

TEKNOLOGI BIOSORPSI OLEH MIKROORGANISME, SOLUSI ALTERNATIF UNTUK MENGURANGI PENCEMARAN LOGAM BERAT

(BIOSORPTION TECHNOLOGY BY MICROORGANISMS, AN ALTERNATIVE SOLUTION FOR DECREASE HEAVY METAL POLLUTION)

Emmy Ratnawati, Rahyani Ermawati dan Siti Naimah

Balai Besar Kimia dan Kemasan, Departemen Perindustrian RI
Jl. Balai Kimia No1 Pekayon, Pasar Rebo, Jakarta Timur

Email: emmyratna.hs@gmail.com

ABSTRAK

Biosorpsi merupakan teknologi pengolahan limbah terbaru yang dapat menyisihkan/menghilangkan logam berat yang bersifat racun, oleh karena itu biosorpsi dapat dipertimbangkan sebagai suatu teknologi alternatif yang ramah lingkungan untuk mengolah limbah cair industri yang secara ekonomi layak digunakan. Proses 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. Hal lain yang membuat biosorpsi menjadi pilihan menarik adalah tersedianya berbagai bahan biosorben yang melimpah seperti fungi, bakteri, *yeast*, algae dan biopolimer seperti alginat dan kitosan yang merupakan produk samping industri perikanan. Variabel yang perlu diperhatikan dalam mendesain dan mengoperasikan proses biosorpsi dengan mikroorganisme adalah seleksi dan pemilihan biomassa yang sesuai serta perlakuan awalnya (pemilihan strain yang sesuai, metode penanganan mikroorganisme dan kondisi fisik biomassa), waktu tinggal dan waktu kontak proses (immobilisasi sel, pH), konsentrasi biomassa, proses pemisahan dan *recovery* biomassa serta pembuangan biomassa yang telah digunakan dengan pengeringan dan insinerasi. Teknologi biosorpsi yang melibatkan mikroorganisme dalam mengatasi pencemaran lingkungan oleh logam berat ini masih memerlukan banyak pengembangan melalui penelitian penelitian dan kajian yang berkesinambungan sehingga dapat diperoleh hasil terbaik untuk mengatasi pencemaran logam berat.

Kata kunci : Pencemaran, Biosorben, Biosorpsi, Logam Berat, Ramah lingkungan

ABSTRACT

Biosorption is a new waste water treatment technology to remove toxic heavy metal which can be used as an other environmental friendly and economic technology alternative. The biosorption process occurred because of availability for biological materials or biosorbent and heavy metal with high affinity to bind biosorbent. Another reason that biosorption choose as an attractive technology is because of the abundant availability of biosorbent materials such as fungi, bacteria, yeast and bio polimer such as chitosan, alginate from fisheries side products. Variables that should be consider in designing and operating biosorption process with microorganism are in the right selection of biomass in initial treatment (strain selection, microorganism method treatment, biomass physical condition), retention time and process contact time (cell immobilization, pH), biomass concentration, separation process, biomass recovery, disposal of the used biomass with drying and burning in incinerator. The biosorption technology using microorganism in solving the heavy metals environment problem still need improvement through sustainable research and development to get the best result to solve heavy metal pollution.

Key words : Pollution, Biosorbent, Biosorption, Heavy metals, Environment friendly.

PENDAHULUAN

Semakin berkembangnya kegiatan industri, selain membawa dampak positif juga mengakibatkan dampak negatif berupa pencemaran akibat limbah yang dikeluarkan.

Isu pencemaran logam berat meningkat sejalan dengan pengembangan berbagai penelitian yang mulai diarahkan pada berbagai aplikasi teknologi untuk menangani polusi lingkungan yang disebabkan oleh logam berat. Polutan logam berat yang ada dalam limbah industri termasuk merkuri, tembaga, timbal, krom, seng, kadmium, uranium, selenium, copper, nikel banyak terdapat pada beberapa industri seperti industri pelapisan logam, cat dan pewarnaan, baterai basah atau *accu*, fotografi, dan printing/percetakan, kegiatan pertambangan, pembuangan *sludge*, *fly ash* dari insenerator, proses radio aktif, pulp dan kertas, penyamakan kulit, pupuk petrokimia dan pestisida. Limbah logam berat tersebut menurut PP No.45 Tahun 1999 tentang Pengolahan Limbah B3, sebagian termasuk dalam kategori limbah yang berbahaya dan beracun (B3) dengan demikian limbah cair ini harus dikelola sesuai dengan tata cara pengolahan limbah B3

Logam berat dalam limbah biasanya berada dalam berbagai macam kondisi seperti tidak terlarut, terlarut, tereduksi, teroksidasi dan kompleks. Kecemasan yang berlebihan terhadap keberadaan logam berat di lingkungan dikarenakan oleh tingkat keracunannya yang sangat tinggi dalam seluruh aspek kehidupan makhluk hidup. Sebagai contoh beberapa ion logam berat seperti timbal, kadmium dan krom pada kenyataannya sangat berbahaya bagi kesehatan manusia dan kelangsungan kehidupan lingkungan alam. Walaupun pada konsentrasi yang rendah, efek ion logam berat dapat berpengaruh langsung hingga terakumulasi pada rantai makanan. Selanjutnya timbal menunjukkan efek beracun pada sistem syaraf, hematologik dan dapat mempengaruhi kerja ginjal (Suhendrayatna, 2001).

Berdasarkan pengetahuan kita terhadap resiko dan pengaruh polusi logam berat terhadap lingkungan, maka pencemaran logam berat ke lingkungan harus diminimalkan dan sistem pengolahan limbahnya harus diperbaiki. Pengolahan limbah yang mengandung logam berat yang sudah dilakukan selama ini adalah secara kimia fisika untuk menghilangkan logam berat antara lain dengan cara oksidasi dan reduksi, koagulasi dan sedimentasi, filtrasi, *ion exchange*, *reverse osmosis*, pengolahan elektrokimia dan penguapan (Baik *et.al.*, 2002).

Metode kimia fisika yang sekarang banyak digunakan mempunyai beberapa kelemahan, diantaranya biaya instalasi dan operasional yang tinggi, banyak membutuhkan bahan kimia dan terbentuknya lumpur (*sludge*) yang banyak sehingga bermasalah karena memerlukan pengolahan lanjutan dan biaya tinggi dalam pembuangannya. Meskipun cara pengendapan sebagai hidroksida atau endapan CaCO_3 dapat memisahkan logam berat, namun cara ini kurang efisien karena tidak semua logam dapat terendapkan secara sempurna seperti Pb, Cd dan Hg (Haris dan Remalow, 1991) sehingga konsentrasi yang tertinggal dalam air buangan masih melebihi dari standar baku mutu yang diperbolehkan.

Oleh karena itu perlu dikembangkan suatu cara pengolahan air limbah dengan suatu teknologi alternatif yang ramah lingkungan, biaya rendah dan mempunyai efisiensi yang tinggi untuk mengolah limbah, antara lain dengan pemanfaatan kemampuan beberapa mikroorganisme sebagai penyerap logam berat. Salah satu teknologi alternatif untuk mengolah limbah dengan logam berat adalah dengan biosorpsi. Hal lain yang membuat biosorpsi menjadi pilihan menarik adalah tersedianya berbagai bahan biosorben seperti fungi, bakteri, *yeast*, *algae* dan biopolimer seperti alginat dan kitosan yang merupakan produk samping industri perikanan.

Untuk skala industri, biaya pengadaan biomassa mikroorganisme ini secara ekonomi kurang menguntungkan, oleh karena itu limbah biomassa dari limbah industri, seperti industri fermentasi dapat dimanfaatkan.

TEORI

Biosorpsi

Pengolahan secara biologi untuk mengurangi logam berat pada limbah tercemar diketahui sebagai teknologi alternatif yang berpotensi untuk dikembangkan dibandingkan dengan proses kimia. Karena perlindungan terhadap lingkungan saat ini telah menjadi masalah yang sangat penting, biosorpsi menjadi teknik yang menjanjikan dalam menghilangkan logam berat (D Zhou dkk, 2004). Biosorpsi merupakan teknologi pengolahan limbah terbaru yang dapat menyisihkan/menghilangkan logam-logam beracun dalam limbah cair, oleh karena itu biosorpsi dapat dipertimbangkan sebagai suatu

teknologi alternatif untuk pengolahan limbah cair industri (Martins, *et.al.*, 2006).

Proses 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 dan Johan, 2007). Pengikatan logam berat yang berada dalam suatu larutan yaitu dengan cara pertukaran ion dimana ion-ion pada dinding sel mikroorganisme digantikan oleh ion-ion logam berat (Martias *et.al.*, 2006). Kompleksitas ion logam berat yang bermuatan positif berinteraksi dengan pusat aktif yang bermuatan negatif pada permukaan dinding sel atau dalam polimer ekstra seluler, seperti protein dan polisakarida sebagai sumber gugus fungsi berperan penting dalam mengikat ion logam berat.

Proses penyerapan ini berlangsung cepat dan terjadi pada sel hidup maupun sel yang telah mati (Volesky, 2007). Penyerapan logam berat oleh mikroorganisme dapat dilakukan melalui dua cara, yaitu proses penyerapan yang terjadi secara *absorpsi* (bioakumulasi) dan proses penyerapan yang terjadi secara adsorpsi (biosorpsi) (Vieira, *et.al.*, 2000).

Proses penyerapan yang terjadi secara adsorpsi (bioakumulasi) disebut juga mekanisme resistensi. Mekanisme resistensi dapat dilakukan melalui pengekskresian/perembesan senyawa pengkelat (*chelator*) ke luar sel, pengikatan ion logam oleh molekul intraseluler seperti metalotionin, atau akumulasi ion logam pada organ tertentu seperti vakuola dan mitokondria (Kapoor and Viraraghavan, 1995).

Sumber Biomassa Sebagai Biosorben dan Sifatnya

Pengkajian tentang kemampuan pengikatan logam berat oleh beberapa jenis biomassa sudah dimulai sejak tahun 1985. Beberapa jenis biomassa memang sangat efektif dalam mengakumulasi logam berat. Ketersediaan bahan untuk biomassa adalah faktor yang harus dipertimbangkan untuk menseleksi biomassa sehingga tujuan penggunaannya menjadi jelas. Untuk memenuhi nilai keekonomian dan ramah lingkungan, biomassa harus berasal dari sumber alami atau bahkan dari limbah.

Beberapa sumber bahan biomassa yang dapat digunakan sebagai biosorben untuk proses biosorpsi adalah :

- Mikroorganisme yang ada dalam jumlah yang banyak di alam dan pertumbuhannya cepat seperti bakteri, jamur, ragi, kapang
- Limbah industri fermentasi.
- Biopolimer seperti alginat, kitosan (produk samping hasil perikanan).
- Serat alam yang mengandung selulosa (*Cellulosic nature*)

Biosorben yang berasal dari biomassa harus kuat, bersifat *porous* dan mempunyai kemampuan penyerapan yang tinggi. Granulasi dari bahan biomassa kering dengan harga yang ekonomis adalah langkah yang penting dalam rangka aplikasinya pada proses biosorpsi

HASIL DAN PEMBAHASAN

Mekanisme Biosorpsi

Sebagian besar mekanisme penyisihan/ removal logam berat oleh mikroorganisme adalah proses pertukaran ion yang mirip pertukaran ion pada resin. Mekanisme ini dapat dibagi atas 3 (tiga) cara, yakni: berdasarkan metabolisme sel (proses yang tergantung pada metabolisme dan proses yang tidak tergantung pada metabolisme sel); berdasarkan posisi logam berat yang disisihkan/diremoval (akumulasi ekstraseluler/ presipitasi, akumulasi intraseluler dan penyerapan oleh permukaan sel); dan berdasarkan cara pengambilan logam berat (Sinly dan Johan, 2007).

Cara pengambilan logam berat dapat dibagi 2 yaitu :

Penangkapan Pasif (*Passive Uptake*)

Passive uptake dikenal dengan istilah biosorpsi. Proses ini terjadi ketika ion logam berat terikat pada dinding sel dengan dua cara yang berbeda, pertama pertukaran ion dimana 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 ini bersifat bolak-balik dan cepat.

Proses bolak-balik ikatan logam berat di permukaan sel ini 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 dimana logam berat dapat terendapkan sebagai garam yang tidak terlarut. Misalnya pH optimum biosorpsi ion Pb, Ni dan Cu oleh *Zooglea ramigera* adalah berkisar 4,0 hingga 4,5; sedangkan untuk Fe adalah pH 2,0.

Penangkapan Aktif (*Active Uptake*)

Penangkapan aktif dapat terjadi pada berbagai sel hidup. Mekanisme ini secara simultan ini terjadi sejalan dengan konsumsi ion logam untuk pertumbuhan mikroorganisme atau akumulasi intraseluler ion logam tersebut. Logam berat dapat juga diendapkan pada proses metabolisme dan ekskresi pada tingkat kedua. Proses ini tergantung pada energi yang terkandung dan sensitifitasnya terhadap parameter parameter yang berbeda seperti pH, suhu, kekuatan ionik, dan cahaya. Disamping itu proses ini dapat dihambat oleh suhu yang rendah, tidak tersedianya sumber energi dan penghambat metabolisme sel. Disisi lain, biosorpsi logam berat dengan sel hidup ini terbatas dikarenakan oleh akumulasi ion yang menyebabkan racun terhadap mikroorganisme.

Kedua mekanisme diatas dapat berjalan secara serentak. Pada beberapa penelitian menunjukkan ikatan kadmium pada dinding sel *Ankistrodermus* dan *Chlorella vulgaris* mencapai kira kira 80 % dari total akumulasinya di sel, sedangkan arsenik yang berikatan dengan dinding sel *chlorella vulgaris* rata rata 26 %. Menurut Nakajima (1991), *selektif uptake* ion logam antara sel hidup dan sel mati dari *chlorella regularis* menunjukkan bahwa jumlah logam berat yang diadsorpsi oleh sel mati kira kira dua kali lebih besar dibandingkan dengan yang diabsorpsi oleh sel hidup. Protein dan polisakarida memegang peranan penting dalam proses biosorpsi ion logam berat dimana terjadinya ikatan kovalen termasuk juga dengan gugus amino dan gugus karbonil. Hasil studi komparatif biosorpsi ion logam berat oleh berbagai jenis mikroorganisme (Nakajima, 1991), dapat dilihat pada Tabel 1

Berdasarkan hasil penelitian telah diketahui bahwa yang berperan penting di dalam proses biosorpsi adalah gugus karboksil, hidroksil dan kelompok amino pada protein dan

Tabel 1. Studi komparatif biosorpsi ion logam berat oleh berbagai jenis mikroorganisme (Nakajima, 1991).

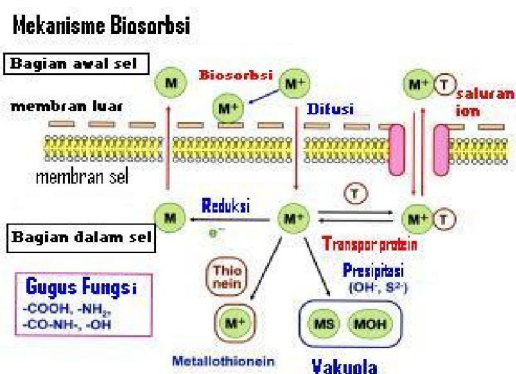
Mikro-organisme	Metode	Logam Berat	Initial Conc. (ppm)	% Removal
<i>Rhizomucor miehi</i> (F)	passive uptake	Cu	100	96
<i>Mucur mucedo</i> (F)	passive uptake	Cu	100	86
<i>Rhizopus stolonifer</i> (F)	passive uptake	Cu	100	82
<i>Aspergillus oryzae</i> (F)	passive uptake	Cu	100	58
<i>Penicillium chrysogenum</i> (F)	passive uptake	Cu	100	18
<i>Ecklonia radiata</i> (F)	passive uptake	Cu	0,29	95
<i>Phellinus badius</i> (F)	passive uptake	Cu	0,29	43
<i>Pinus radiata</i> (F)	passive uptake	Cu	0,29	24
<i>Saccharomyces cerevisie</i> (Y)	active uptake	Cu	0,29	17
<i>Chlorella vulgaris</i> (A)	passive uptake	Pb	100,2	83
<i>Ecklonia radiata</i> (A)	passive uptake	Pb	0,82	100
<i>Phellinus badius</i> (F)	passive uptake	Pb	0,82	50
<i>Pinus radiata</i> (F)	passive uptake	Pb	0,82	21
<i>Saharomyces cerevisie</i> (Y)	active uptake	Pb	0,82	34
<i>Chlorella vulgaris</i> (A)	active uptake	As	9	17
<i>Citrobacter sp</i> (B)	passive uptake	Cd		40
<i>Ecklonia radiata</i> (A)	passive uptake	Cd	0,48	90
<i>Phellinus badius</i> (F)	passive uptake	Cd	0,48	33
<i>Pinus radiata</i> (F)	passive uptake	Cd	0,48	29
<i>Saccharomyces cerevisie</i> (Y)	active uptake	Cd	0,48	10

Keterangan:

F : Fungi; A: Algae; Y: Yeast; B: Bakteri

kitin/kitosan pada dinding sel (Brady and Duncan, 1994). Untuk lebih jelasnya mekanisme biosorpsi pada sel mikroorganisme dapat dilihat pada Gambar 1.

Pada permukaan dinding sel terjadi interaksi ionik antara kation logam dengan gugus fungsi makromolekul. Kekuatan interaksi tergantung pada jari-jari ion, muatan ion logam,



Gambar 1. Mekanisme Biosorpsi pada Sel Mikroorganisme
(Sumber: <http://www.miyazaccu-med.ac.jp/MMCCHEM/ResourceRecycle.html>, 20 Agustus 2007)

derajat ionisasi anion, pH dan persaingan dari muatan positif tertentu dengan polimer. Interaksi ini terjadi pada gugus fungsi yang bermuatan parsial negatif seperti gugus karboksil (Zimmermann and Wolf, 2002)

Selanjutnya interaksi polar terjadi apabila polisakarida penyusun dinding sel biomassa seperti kitin dan kitosan dapat membentuk kompleks dengan ion logam transisi melalui interaksi dipol-dipol antara kation dengan gugus polar seperti -OH, -NH₂ dan C=O. Suatu kation dengan daya mempolarisasi yang tinggi disenangi oleh ligan sebagai pusat muatan positif berkepadatan tinggi, sehingga menghasilkan interaksi yang kuat. Pembentukan kompleks tergantung pada kemampuan berinteraksi beberapa gugus dalam makro molekul yang berfungsi sebagai ligan untuk membentuk khelat (Zimmermann and Wolf, 2002).

Protein mengandung banyak gugus ionik dan gugus polar lainnya, maka interaksi dengan kation-kation logam menjadi sangat kuat dan tidak spesifik. Beberapa protein permukaan sel atau protein yang merembes dari membran atau sitoplasma sel-sel mati dapat mengikat kation dengan cara ini. Gugus -SH yang terdapat dalam metallothionein membentuk kompleks lebih kuat dan spesifik dengan beberapa logam toksik (Zimmermann and Wolf, 2002).

Dari proses interaksi mikroba dengan logam berkonsentrasi tinggi dapat menyebabkan efek toksik. Pada konsentrasi yang tinggi, logam akan diinduksi ke dalam sel sebagai mekanisme resistensi atau perwujudan

dari toksisitas. Logam berat yang diinduksi ke dalam sel akan memicu terbentuknya radikal bebas. Radikal bebas tersebut akan terikat kuat dengan protein dan DNA, merusak integritas membran sel, menghambat kerja enzim, dan dapat menyebabkan keluarnya sitoplasma yang akan merubah morfologi sel (Avery, 2001).

Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Biosorpsi Logam Berat

Faktor Fenotip

Faktor fenotip yang mempunyai peranan penting dalam penyerapan logam berat adalah struktur dan komponen dinding sel. Struktur dan komponen dinding sel sangat menentukan kemampuan biosorpsi logam berat karena dinding sel merupakan struktur pertama yang berinteraksi dengan ion logam (Zimmermann and Wolf, 2002). Pengikatan ion logam terjadi karena adanya gugus-gugus fungsional bermuatan yang bertindak sebagai reseptor logam melalui ikatan ionik dan ikatan kovalen (Kapoor and Viraraghavan, 1995).

Faktor Biomassa

Biomassa yang berbeda memberikan afinitas yang bervariasi dalam menyerap logam. Beberapa biomassa memperlihatkan serapan yang cukup besar terhadap suatu logam berat, sementara biomassa yang lain tidak dapat memperlihatkan ikatan yang spesifik dengan logam (Gupta, *et al.*, 2000). Hal ini terjadi karena perbedaan komposisi dinding sel tiap-tiap biomassa sehingga gugus fungsional yang terdapat di dalamnya juga berbeda. Pada prinsipnya biomassa mengandung beberapa macam gugus fungsi yang berinteraksi dengan logam melalui interaksi ionik, interaksi polar dan gabungan keduanya (Gupta, *et al.*, 2000).

Faktor Medium

Komposisi medium dapat mempengaruhi biosorpsi logam berat, dapat menyebabkan presipitasi logam sehingga menurunkan konsentrasi logam dalam larutan, Faktor lingkungan yang sangat berpengaruh pada kemampuan biosorpsi tersebut adalah pH dari medium karena sangat mempengaruhi ketersediaan logam berat dalam medium dan kereaktifan gugus fungsional yang berperan

dalam pengikatan ion logam berat (Cho and Kim, 2004).

Selanjutnya medium yang mengandung lebih dari satu jenis logam akan mempengaruhi biosorpsi karena sifat fisika-kimia suatu logam juga akan mempengaruhi ketersediaan logam lain yang terlarut di dalam medium (Beveridges, *et.al*, 1997).

Konsep Dasar Aplikasi Proses Biosorpsi

Aplikasi proses biosorpsi untuk pengolahan limbah dengan menggunakan mikroorganisme guna mengatasi permasalahan pencemaran logam berat adalah sangat simpel. Mikroorganisme yang telah dipilih dimasukkan, ditumbuhkan kemudian dikontakkan dengan air yang tercemar logam berat dalam waktu tertentu agar biomassa berinteraksi dengan ion logam berat, selanjutnya biomassa ini dipisahkan dari cairan. Biomassa yang terikat dengan logam berat diregenerasi untuk digunakan kembali atau dibuang ke lingkungan.

Beberapa variabel yang perlu diperhatikan dalam mendesain dan mengoperasikan proses biosorpsi dengan mikroorganisme (Suhendrayatna, 2001), sebagai berikut :

- a. Seleksi dan pemilihan biomassa yang sesuai serta perlakuan awalnya (pemilihan strain yang sesuai, metode penanganan mikroorganisme dan kondisi fisik biomassa)
- b. Waktu tinggal dan waktu kontak proses (immobilisasi sel, pH).
- c. Konsentrasi biomassa
- d. Proses pemisahan dan rekoveri biomassa (proses pemisahan biomassa dari air tercemar setelah pengolahan)
- e. Pembuangan biomassa yang telah digunakan (biomassa yang berikatan dengan logam berat dapat di reduksi dengan menggunakan sistem pengeringan)

Seleksi dan pemilihan biomassa yang sesuai dan penanganan awal merupakan unsur yang penting dalam aplikasi proses biosorpsi. Proses ini meliputi pemilihan *strain* yang sesuai, metode kulturisasi dan kondisi fisik biomassa. Yang paling penting dalam pemilihan biomassa ini adalah toleransi mikroorganisme terhadap ion logam berat itu sendiri. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa jenis mikroalga seperti *Dunaliella tertiolecta*, *Scenedemusacutus*, *Chlorella vulgaris*, *Nostoc sp*, *Phormidium sp*, *Euglena*

gracilis mempunyai toleransi yang tinggi terhadap pengambilan ion logam berat. Waktu tinggal dan waktu kontak juga sangat berpengaruh terhadap desain proses biosorpsi termasuk kedalamnya immobilisasi sel, pH dan konsentrasi biomassa. Penggunaan sel hidup mempunyai sejumlah kelebihan, sementara itu biomassa lebih praktis dikemas dalam bentuk bubuk (powder). Hasil penelitian Augusto da cocta menyimpulkan bahwa *Chlorella homospaera* yang diimmobilisasikan pada alginate menghasilkan sistem yang baik untuk mereduksi kadmium, seng, dan emas dari suatu perairan yang tercemar. Dengan inisial konsentrasi logam beratnya berkisar 20/-27 ppm, Cd dan Zn dapat direduksi sebesar 99% dalam jangka waktu 60 menit dan 90% tereduksi setelah 30 menit. Wilkinson dkk (26) melaporkan sel immobilisasi dari *chlorella emersonni* dapat mengakumulasi merkuri lebih tinggi dibandingkan dengan sel tanpa immobilisasi. Proses pemisahan dan rekoveri merupakan proses pemisahan biomassa setelah proses biosorpsi. Proses filtrasi dan sentrifusi yang dilakukan di laboratorium tidak praktis bila diterapkan di industri, sehingga penerapan immobilisasi mikroorganisme yang dikemas pada suatu kolom dipandang praktis untuk digunakan. Pembuangan limbah dari proses biosorpsi juga merupakan aspek penting mengingat limbah tersebut mengandung konsentrat logam berat yang berbahaya. Bila proses biosorpsi digunakan sebagai teknologi alternatif untuk mengolah limbah cair, regenerasi biosorben sangat penting dilakukan untuk menekan biaya dan membuka kemungkinan untuk melakukan rekoveri logam berat. Apabila sludge biosorbent akan dibuang harus dikeringkan dahulu dan dibakar di insinerator sehingga tidak mencemari lingkungan.

KESIMPULAN

Biosorpsi merupakan teknologi pengolahan limbah terbaru yang dapat menyisihkan/ menghilangkan logam berat beracun, oleh karena itu biosorpsi dapat dipertimbangkan sebagai suatu teknologi alternatif yang ramah lingkungan untuk pengolahan limbah cair industri yang secara ekonomi layak digunakan .

Variabel yang perlu diperhatikan dalam mendesain dan mengoperasikan proses biosorpsi dengan mikroorganisme adalah seleksi dan pemilihan biomassa yang sesuai

serta perlakuan awalnya (pemilihan *strain* yang sesuai, metode penanganan mikroorganisme dan kondisi fisik biomassa), waktu tinggal dan waktu kontak proses (immobilisasi sel, pH), konsentrasi biomassa, proses pemisahan dan rekoveri biomassa dan pembuangan biomassa yang telah digunakan dengan pengeringan dan insinerasi.

Teknologi biosorpsi yang melibatkan mikroorganisme dalam mengatasi pencemaran lingkungan oleh logam berat ini masih memerlukan banyak pengembangan melalui penelitian penelitian dan kajian yang berkesinambungan sehingga dapat diperoleh hasil terbaik untuk mengatasi masalah tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ahalya, N., Ramachandra, T.V., and Kanamadi, R.D. 2003. Biosorption of Heavy Metals, *Res J. Chem. Environment* No.7(4): 71-79.
- [2] Avery, S.V. 2001. Metal toxicity in yeast and the role of oxidative stress. *Adv. Appl. Microbiol.* 49: 111-142
- [3] Baik, W.Y.; Bae, J.H.; Cho, K.M. Hartmeier, W. 2002. Biosorption of heavy metals using whole mold mycelia and parts thereof, *Bioresource Technology*, Vol. 81, No. 3, p. 167-170.
- [4] Beveridges, T.J., Hughes, M.N., Lee, H., Leung, K.T., Poole, R.K. Savvaidis, I., Silver, S., and Trevors, J.T. 1997. *Metal-microbe interactions: Cotemporary approaches*. Academic Press Limited, London : 177-232.
- [5] Brady, D., and Duncan, J.R. 1994. Binding of heavy metals by the cell walls of *Saccharomyces cerevisiae*. *Enzyme Microb. Technol.* 16: 633-638.
- [6] Gokulapalan, C., Das, Lulu and Nair, M.C. 1994. *Advanced in Mushroom Biotechnology*, ed 1, Scientific Publisher, Jodhpur, India.
- [7] Gupta, R., Ahuja, P., Khan, S., Saxena, R.K., and Mohapatra, H. 2000. Microbial biosorbents: Meeting Challenges of Heavy Metals Pollution in Aqueous Solutions. *Current Science.* 78(8): 967-973.
- [8] Han, R., Hongkui, L., Yanhu, L., Zhang, J., Xiao, H., and Shi, J. 2006. Biosorption of Copper and Lead ions by waste beer yeast. *Journal of Hazardous Materials*, Vol.137, No.3, p. 1569-1576.
- [9] Kapoor, A., and Viraraghavan, T. 1995. Heavy metal biosorption sites in *Aspergillus niger*. *Bioresource Technology*, Vol. 61. No.3, p. 221-227
- [10] Martins, B.L., Cruz C.V., Luna, A.S., and Henriques, C.A. 2006. A Sorption and desorption of Pb²⁺ ions by dead *Sargassum* sp. *Biomass. Biochemical Engineering Journal*, Vol. 27, No. 3, p. 310-314.
- [11] Metcalf and Eddy. 1991. *Wastewater Engineering. Treatment, Disposal, and Reuse*. Third Edition. McGraw-Hill, Inc., New York.
- [12] Nakajima, T. Horikoshi, dan T. Sakaguchi, 1991. Application Microbiology, *Biotechnology. European Journal*, 12, 76 – 83.
- [13] Parvathi, K., Nagendran, R., and Narehkumar, R. 2007. Lead biosorption onto waste beer yeast by-product, a means to decontaminate effluent generated from battery manufacturing industry. *Electronic Journal of Biotechnology*, Vol.10, No.1.
- [14] Sinly, E.P., dan Johan, A.P. 2007. Bioremoval, Metode Alternatif untuk Menanggulangi Pencemaran Logam Berat, *Artikel*, Universitas Lampung.
- [15] Suhendrayatna. 2001. *Bioremoval Logam Berat dengan Menggunakan Mikroorganisme: Suatu Kajian Kepustakaan (Heavy Metal Bio-removal by Microorganisms: A Literature Study)*. Institute for Science and Technology Studies (ISTECS) - Chapter Japan, disampaikan pada Seminar on-Air Bioteknologi untuk Indonesia Abad 21.
- [16] Vieira, R.H., and Volesky, B. 2000. Biosorption: a solution to pollution? *Review Article, Interntl. Microbiol* 3: p. 17-2
- [17] Zimmermann, M., and Wolf, K. 2002. Biosorption of Metals. *The mycota, Industrial Application*. Vol.10: 355-364.