isotherm study and biosorption mechanism. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 28, 825-830.
- Thomas, S., Aston, L., Woodruff, D., & Cullinan, V. J. (2009). Field demonstration of mycoremediation for removal of fecal coliform bacteria and nutrients in the Dungeness watershed: Final report. Washington: Pacific Northwest National Laboratory.

- Tsezos, M., Remoundaki, E., & Hatzikioseyan, A. (2006). Biosorption-principles and applications for metal immobilization from waste-water streams. Paper presented at the Proceedings of EU-Asia workshop on clean production and nanotechnologies, Seoul, Korea Selatan. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/242079915_Biosorption-principles_and_applications_for_metal_immobilization_from_waste-water_streams
- Vimala, R., & Das, N. (2009). Biosorption of cadmium (ii) and lead (ii) from aqueous solutions using mushrooms: A comparative study. *Journal of Hazardous Materials*, 168, 376- 382.
- Wang, J., & Chen, C. J. B. A. (2006). Biosorption of heavy metals by *Saccharomyces cerevisiae*: A review. *Biotechnology advance*, 24, 427-451.
- Wardani, D. A. K., Dewi, N. K., & Utami, N. R. (2014). Akumulasi logam berat timbal (pb) pada daging kerang hijau (*Perna viridis*) di muara Sungai Banjir Kanal Barat Semarang. *Life Science*, 3, 1-8.
- Wulandari, E., Herawati, E., & Arfiati, D. (2013). Kandungan logam berat pb pada air laut dan tiram *Saccostrea glomerata* sebagai bioindikator kualitas perairan Prigi, Trenggalek, Jawa Timur. *Jurnal Penelitian Perikanan*, 1, 10-14.
- Yazdani, M., Yap, C. K., Abdullah, F., & Tan, S. G. (2010). An in vitro study on the adsorption, absorption and uptake capacity of zn by the bioremediator *Trichoderma atroviride*. *Environment Asia*, 3, 53-59.
- Zimmermann, M., & Wolf, K. (2002). *Biosorption of metals: The mycota books, industrial applications*. Berlin-Heidelberg: Springer.