© 2019 Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP
JURNAL ILMU LINGKUNGAN
Volume 17 Issue 3 (2019) : 408-415 *ISSN 1829-8907*

Review: Mekanisme Akumulasi Logam Berat Di Ekosistem Pascatambang Timah

Andri Kurniawan[1], Diah Mustikasari[2]

[1]Universitas Bangka Belitung; e-mail: andri_pangkal@yahoo.co.id
[2]Universitas Wanita Internasional

ABSTRAK

Aktivitas eksplorasi dan eksploitasi timah telah mengakibatkan terjadinya kerusakan dan perubahan ekosistem seperti kerusakan hutan, perubahan struktur tanah, penurunan kualitas tanah dan air, dan potensi cemaran logam berat. Perubahan makroekosistem juga berimplikasi secara langsung terhadap perubahan mikroekosistem. Salah satu bentuk perubahan lingkungan dan dampak ekologis yang menjadi perhatian utama pascatambang timah adalah keberadaan logam berat. Akumulasi logam berat dapat mempengaruhi struktur fisika dan kimia di suatu ekosistem seperti tingkat keasaman (pH) dan nilai ambang batas residu logam berat yang tinggi. Kondisi fisika dan kimia yang ekstrem, termasuk keberadaan logam berat berpengaruh pada kemampuan biologi dari makro dan mikroorganisme untuk mampu bertahan hidup di lingkungan tersebut. Review artikel ini bertujuan untuk mendeskripsikan potensi cemaran logam berat seperti As, Cr, Cu, Pb, Zn, Fe, dan Sn yang ditemukan di lokasi pascatambang timah, toksisitas logam berat, mekanisme akumulasi logam berat pada suatu organisme, dan penanganan cemaran melalui mekanisme fisikokimia dan biologi. Hasil telaah pustaka ini menunjukkan adanya potensi cemaran dari unsur-unsur logam yang terdapat di lokasi penambangan timah. Logam-logam tersebut dapat terakumulasi secara langsung maupun tidak langsung melalui rantai makanan, dari produsen, konsumen terendah, hingga konsumen tertinggi. Berbagai upaya dapat dilakukan untuk menangani cemaran logam antara lain (a) metode fisika dan kimia (fisikokimia) seperti presipitasi anion, *electro-winning*, *electro-coagulation*, sementasi, *reverse osmosis*, dan *electro-dialysis* serta (b) metode biologi seperti bioremediasi oleh tanaman (*phytoremediation*), jamur (*mycoremediation*), dan bakteri (*bacteria bioremediation*). Telaah yang disampaikan pada makalah ini diharapkan dapat menjadi informasi penting di dalam upaya pengelolaan ekosistem pascatambang timah untuk pemanfaatan dan pembangunan lingkungan yang lestari serta berkelanjutan.

***Kata kunci*:** akumulasi, logam berat, penambangan timah, metode fisikokimia, metode biologi

ABSTRACT

Tin exploration and exploitation activities have resulted in damage and changes in ecosystems such as forest damage, changes in soil structure, degradation of soil and water quality, and potential contamination of heavy metals. The changes in macroecosystems also have direct implications for changes in microecosystems. One form of environmental change and ecological impact that is the main concern after tin mining is the presence of heavy metals. Heavy metal accumulation can affect the physical and chemical structure in an ecosystem such as acidity (pH) and high threshold value of heavy metal residues. Extreme physical and chemical conditions, including the presence of heavy metals, affect the biological ability of macro and microorganisms to be able to survive in the environment. This article review aimed to describe the potential contamination of heavy metals such as As, Cr, Cu, Pb, Zn, Fe, and Sn found in post-tin mining locations, heavy metal toxicity, the mechanism of heavy metal accumulation in an organism, and the handling of contamination through physicochemical mechanisms and biology. The results of this review indicated the potential contamination of metal elements found in tin mining locations. These metals can be accumulated directly or indirectly through the food chain, from producers, the lowest consumers, to the highest consumers. Various efforts can be made to deal with metal contamination including (a) physical and chemical (physicochemical) methods such as anion precipitation, electro-winning, electro-coagulation, cementation, reverse osmosis, and electro-dialysis and (b) biological methods such as bioremediation by plants (phytoremediation), fungi (mycoremediation), and bacteria (bacteria bioremediation). The review presented in this paper is expected to be important information in the effort to manage post-mining ecosystems for sustainable and sustainable use and development of the environment.

***Keywords*:** accumulation, heavy metal, tin mining, physicochemical methods, biological methods

***Citation*:** Kurniawan, A., dan Mustikasari, D. 2019. Review: Mekanisme Akumulasi Logam Berat di Ekosistem Pascatambang Timah. Jurnal Ilmu Lingkungan, 17(3), 408-415, doi:10.14710/jil.17.3.408-415

1. Pendahuluan

Salah satu barang tambang Indonesia yang sudah dikenal sejak ratusan tahun lalu adalah timah. Indonesia merupakan negara produsen timah kedua terbesar di dunia setelah China dan produksi terbesar berasal dari Pulau Bangka Belitung (Syarbaini et al. 2014). Pulau Bangka Belitung terletak di sabuk timah Asia Tenggara (*Southeast Asia tin belt*) (Sudiyani et al. 2011) yang telah ditambang sejak 1668 (Irawan et al. 2014) hingga sekarang ini. Produksi timah yang dicatat Badan Pusat Statistik (BPS) (2018) menunjukkan bahwa data produksi timah tahun 2012-2015 mengalami peningkatan dari 44.202 hingga 93.180 tonmetrik.

Aktivitas penambangan timah meninggalkan dampak ekologis sebagaimana juga penambangan lainnya. Beberapa dampak negatif yang tampak di lokasi penambangan timah antara lain lingkungan terdegradasi, hilangnya plasma nutfah akibat hilangnya ekosistem hutan dan habitat bagi hewan, kondisi tanah yang gersang dan kesuburan yang rendah, tingkat keasaman tinggi, nilai oksigen di tanah dan perairan rendah, nilai kapasitas pertukaran kation rendah (*low capacity exchange capacity*), lingkungan di bawah standar baku.

Selain itu, permasalahan yang juga menjadi perhatian masyarakat dunia adalah cemaran logam berat. Aktivitas penambangan timah memang tidak menggunakan bahan kimia selama proses eksplorasi dan eksploitasinya, namun elemen yang terdapat di alam dapat mengalami oksidasi dan reaksi kimia lainnya sebagai akibat terbukanya lahan maupun adanya genangan air. Reaksi kimia tersebut mengekspos logam berat menyebabkan perubahan kualitas air dan potensi residu cemaran.

Beberapa kajian ilmiah menunjukkan residu logam berat yang ditemukan di tanah maupun perairan pascatambang timah seperti As, Cr, Cu, Pb, Zn, Fe, dan Sn (Gyang dan Ashano, 2010; Ashraf et al. 2011; Ashraf et al. 2012; Rosidah dan Henny, 2012; Kurniawan 2017). Cemaran logam berat yang terdapat di ekosistem pascatambang timah didiskusikan di dalam artikel ini. Hal ini bertujuan mengelaborasi berbagai informasi yang dapat digunakan sebagai dasar pengelolaan ekosistem untuk aktivitas primer maupun sekunder setelah tambang timah selesai beroperasi.

2. Cemaran Logam Berat

Logam berat (*heavy metal*) adalah istilah umum yang sering digunakan untuk menjelaskan kelompok logam (*metals*) atau semi logam (*metalloids*) yang berasosiasi dengan cemaran. Unsur-unsur (*elements*) yang dikelompokkan sebagai logam berat memiliki densitas yang lebih dari 5g/cm^3 atau pada penelitian lainnya menyebutkan densitas di atas 3,5-7,0 g/cm^3, memiliki berat atom antara 63,546 (≈ 63,6) - 200,590 (≈ 200,6), dan memiliki gravitasi spesifik > 4,0 atau 5,0 (Duffus 2002; Srivastava dan Majumder 2008; Aslam et al. 2011).

Di antara unsur-unsur yang ada di alam, terdapat enam puluh unsur yang dikelompokkan sebagai logam berat seperti Pb, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Zn, Hg, dan lain sebagainya (Devkota dan Schmidt 2000; Suciu et al. 2008; Yahaya et al. 2009; Kakimov et al. 2013; Sepahy et al. 2015).

Logam berat umumnya adalah bahan toksik berbahaya yang dapat menginduksi stres oksidatif, kerusakan DNA, kanker, hingga kematian sel (Kim et al. 2015). Beberapa logam berat di dalam konsentrasi tertentu justru bermanfaat sebagai mikronutrien dan membantu mekanisme kontrol seperti homeostatis, transpor, serta pengikatan konstituen sel (Raikwar et al. 2008; Jaishankar et al. 2014).

Akumulasi yang berlebihan di dalam tubuh merupakan racun bagi organisme (Yan-De et al. 2007). Toksisitas logam berat dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu dosis, jalur paparan, jenis bahan kimia, dan kondisi organisme yang terpapar logam berat seperti umur, gender, genetik, dan status nutrisi (Tchounwou et al. 2014). Bentuk ion logam berat turut menentukan tingkat toksisitasnya. Ion-ion toksik ini yang mengalami ransformasi melalui mekanisme detoksifikasi sehingga menjadi tidak atau kurang berbahaya (Vaals dan De Lorenzo 2002; Gadd 2010).

Logam berat (*heavy metal*) tidak selalu menggambarkan logam berbahaya (*toxic metal*). Struktur kimia menentukan sifat biologis dan toksisitas dari unsur-unsur tersebut (Templeton 2015). Beberapa unsur seperti kromium dalam bentuk Cr(III) adalah *trace element* yang esensial, tetapi bentuk Cr(VI) dapat menyebabkan kanker melalui interferensi metabolisme dan mutagenesis (Govind dan Madhuri 2014).

Unsur lainnya seperti besi berbentuk Fe(II) lebih banyak dan signifikan diserap sel dibandingkan Fe(III) (He et al. 2008). Unsur Hg (II) yang lebih toksis sehingga harus diubah ke dalam Hg(0) (Azimi dan Moghaddam 2013). Demikian juga Mn(III) anorganik yang pada umumnya lebih toksik dibandingkan unsur bentuk oksidasi seperti $Mn(II)Cl_2$ dan $Mn(IV)O_2$, unsur As(III) lebih toksik dibandingkan As(V), serta unsur V(V) juga lebih toksik daripada V(IV) (Templeton 2015).

Struktur unsur-unsur tersebut adalah contoh yang menjelaskan bahwa struktur unsur sangat mempengaruhi toksisitasnya, selain densitasnya yang menggambarkan unsur sebagai kelompok logam berat. Ion *toxic metal*s tersebut yang memiliki potensi bahaya terhadap kesehatan organisme dan kerusakan sistem vital tubuh (Abdi dan Kazemi 2015).

3. Potensi Toksisitas Logam Berat

Di lokasi pascatambang timah, logam berat yang telah teridentifikasi antara lain As, Cr, Cu, Pb, Zn, Fe, dan Sn (Gyang dan Ashano, 2010; Ashraf et al. 2011a; Ashraf et al. 2012a; Rosidah dan Henny, 2012; Kurniawan 2017). Beberapa kajian menunjukkan

© 2019, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

cemaran logam berat di lokasi tambang timah tersebut berada pada level yang rendah hingga di atas batas toleransi atau standar baku mutu suatu lingkungan (Kurniawan 2016a) seperti As (1,09-3,21 ppm), Cr (0,67-4,94 ppm), Cu (3,08-8,94 ppm), Pb (4,62-8,21 ppm), Zn (3,90-8,17 ppm), Fe (21,4-2344 ppm), dan Sn (47,00-82,80 ppm) (Kurniawan et al. 2019).

Potensi bahaya logam berat adalah ketika logam-logam berat tersebut masuk ke dalam sistem metabolisme dari suatu organisme, khususnya manusia. Organisme lain juga berdampak atas ketercemaran logam berat tersebut, namun pada fokus tertentu perhatian atas kesehatan manusia lebih diutamakan dibandingkan organisme lain.

Sejumlah unsur seperti Cu, Fe, Mn, dan Zn dibutuhkan oleh semua organisme karena perannya sangat penting di dalam sistem metabolisme (Al-Homaidan 2006). Namun, konsentrasi unsur di atas batas kebutuhan tubuh dapat menjadi penyebab terjadinya kerusakan pada sistem metabolisme itu sendiri.

Logam berat seperti As, Cr, Cu, Pb, Zn, Fe, dan Sn adalah metaloid toksik yang terdapat di lingkungan baik dalam bentuk organik maupun anorganik.

Pada tingkat seluler, logam berat diadsorbsi di permukaan melalui interaksi antara logam dan gugus funsional seperti karboksil, fosfat, hidroksil, amino, sulfur, sulfida, dan sebagainya. Keberadaan logam tersebut berpenetrasi ke dalam sel sehingga dapat berperan secara positif atau negatif di dalamnya (Arunakumara dan Xuecheng 2008), tergantung jenis, ion, dan konsentrasi logam, serta faktor lainnya.

Pada organisme primer atau produsen seperti tumbuhan, paparan logam berat dari lingkungan terlihat dari pertumbuhan tanaman itu. Residu logam berat seperti Zn dapat menyebabkan berkurangnya biomasa tanaman dikarenakan defisiensi makronutrien seperti fosfor yang digunakan untuk nutrisi pertumbuhan dan kesuburan (Alia et al. 2015).

Pada tingkat organisme konsumen seperti manusia, toksisitas logam seperti As dapat menyebabkan berbagai dampak kesehatan manusia seperti sistem saraf perferal pusat yang diawali oleh gajala perubahan sensori dan dikuti pelemahan otot. Efek lainnya yang ditimbulkan adalah panas, anoreksia, melanosis, dan gagal jantung (Akhtar 2013a). Demikian juga pada logam berat lainnya seperti yang terdapat di lokasi perttambangan timah yang dapat membahayakan kesehatan tubuh pada tingkat akumulasi tertentu. Berbagai kajian telah banyak menjelaskan dampak logam berat bagi kehidupan organisme.

Pada prinsipnya, unsur-unsur tertentu sangat dibutuhkan dan esensial bagi tubuh organisme. Namun, akumulasi berlebihan atau tingkat toksisitas unsur yang lebih tinggi pada struktur kimia tertentu dapat mengakibatkan efek negatif bagi organisme.

4. Mekanisme Akumulasi Logam Berat

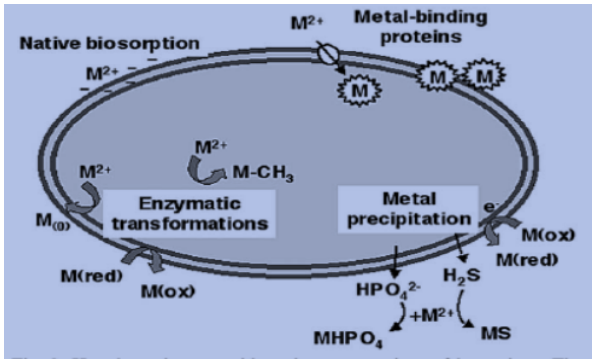
Keberadaan logam berat di dalam tubuh organisme dikarenakan adanya mekanisme perpindahan logam berat dari lingkungan ke dalam sel, jaringan maupun organ (Valls dan De Lorenzo 2002; Saeed dan Shaker 2008; Ashraf et al. 2011a; Ahmad dan Al-Mahaqeri 2015).

Esensi dan eksistensi logam berat dalam kurun waktu yang lama di lingkungan menjadi ancaman serius dan signifikan bagi lingkungan dan terakumulasi di dalam rantai makanan (Rajendran et al. 2003; Fu dan Wang 2011; Tangahu et al. 2011; Mkumbo 2012; Verma dan Gupta 2013). Akumulasi yang melebihi batas toleransi berefek toksik bagi organisme (Chaalal dan Zekri 2005; Lone et al. 2008; Jaiswal 2011; Rai 2008).

Mekanisme perpindahan logam berat dapat terjadi secara langsung maupun tidak langsung. Tranportasi logam berat dari alam secara langsung dapat terjadi pertama kali pada sel-sel mikroorganisme (Valls dan De Lorenzo, 2002) sebelum adanya suksesi di ekosistem pasctambang atau tercemar.

Mikroorganisme adalah organisme awal yang biasanya terdapat di ekosistem tercemar. Hal ini karena mikroorganisme memiliki kapabilitas dan kapasitas responsif serta cepat terhadap perubahan lingkungan sehingga sering digunakan sebagai salah satu indikator untuk mengetahui perubahan lingkungan (Paerl et al. 2003; Niemi dan McDonald 2004; Moscatelli et al. 2005; Lau dan Lennon 2012).

Interaksi antara logam berat dengan mikroorganisme terjadi melalui beberapa mekanisme seluler (Ahemad dan Malik 2011). Beberapa mekanisme pengikatan intra ataupun ekstraseluler yang dilakukan mikroorganisme saat berinteraksi dengan logam berat antara lain biosorpsi logam pada dinding sel, pengikatan logam pada protein, transformasi struktur logam secara enzimatis, hingga presepitasi logam yang dapat menyebabkan logam mengendap dan terakumulasi (**Gambar 1**) (Vaals dan De Lorenzo 2002).



Gambar 1 Mekanisme Interaksi Logam Berat pada Mikroorganisme

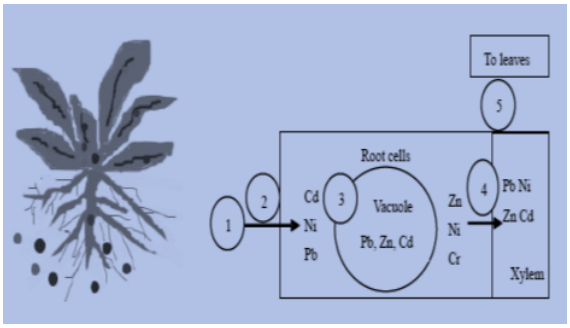
© 2019, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Mekanisme interaksi lain yang dapat terjadi antara mikroorganisme dan logam adalah kompleksasi, kelasi, pertukaran ion, reaksi reduksi-oksidasi, dan lainnya (Kumar et al. 2010; Kumar et al. 2011; Sayyed dan Patel 2011; Ahemad 2012; Juwarkar et al. 2014).

Kemampuan mikroorganisme untuk berinteraksi dengan logam berat digunakan manusia untuk mengatasi residu toksik di lingkungan tercemar (Prakash et al. 2013). Kemampuan adaptasi mikroorganisme pada awal proses suksesi di ekosistem tercemar menjadikannya berpotensi sebagai agen bioremediator.

Pada tingkatan trofik yang lebih tinggi, perpindahan logam berat secara langsung terjadi pada tumbuhan. Tumbuhan yang tumbuh di suatu ekosistem bersentuhan secara langsung dengan logam berat yang terakumulasi di tanah dan kemudian logam berat tersebut berpindah ke akar dan jaringan lainnya (Memon et al. 2001; Rascio dan Navari-Izzo, 2011).

Penyerapan dan akumulasi logam pada tanaman terjadi melalui proses (1) absorbsi logam pada permukaan akar, (2) logam bergerak melintasi membran seluler masuk ke sel akar, (3) fraksinasi logam yang terabsorbsi ke akar dan ditahan di dalam vakuola, (4) pergerakan intraseluler yang melintasi membran seluler serta masuk ke jaringan vaskuler akar (xylem), dan (5) logam mengalami translokasi dari akar ke jaringan lainnya (batang dan daun) (**Gambar 2**) (Yan-De et al. 2007).



Gambar 2 Mekanisme Interaksi Logam Berat pada Tanaman

Proses perpindahan logam berat dari suatu lingkungan tercemar ke manusia dan hewan dapat terjadi melalui persinggungan secara langsung dan dapat terjadi secara tidak langsung melalui akumulasi logam berat pada setiap tingkatan trofik di dalam suatu rantai makanannya (Devkota dan Schmidt 2000; De Vries et al. 2007).

Salah satu contoh kontaminasi langsung adalah interaksi ikan dengan residu logam di lingkungan perairan. Aktivitas industrialisasi menghasilkan residu logam ke lingkungan. Akumulasi logam pada ikan besar terjadi melalui kontak dengan air yang diminum maupun diabsorpsi oleh jaringan ikan. Kontaminasi pada ikan besar juga dapat terjadi secara tidak langsung dari ikan kecil yang mengakumulasi logam dari air. Air membawa logam masuk ke tanaman air yang dimakan oleh ikan kecil. Ikan-ikan kecil yang telah memakan tumbuhan terakumulasi logam kemudian dimakan ikan besar. Aktivitas memakan ini menyebabkan ikan besar memiliki kandungan akumulasi logam berat yang lebih banyak karena mengkonsumsi ikan-ikan kecil.

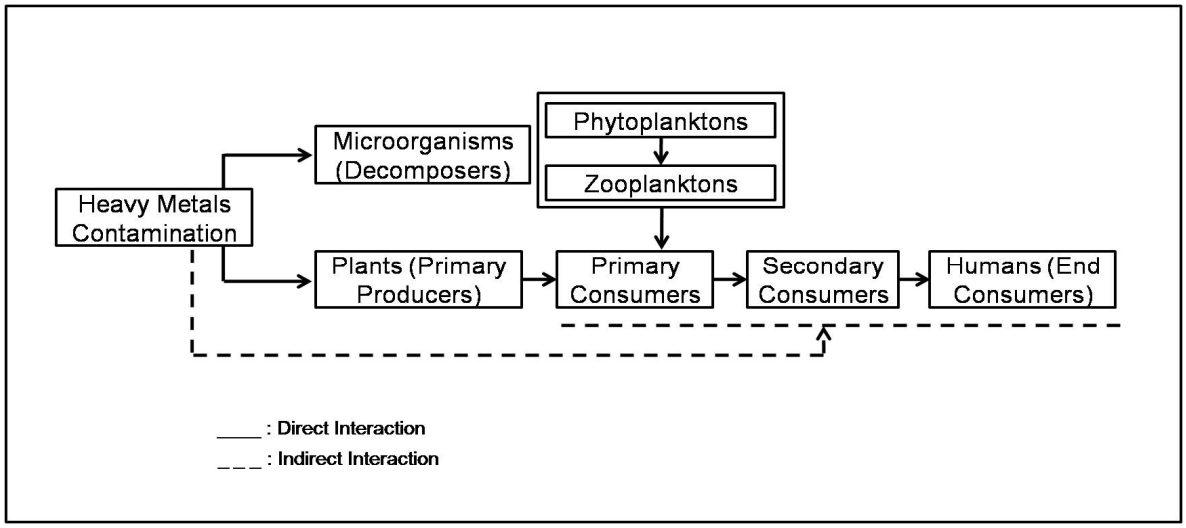
Pada tingkatan konsumsi yang lebih tinggi, ikan dikonsumsi manusia. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya akumulasi logam di dalam tubuh manusia, walaupun tidak secara langsung berhubungan atau berinteraksi dengan sumber cemaran (Abate 2017).

Gambaran interaksi dan perjalanan cemaran logam berat tersebut juga terjadi pada hewan darat seperti sapi, kuda, dan lainnya. Logam berat yang terdapat di tanah dapat terakumulasi pada tanaman sebagai produsen dan selanjutnya dimakan oleh konsumen tingkat pertama, tingkat kedua, hingga tingkat akhir.

Pada prinsipnya, gambaran tentang rantai makanan dari suatu organisme dapat menjelaskan rute dan pola perpindahan logam berat dari suatu lingkungan menuju tempat akhir akumulasi. Rantai makanan dapat mendeskripsikan interaksi langsung atau tidak langsung antarorganisme dengan sumber kontaminasinya (**Gambar 3**).

Pada **Gambar 3** dapat disimpulkan bahwa interaksi antara logam berat dengan organisme yang ada di lingkungan dapat terjadi secara langsung (*direct interaction*) atau tidak langsung (*indirect interaction*). Semakin dekat jarak interaksi konsumsi di dalam rantai makanan antara organisme dengan sumber kontaminan, maka paparan interaksi secara langsung semakin besar dapat terjadi. Namun, cemaran logam berat yang terakumulasi dapat dikatakan lebih kecil dibandingkan dengan konsumen pada tingkat yang lebih tinggi.

© 2019, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP



Gambar 3 Akumulasi Logam Berat Mengikuti Rantai Makanan

Pada bagian lainnya, semakin jauh jarak rantai makanan yang berarti jauh jarak interaksi dengan sumber kontaminan, maka peluang paparan secara langsung semakin kecil. Namun, semakin tinggi tingkat trofik konsumen dapat menghasilkan residu logam berat yang terakumulasi lebih banyak jika dibandingkan tingkat di bawahnya.

Peristiwa yang terjadi pada rantai makanan tersebut menegaskan bahwa manusia pada jarak interaksi yang jauh dari sumber kontaminan dapat memiliki potensi yang kecil terpapar cemaran secara langsung. Akan tetapi, manusia sebagai konsumen tingkat akhir di dalam rantai makanan memiliki risiko akumulasi logam berat yang paling besar jika dibandingkan dengan organisme lainnya.

5. Penanganan Cemaran Logam Berat

Permasalahan cemaran logam berat menjadi perhatian dunia dan oleh karena itu banyak hal yang telah diupayakan untuk mengatasi masalah tersebut, baik secara konvensional maupun biologis.

Cemaran logam berat yang ditangani secara konvensional dilakukan melalui metode presipitasi anion, metode *electro-winning* oleh *electro-deposition* dengan menggunakan anoda tidak larut, metode *electro-coagulation* melalui perubahan elektrikal yang mengakibatkan partikel ternetralisasi dengan adanya perubahan ion, metode sementasi, serta metode *reverse osmosis* dan *electro-dialysis* menggunakan membran semi permeabel (Abdi dan Kazemi 2015).

Pendekatan lain yang telah dikembangkan adalah bioremediasi, yaitu penghilangan polutan dari biosfer dengan memanfaatkan organisme hidup (Kensa 2011; Samal dan Kotiyal 2013). Teknologi ini dipandang lebih aman, lebih bersih, efektif, lebih murah, dan ramah lingkungan (Bhatnagar dan Kumari 2013; Kulshreshtha et al. 2014). Pendekatan bioremediasi ini dimaknai sebagai teknologi hijau (*green technology*) (Hlihor dan Gavrilescu 2012).

Pada umumnya, proses bioremediasi lingkungan dilakukan oleh bioremediator, yaitu berupa tanaman (*phytoremediation*), jamur (*mycoremediation*), dan juga bakteri (*bacteria bioremediation*) (Sharma et al. 2013; Agwu 2015). Meskipun demikian, pada tingkat mikroorganisme, bioremediasi dapat juga dilakukan oleh kelompok algae dan plankton. Berbagai kajian menunjukkan bahwa algae dan plankton juga memiliki kemampuan bioremediasi (Al-Homaidan 2006).

Fitoremediasi adalah suatu proses penghilangan atau degradasi kontaminasi pada lingkungan dengan menggunakan tanaman. Tanaman menggunakan energi matahari melalui proses fotosintesis untuk mengekstrak bahan kimia dari lingkungan dan menyimpannya di bagian jaringan atau mengubah bahan toksik tersebut menjadi tidak toksik (Vidali 2001). Beberapa mekanisme yang dilakukan oleh tanaman untuk meremediasi cemaran antara lain fitoekstraksi, fitostabilisasi, fitofiltrasi, dan fitovolatilisasi (Akhtar et al. 2013a).

Pada pendekatan mikoremediasi dan bakterial bioremediasi, proses remediasi yang relatif serupa. Beberapa mekanisme yang dilakukan kelompok jamur juga dilakukan oleh kelompok bakteri. Mekanisme umum seperti biosorpsi, biopresipitasi, *bioleaching*, bioreduksi, dan bioakumulasi yang dapat dilakukan oleh jamur (Kurniawan 2016b) juga dilakukan bakteri, algae, atau plankton.

Oleh karena itu, proses bioremediasi yang umumnya dikelompokkan menjadi tiga berdasarkan subjek remediator, dapat juga hanya dikelompokkan menjadi dua tipe. Kedua tipe pengelompokan tersebut adalah proses bioremediasi yang dilakukan oleh tumbuhan (*phytoremediation*) dan bukan tumbuhan (*non phytoremediation*). Hal ini dapat dirujuk berdasarkan mekanisme-mekanisme yang dilakukan oleh setiap agen bioremediator, baik tanaman, jamur, bakteri, algae, maupun plankton. Konsep pengelompokan tipe bioremediasi ini juga

© 2019, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

dapat dikategorikan menjadi bioremediasi oleh organisme tingkat tinggi dan tingkat rendah.

Di alam, mekanisme bioremediasi tidak dapat dipisahkan antara remediasi oleh tumbuhan dan bukan tumbuhan atau organisme tingkat tinggi dan tingkat rendah. Secara natural, mekanisme bioremediasi dapat terjadi secara terintegrasi, bersinergi, dan tidak parsialistik. Oleh karena, konsep bioremediasi adalah pendekatan holistik di dalam suatu manajemen yang terintegrasi dan dapat melibatkan berbagai organisme berbeda untuk mengkatalis proses natural dekontaminasi di lingkungan (Akhtar et al. 2013b). Tanaman dan mikroba tanah atau organisme tingkat rendah lainnya dapat mengembangkan suatu *rhizospheric zone*, yaitu simbiosis yang sangat kompleks dan hubungan sinergistik yang juga digunakan sebagai alat atau instrumen pengakselerasi penghilangan atau degradasi kontaminan (Ahemad 2012).

6. Kesimpulan

Di dalam aktivitas eksplorasi dan eksploitasi bijih timah (*tin mining*) memang tidak menggunakan bahan kimia. Namun, aktivitas penambangan timah seperti aktivitas tambang lainnya telah meninggalkan dampak negatif bagi ekosistem. Salah satunya adalah dihasilkannya residu sejumlah logam berat seperti As, Cr, Cu, Pb, Zn, Fe, dan Sn yang terakumulasi di ekosistem tersebut.

Potensi toksisitas logam berat terlihat dari jenis logam beratnya, meskipun faktor struktur kimia logam berat belum diketahui. Kajian tentang sifat reaktif dari logam berat tersebut perlu dikaji untuk mengetahui daya toksik, resistensi dan resiliasi, mekanisme transportasi dan akumulasi di dalam tubuh organisme, hingga efeknya bagi kehidupan organisme.

Mekanisme akumulasi logam berat di dalam tubuh organisme dapat terjadi secara langsung dan tidak langsung. Transportasi ini terjadi melalui paparan langsung maupun jalur rantai makanan yang dimulai dari tingkat terendah hingga tertinggi. Hal ini menyebabkan akumulasi logam berat pada konsumen tingkat akhir lebih banyak dibandingkan dengan tingkat yang lebih rendah.

Penanganan secara fisikokimia dan biologi dapat diaplikasikan dan dikembangkan dalam rangka mengurangi cemaran logam berat yang ditemukan di ekosistem pascatambang timah.

DAFTAR PUSTAKA

Abate, A. 2017. Perovskite solar cells go lead free. Joule 1 (2017): 659-664

Abdi, O., Kazemi, M. 2015. A review study of biosorption of heavy metals and comparison between different biosorbents. J. Mater. Environ. Sci. 6 (5): 1386-1399

Agwu, A. 2015. Bioremediation and environmental sustainability in Nigeria. International Journal of Academic Research in Progressive Education and Development 1(3): 26-31

Ahemad, M., Malik, A. 2011. Bioaccumulation of heavy metals by zinc resistant bacteria isolated from agricultural irrigated with wastewater. Bacteriology Journal 2011: 1-10.

Ahemad, M. 2012. Implications of bacterial resistance against heavy metals in bioremediation: a review. Institute of Integrative Omics and Applied Biotechnology Journal 3(3): 39-46

Ahmad, A.K., Al-Mahaqeri, S.A. 2015. Human health risk assessment of heavy metals in fish species collected from catchments of former tin mining. International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology 2(4): 9-21

Akhtar, M.S., Chali, B., Azam, T. 2013a. Bioremediation of arsenic and lead by plants and microbes from contaminated soil. Research in Plant Sciences 1(3): 68-73

Akhtar, S., Hassan, M.M.U., Ahmad, R., Suthor, V., Yasin, M. 2013b. Metal tolerance potential of filamentous fungi isolated from soils irrigated with untreated municipal effluent. *Soil & Environment* 32(1): 55-62

Al-Homaidan, A.A. 2006. Heavy metal levels in Saudi Arabian *Spirulina*. Pakistan Journal of Biology Sciences 9(14): 2693-2695

Alia, N., Sardar, K., Said, M., Salma, K., Sadia, A., Sadaf, S., Toqeer, A., Miklas, S. 2015. Toxicity and bioaccumulation of heavy metals in spinach (*Spinacia oleracea*) grown in a controlled environment. Int. J. Environ. Res. Public Health 12(2015): 7400-7416

Arunakumara, K.K.I.U., Xuecheng, Z. 2008. Heavy metal bioaccumulation and toxicity with special reference to microalgae. J. Ocean Univ. Chin. 7(1): 25-30

Ashraf, M.A., Maah, M.J., Yusoff, I. 2011. Heavy metals accumulation in plants growing in ex tin mining catchment. International Journal of Environmental Science and Technology 8(2): 401-416

Ashraf, M.A., Maah, M.J., Yusoff, I. 2012. Speciation of heavy metals in the sediments of former tin mining catchment. Iranian Journal of Science and Technology 36(A2): 163-180

Aslam, B., Javed, I., Khan, F.H., Rahman, Z.U. 2011. Uptake of heavy metal residues from sewerage sludge in the milk of goat and cattle during summer season. Pakistan Veterinary Journal 31(1): 75-77

Azimi, S., Moghaddam, M.S. 2013. Effect of mercury pollution on the urban environment and human health. Environment and Ecology Research 1(1): 12-20

Badan Pusat Statistik. 2018. Produksi Barang Tambang Mineral, 1996-2015. bps.go.id [diakses pada 6 Maret 2018]

Bhatnagar, S., Kumari, R. 2013. Bioremediation: a sustainable tool for environmental management-a review. Annual Review & Research in Biology 3(4): 974-993

Chaalal, O., Zekri, A.Y. 2005. Uptake of heavy metals by microorganisms: an experimental approach. Energy Sources 27:87-100

De Vries, W., Romkens, P.F.A.M., Schutze, G. 2007. Critical soil concentrations of cadmium, lead, and mercury in view of health effects on humans and animals. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology 191: 91-130

Devkota, B., Schmidt, G.H. 2000. Accumulation of heavy metals in food plants and grasshoppers from the

© 2019, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Taigetos Mountains, Greece. Agriculture, Ecosystems and Environment 78(1): 85-91

Duffus, J.H. 2002. "Heavy metals" - a meaningless term?. Pure and Applied Chemistry 74(5): 793-807

Fu, F., Wang, Q. 2011. Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. J. Env. Man. 92(2011): 407-418

Gadd, G.M. 2010. Metals, minerals, and microbes: geomicrobiology and bioremediation. Microbiology 156(2010): 609-643

Govind, P., Madhuri, S. 2014. Heavy metals causing toxicity in animals and fishes. Research Journal of Animal, Veterinary and Fishery Sciences 2(2): 17-23

Gyang, J.D., Ashano, E.C. 2010. Effects of mining on water quality and the environment: a case study of parts of the Jos Plateau, North Central Nigeria. The Pacific Journal of Science and Technology 11(1): 631-639

He, W., Feng, Y., Li, X., Wei, Y., Yang, X. 2008. Availability and toxicity of Fe(II) and Fe(III) in Caco-2 cells. Journal of Zhejiang University SCIENCE B 9(9): 707-712

Hlihor, R.M., Gavrilescu, M. 2012. Book review: bioremediation and sustainability. EEMJ 11(12): 2335-2336

Irawan, R.R., Sumarwan, U., Suharjo, B., Djohar, S. 2014. Strategic model of tin mining industry in Indonesia (case study of Bangka Belitung Province). International Journal of Business and Management Review 2(3): 48-58

Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B.B., Beeregowda, K.N. 2014. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. Interdiscip Toxicol. 7(2): 60-72

Jaiswal, S. 2011. Role of rhizobacteria in reduction of arsenic uptake by plants: a review. J. Bioremed. Biodegrad. 2(4): 1-5

Juwarkar, A.A., Misra, R.R., Sharma, J.K. 2014. Recent trends in bioremediation. In: Parmar N, Singh A (eds.), Geomicrobiology and Biogeochemistry, Soil Biology 39. Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Kakimov, A., Kakimova, Z., Yessimbekov, Z., Bepeyeva, A., Zharykbasova, K., Zharykbasov, Y. 2013. Heavy metals distribution in soil, water, vegetation and meat in the Regions of East-Kazakhstan. Journal of Environmental Protection 4(11): 1292-1295

Kensa, V.M. 2011. Bioremediation - an overview. Jr. of Industrial Pollution Control 27 (2): 161-168

Kim, H.S., Kim, Y.J., Seo, Y.R. 2015. An overview of carcinogenic heavy metal: molecular toxicity mechanism and prevention. Journal of Cancer Prevention 20(4): 232-240

Kulshreshtha, S., Mathur, N., Bhatnagar, P. 2014. Mushroom as a product and their role in mycoremediation. AMB Express 4(29): 1-7

Kumar, A., Bisht, B.S., Joshi, V.D. 2010. Biosorption of heavy metals by four acclimated microbial species, *Bacillus* spp., *Pseudomonas* spp., *Staphylococcus* spp. and *Aspergillus niger*. J. Biol. Environ. Sci. 4(12): 97-108

Kumar, A., Bisht, B.S., Joshi, V.D., Dhewa, T. 2011. Review on bioremediation of polluted environment: a management tool. Int. J. Environ. Sci. 1(6): 1079-1093

Kurniawan, A. 2006a. Microorganism communities response of ecological changes in post tin mining ponds. Research & Reviews: A Journal of Microbiology and Virology 6(1): 17-26

Kurniawan, A. 2006b. Review: mikoremediasi logam berat. Jurnal Bioteknologi & Biosains Indonesia 3(1): 36-45

Kurniawan, A. 2017. Chronosequence effect of post tin mining ponds to metals residu and microecosystem change. Omni-Akuatika 13 (1): 60-65

Kurniawan, A., Oedjijono., Tamad., Sulaeman, U. 2019. The pattern of heavy metals distribution in time chronosequence of ex-tin mining ponds in Bangka Regency, Indonesia. Indonesian Journal of Chemistry 19(1):254-261

Lau, J.A., Lennon, J.T. 2012. Rapid responses of soil microorganisms improve plant fitness in novel environments. Proceedings of the National Academy of Sciences, 109(35): 14058-14062

Lone, M.I., He, Z.L., Stoffella, P.J., Yang, X. 2008. Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: progresses and perspectives. J. Zhe. Univ. Sci. B 9 (3): 210-220

Memon, A.R., Aktoprakligil, D., Ozdemir, A., Vertii, A. 2001. Heavy metal accumulation and detoxification mechanisms in plants. Turkish Journal of Botany 25(3): 111-121

Mkumbo, S. 2012. Development of a low cost remediation method for heavy metal polluted soils. [Thesis]. Royal Institute of Technology (KTH). [Sweden]

Moscatelli, M.C., Lagomarsino, A., Marinari, S., De Angelis, P., Grego, S. 2005. Soil microbial indices as bioindicators of environmental changes in a poplar plantation. Ecological Indicators 5(3): 171-179

Niemi, G.J., McDonald, M.E. 2004. Application of ecological indicators. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics 35(2004): 89-111

Paerl, H.W., Dyble, J., Moisander, P.H., Noble, R.T., Piehler, M.F., Pinckney, J.L., Steppe, T.F., Twomey, L., Valdes, L.M. 2003. Microbial indicators of aquatic ecosystem change: current applications to eutrophication studies. FEMS Microbiology Ecology 46(3): 233-246

Prakash, D., Gabani, P., Chandel, A.K., Ronen, Z., Singh, O.V. 2013. Bioremediation: a genuine technology to remediate radionuclides from the environment. Microb. Biotechnol. 6(4): 349-360

Rai, P.K. 2008. Heavy metal pollution in aquatic ecosystems and its phytoremediation using wetland plants: an ecosustainable approach. Int. J. Phytoremediation 10(2): 131-58

Raikwar, M.K., Kumar, P., Singh, M., Singh, A. 2015. Toxic effect of heavy metals in livestock health. Veterinary World 1(1):28-30

Rajendran, P., Muthukrishnan, J., Gunasekaran, P. 2003. Microbes in heavy metal remediation. Indian J. Exp. Biol. 41(2003): 935-944

Rascio, N., Navari-Izzo, F. 2011. Heavy metal hyperaccumulating plants: how and why do they do it? and what makes them so interesting?. Plant Science 180(2): 169-181

Rosidah., Henny, C. 2012. Kajian logam Fe, Al, Cu dan Zn pada perairan kolong paska penambangan timah di Pulau Bangka. Prosiding Seminar Nasional Limnologi VI: 611-619

Saeed, S.M., Shaker, I.M. 2008. Assessment of heavy metals pollution in water and sediments and their effect on *Oreochromis niloticus* in the Northern Delta Lakes, Egypt. 8th International Symposium on Tilapia in Aquaculture 2008: 475-490

Samal, B., Kotiyal, P.B. 2013. Bioremediation of copper contaminated soil using bacteria. Oct. Jour. Env. Res. 1(1): 5-8

© 2019, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Sayyed, R.Z., Patel, P.R. 2011. Soil microorganisms and environmental health. Int. J. Biotech & Biosci. 1(1): 41-66

Sepahy, A.A., Sharifian, S., Zolfaghari, M.R., Dermany, K.M., Rashedi, H. 2015. Study on heavy metal resistant fecal Coliforms isolated from industrial, urban wastewater in Arak, Iran. International Journal of Environmental Research 9(4): 1217-1224

Sharma, A., Mishra, M., Sheet, S., Thite, M. 2013. Role of microbes as cleaning degrading industrial wastes for environmental sustainability - a review. Recent Research in Science and Technology 5(5): 21-25

Srivastava, N.K., Majumder, C.B. 2008. Novel biofiltration methods for the treatment of heavy metals from industrial wastewater. Journal of Hazardous Materials 151(1): 1-8.

Suciu, I., Cosma, C., Todică, M., Bolboacă, S.D., Jäntschi, L. 2008. Analysis of soil heavy metal pollution and pattern in Central Transylvania. International Journal of Molecular Sciences 9(4): 434-453

Sudiyani, Y., Ardeniswan., Rahayuningwulan, D. 2011. Determinasi arsen (As) dan merkuri (Hg) dalam air dan sedimen di kolong bekas tambang timah (air kolong) di Propinsi Bangka Belitung, Indonesia. Ecolab 5(2): 55-66

Syarbaini., Warsona, A., Iskandar, D. 2014. Natural radioactivity in some food crops from Bangka-Belitung Islands, Indonesia. Atom Indonesia 40(1): 27-32

Tangahu, B.V., Abdullah, S.R.S., Basri, H., Idris, M., Anuar, N., Mukhlisin, M. 2011. A review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation. Int. J. Chem. Eng. 2011: 1-31

Tchounwou, P.B., Yedjou, C.G., Patlolla, A.K., Sutton, D.J. 2014. Heavy metals toxicity and the environment. NIH Public Access (2014): 1-30

Templeton, D.M. 2015. Speciation in metal toxicity and metal-based therapeutics. Toxics 2015 (*3*): 170-186

Valls, M., De Lorenzo, V. 2002. Exploiting the genetic and biochemical capacities of bacteria for the remediation of heavy metal pollution. FEMS Microbiology Reviews 26(2002): 327-338

Verma, D.K., Gupta, A.P. 2011. Removal of heavy metals from whole sphere by plants working as bioindicators - a review. Basic Res. J. Pham. Sci. 1 (1): 1-7

Vidali, M. 2001. Bioremediation: an overview. Pure and Applied Chemistry 73(7): 1163-1172

Yahaya, M.I., Mohammad, S., Abdullahi, B.K. 2009. Seasonal variations of heavy metals concentration in abattoir dumping site soil in Nigeria. Journal of Applied Sciences and Environmental Management 13(4): 9-13

Yan-De, J., Zhen-Li, H., Xiao-E, Y. 2007. Role of soil *Rhizobacteria* in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. Journal of Zhejiang University SCIENCE B 8(3):192-207

© 2019, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP