

PERANAN MIKROORGANISME DALAM BIOREMEDIASI TANAH YANG TERCEMAR LOGAM BERAT DARI LIMBAH INDUSTRI (Review)

Sri Pudji Rahayu*

Abstrak

Tingkat pencemaran logam-logam berat dari industri ke tanah dan sungai di daerah industri sudah tidak terkendali. Untuk memulihkan tanah yang tercemar tersebut dapat dilakukan dengan berbagai cara, salah satunya dengan cara biologi yang disebut bioremediasi. Bioremediasi dilakukan dengan memanfaatkan mikroorganisme untuk rehabilitasi lingkungan karena dapat mendegradasi atau mengubah limbah beracun menjadi tidak beracun. Beberapa jenis mikroorganisme sangat berperan dalam bioremediasi, diantaranya adalah *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Moraxella*, *Acinetobactor*, *Burkholderia* dan *Alcaligenes*. Beberapa faktor yang perlu diperhatikan dalam mendesain dan mengoperasikan proses bioremediasi yang melibatkan mikroorganisme adalah seleksi dan pemilihan mikroorganisme yang sesuai dengan treatment awalnya, waktu tinggal dan waktu kontak proses, proses pemisahan dan rekoveri mikroorganisme, pembuangan mikroorganisme yang telah digunakan, dan perhitungan ekonomis dari proses bioremediasi.

Abstract

Heavy metals pollution level to soil and rivers of industrial area have become a serious problems. Several ways can be used to rehabilitate the polluted area, one of them is biological treatment which is called bioremediation. The bioremediation can be done by microorganism, because microorganism is able to degrade or remove hazardous waste. Several spesies of microorganism play important role on the bioremediation, for example spesies of *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Moraxella*, *Acinetobactor*, *Burkholderia* dan *Alcaligenes*. To operate and design the bioremediation process should pay attention on many factors such as selection of microorganism used and its pre treatment, retention and contact time, microorganism recovery, the discharge of biomass and techno-economical calculation.

Keyword: bioremediation, heavy metals and microorganism

1. PENDAHULUAN

Pembangunan industri yang pesat selain bermanfaat bagi pembangunan ekonomi juga meninggalkan sisa pencemaran yang berupa limbah padat yang dapat menurunkan kualitas lingkungan. Penggunaan senyawa organik dan logam-logam berat secara intensif di industri telah banyak menimbulkan kontaminasi yang serius di tanah dan air. Tingkat pencemaran logam-logam berat dari industri ke tanah dan sungai di daerah industri sudah mencapai tahap yang mencemaskan seperti yang dilaporkan oleh Priyanto dan Suryati (2000) dalam Priyanto (2006) menyatakan bahwa kandungan 4 logam berat di Jakarta dan

menonjol kegiatan industrinya tingkat pencemaran logam timbal dan kromium di tanah mencapai 206-449 mg/kg dan 56-266 mg/kg, sementara di pedesaan yang jauh dari kegiatan industri hanya 24 mg/kg dan 1 mg/kg untuk tibal dan kromium.

Limbah padat industri terutama yang mengandung B-3 harus dikelola sesuai aturan yang berlaku yaitu diolah dan ditimbun ditempat khusus penimbunan limbah, tetapi pada umumnya limbah masih banyak yang dibuang dan ditimbun di suatu lokasi biasanya sekitar pabrik sehingga dapat menimbulkan masalah serius terhadap lingkungan. Menurut Deputi VII Bidang Pembinaan Sarana Teknis Pengelolaan Lingkungan Kementrian LH, hanya separuh dari

*Balai Besar Kimia dan Kemasan

industri kimia yang peduli terhadap lingkungan terutama industri berskala besar, sedang industri berskala kecil umumnya masih membuang limbah dari pabriknya secara konvensional yaitu hanya ditimbun di suatu lokasi tertentu dari pabrik sehingga timbullah kasus-kasus pencemaran (Suara Pembaruan, 2003).

Limbah industri yang berupa padatan atau sludge (lumpur) hasil akhir dari pengolahan limbah cair (IPAL) tergolong limbah bahan berbahaya dan beracun (B3). Limbah tersebut dapat dikategorikan sebagai limbah B-3 sesuai PP 85 Tahun 1999 karena mengandung logam dan logam berat seperti Fe, Zn, Pb, Cr, Ni, Cu, Cd dan lain-lain yang sangat berbahaya bagi makhluk hidup dan lingkungan. Selain itu limbah padat industri juga dapat dikategorikan limbah B3 jika mengandung bahan kimia berbahaya maupun beracun.

Untuk menanggulangi masalah pencemaran akibat penimbunan tersebut maka perlu dilakukan suatu usaha pembersihan (*clean up*) atau biasa disebut remediasi dan rehabilitasi dari bekas tempat penimbunan limbah yang mengandung B-3. Remediasi dari tanah yang tercemar oleh logam berat dapat dilakukan dengan beberapa cara diantaranya dengan cara kimia, fisika dan biologi. Remediasi secara biologi disebut dengan bioremediasi.

Bioremediasi adalah teknik penanganan limbah atau pemulihan lingkungan dengan bantuan mikroorganisme untuk menguraikan bahan berbahaya dan beracun dari limbah tersebut. Bioremediasi merupakan teknologi inovatif pengolahan limbah, yang bisa menjadi teknologi alternatif dalam menangani pencemaran akibat kegiatan industri di Indonesia. Dengan biaya operasi yang relatif murah, serta ramah dan aman bagi lingkungan, maka teknologi bioremediasi ini dapat diterapkan di banyak negara terutama negara berkembang sehingga teknologi ini patut juga untuk dikembangkan di Indonesia. Teknologi bioremediasi sudah sering digunakan untuk menangani timbunan sludge dan sisa proses industri minyak. Diharapkan teknologi bioremediasi ini juga dapat diaplikasikan terhadap timbunan limbah industri terutama yang mengandung limbah B3.

Bioremediasi limbah industri dapat dilakukan dengan bantuan mikroorganisme baik dari bakteri, cendawan dll. Di daerah tropis dengan kondisi kelembaban dan suhu tinggi

sangat cocok sekali untuk perkembangan mikroorganisme maka bioremediasi berpotensi bagus untuk dikembangkan. Oleh karena itu perlu dicari jenis mikroba yang dapat berfungsi dengan baik dalam mendegradasi limbah industri.

2. BIOREMEDIASI

Menurut Cookson (1995) bioremediasi dapat didefinisikan sebagai penggunaan proses biologi untuk mengolah tanah, air tanah dan lumpur (limbah padat) yang terkontaminasi bahan kimia berbahaya. Dalam perkembangannya bioremediasi lebih diarahkan pada penggunaan mikroorganisme untuk membersihkan senyawa pencemar lingkungan dengan mekanisme proses peruraian, degradasi, detoksifikasi, dan penyerapan.

Dalam proses bioremediasi, reaksi-reaksi biologis yang utama adalah reaksi metabolisme sel. Senyawa polutan yang berbahaya dapat didegradasi oleh mikroorganisme baik didalam atau diluar sel dan reaksinya adalah reaksi redoks. Reaksi ini dikatalisis oleh enzim-enzim mikrobial yang dihasilkan oleh mikroorganisme pengurai. Mula-mula mikroorganisme ini belum mempunyai kemampuan mendegradasi senyawa berbahaya yang belum dikenal sebelumnya karena belum memiliki enzim pendegradasi yang dibutuhkan, tetapi lambat laun mikroorganisme tersebut akan beradaptasi dan mengalami proses diagenesis yaitu perubahan secara kimia, biokimia dan fisika sehingga menghasilkan enzim-enzim pengurai. Degradasi ini akan menghasilkan senyawa-senyawa yang tidak berbahaya.

Efektifitas mikroorganisme dapat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti substrat (senyawa yang didegradasi), suhu dan kelembaban sesuai kebutuhan mikroorganismenya. Disamping itu dalam proses degradasi juga dipengaruhi oleh ketersediaan oksigen. Proses metabolisme mikroorganisme dapat dibedakan menjadi 2 yaitu proses aerob dan anaerob. Pada metabolisme aerob, reaksi akan terjadi bila tersedia cukup oksigen yang berguna sebagai akseptor elektron. Reaksi ini juga bisa disebut respirasi. Pada proses anaerob, reaksi akan terjadi jika tidak terdapat oksigen, dan mikroorganisme akan menggunakan oksida

organik dan anorganik sebagai akseptor elektron.

Teknik bioremediasi dapat diterapkan untuk memulihkan kondisi tanah yang tercemar itu. Bioremediasi sebenarnya dapat berlangsung secara alami tanpa campur tangan manusia, namun proses itu akan berjalan sangat lama. Agar proses tersebut berjalan lebih baik dan lebih cepat maka dibutuhkan campur tangan manusia dan kemajuan teknologi terutama dibidang biotek.

Secara umum bioremediasi dapat dilakukan dengan 2 metode yaitu:

1. Menstimulasi populasi mikroorganisme *indigenous* yang disebut *biostimulasi*
2. Menambahkan populasi mikroorganisme *eksogenous* yang disebut *bioaugmentasi*

Bioaugmentasi lebih banyak dipilih karena zat pencemar (polutan) yang mengandung bahan beracun degradasinya membutuhkan waktu yang lama jika hanya mengandalkan mikroorganisme *indigenous*, sehingga diperlukan penambahan mikroorganisme *eksogenous* terutama yang tahan terhadap senyawa racun tersebut. Keberhasilan aplikasi bioaugmentasi dapat diukur dari peningkatan jumlah mikroorganisme yang berperan dalam proses degradasi karena dalam kenyataan tidak semua mikroorganisme yang ditambahkan dapat bertahan pada lingkungan baru yang mengandung senyawa beracun, sehingga akhirnya didapatkan strain mikroorganisme yang tahan terhadap komponen senyawa racun tertentu. Untuk mendapatkan strain yang tahan tersebut dilakukan dengan cara:

1. Pengkayaan Selektif
2. Penggunaan Produk Mikroorganisme Komersial
3. Rekayasa Genetika Mikroorganisme

Pengkayaan selektif merupakan metode yang umum digunakan, yaitu meningkatkan populasi mikroorganisme tertentu dari suatu inokulum (sumber mikroorganisme). Sumber mikroorganisme tersebut dapat berupa sludge, air tanah maupun tanah tempat dimana limbah tersebut berasal, bisa juga diperoleh dari fasilitas pengolahan limbah dan tanah yang tercemar.

3. STRATEGI BIOREMEDIASI

Bioremediasi dapat diaplikasikan pada masalah lingkungan yang bervariasi dan dapat dilakukan secara langsung pada lahan tercemar (*in situ*) atau dengan memindahkan atau mengeduk lahan untuk dilakukan pemulihan (land treatment atau landfarming) di suatu wilayah khusus, perlakuan *composting*, perlakuan fase padat dan dapat menggunakan *bioreactor* diatas tanah (*ex situ*),

Teknik bioremediasi *in situ* umumnya lebih disenangi karena dapat menghemat biaya, tidak perlu memindahkan dan mengeduk cemaran atau kontaminan, sehingga biasa dilakukan pada lahan yang mengalami pencemaran secara luas. Ada beberapa perlakuan dalam bioremediasi *in situ* yaitu (1) perlakuan dengan mengalirkan udara dan nutrisi melalui sumur untuk menstimulasi pertumbuhan mikroorganisme asli disebut *bioventing*. (2) perlakuan *biosparging* dengan menginjeksikan udara dengan tekanan ke air untuk meningkatkan konsentrasi oksigen dalam air tanah dan meningkatkan kecepatan biodegradasi kontaminan oleh mikroorganisme. (3) *bioaugmentasi* yaitu menambahkan mikroorganisme baik asli (*indigenous*) maupun dari luar (*exogenous*) kedalam lahan yang tercemar.

Teknik bioremediasi *ex situ* dilakukan dengan menempatkan tanah tercemar yang sudah digali kedalam suatu sistem atau wadah dimana semua kondisi proses dapat diatur misalnya suplai oksigen, inokulum mikroba, suhu dan kelembaban. Teknik *ex situ* yang paling sederhana adalah *landfarming* yaitu mengeduk tanah yang tercemar dan memperlakukannya dengan mikroorganisme dan menggalinya secara periodik sampai polutan terdegradasi. Perlakuan lain yaitu *composting* yang menggabungkan tanah yang tercemar dengan bahan organik tidak berbahaya seperti pupuk atau limbah pertanian. Penambahan bahan organik ini dapat memperkaya populasi mikroba tanah. Penggabungan teknik *landfarming* dan *composting* disebut *biopiles*. Sedangkan perlakuan fase padat yang menggunakan reactor untuk memanipulasi kondisi lingkungan untuk memaksimalkan proses degradasi senyawa beracun oleh mikroba disebut *bioreactor*. Penciptaan kondisi ideal dilakukan dengan menjaga kondisi pH, suhu tanah, dan "hydraulic conductivity" lapisan tanah.

Penambahan asam atau basa perlu dilakukan bila pH tanah jauh dari kondisi netral ($5 < \text{pH} < 8$).

Modifikasi bioremediasi *landfarming* dapat dilakukan dengan perlakuan tanah, meningkatkan intensitas penyiraman, proses aerasi, penambahan nutrisi berupa kompos atau bahan-bahan lain seperti serbuk kayu. Dalam uji coba yang dilakukan cara tersebut terbukti efektif mempercepat pemulihan tanah dalam waktu hanya beberapa bulan. Disamping itu struktur tanah juga merupakan faktor penting karena dapat mengendalikan penyebaran air, udara dan nutrisi dengan efektif. Untuk meningkatkan struktur tanah dapat digunakan bahan seperti gipsium atau bahan organik Vidali (2001).

4. MIKROORGANISME YANG DIGUNAKAN

Mikroorganisme meliputi virus, bakteri, jamur, dan protozoa dapat dikatakan sebagai makhluk tertua dengan diversitas terbanyak di planet bumi. Mikroba tersebut menempati 60 persen lebih biomassa dan telah hidup berevolusi paling tidak 3,8 miliar tahun. Mikroba memang dapat bertahan pada kondisi nyaman, ekstrem panas, dingin, berkonsentrasi garam tinggi, asam, basa, tekanan tinggi, bahkan di daerah-daerah yang mendekati kemustahilan untuk hidup bagi makhluk hidup lain seperti lingkungan dengan radioaktivitas tinggi.

Menurut Budiyanto (2002) beberapa jenis mikroorganisme sangat berperan dalam pengelolaan lingkungan. *Pseudomonas* spp. dan *Bacillus* spp. diketahui merupakan genus yang sangat besar perannya dalam degradasi senyawa pencemar. *Bacillus subtilis* dapat dikembangkan menjadi mikroorganisme yang mempunyai kemampuan mengimobilisasi logam berat pada limbah industri yang banyak mengandung logam berat, demikian pula dengan *Pseudomonas* sp. Selain itu *Pseudomonas* juga telah banyak digunakan dalam bioremediasi limbah minyak. Secara umum kontaminasi lingkungan oleh logam berat merupakan masalah sebagai hasil meningkatnya kegiatan industrialisasi. Mikroorganisme dapat berinteraksi dengan logam dengan berbagai cara untuk dapat menurunkan mobilitas dan kelarutan logam

Untuk mengatasi senyawa pencemar yang mengandung logam berat seperti pada limbah

elektroplating, digunakan mikroorganisme yang dapat menggunakan logam berat sebagai nutrisi atau hanya menjerab (imobilisasi) logam berat tersebut. Mikroorganisme yang digunakan adalah *Thiobacillus ferrooxidans* dan *Bacillus subtilis*.

Thiobacillus ferrooxidans adalah bakteri yang mendapatkan energi dari senyawa anorganik seperti besi sulfida dan menggunakan energinya untuk membentuk bahan-bahan yang berguna seperti asam fumarat dan besi sulfat. Sedang *Bacillus subtilis* mempunyai kemampuan mengikat beberapa logam berat bentuk nitrat. Logam-logam tersebut dapat dilarutkan kembali setelah bakterinya dibuat lisis sehingga Logam tersebut dapat digunakan kembali oleh industri yang bersangkutan.

Bakteri *Escherichia coli* juga diketahui sangat luas perannya dalam menguraikan senyawa pencemar. Menurut Segelken (1999) *E. coli* dapat mentransportasi dan mengakumulasi merkuri ke dalam sel membrannya. Begitu pula dengan logam berat lainnya seperti Cd, Zn, Ni dan Mn dapat diserap dan diakumulasi dalam selnya.

Menurut Raje (2001) Kelompok atau genus bakteri yang sangat relevan untuk proses bioremediasi adalah *Pseudomonas*, *Moraxella*, *Acinetobacter*, *Burkholderia* dan *Alcaligenes*. Bakteri-bakteri tersebut mempunyai kemampuan hidup yang tinggi dan potensi katabolisme sehingga dapat bertahan hidup dengan kisaran bahan organik yang luas sebagai makanan primernya.

5. MEKANISME PENGHILANGAN LOGAM OLEH MIKROORGANISME

Secara alami di mana kondisi tanpa kendali, proses penghilangan ion logam berat oleh mikroorganisme umumnya terdiri dari dua mekanisme yang melibatkan proses "active uptake" dan "passive uptake". Pada saat ion logam berat tersebar pada permukaan sel, ion akan mengikat pada bagian permukaan sel berdasarkan kemampuan daya afinitas kimia yang dimilikinya.

Menurut Suhendrayatna (2001) *Passive uptake* dikenal dengan istilah proses *biosorpsi*. Proses ini terjadi ketika ion logam berat mengikat dinding sel dengan dua cara yang berbeda,

pertama pertukaran ion di mana ion monovalen dan divalen seperti Na, Mg, dan Ca pada dinding sel digantikan oleh ion-ion logam berat; dan kedua adalah formasi kompleks antara ion-ion logam berat dengan group (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 ion logam berat di permukaan sel ini dapat terjadi pada sel mati dan sel hidup dari suatu biomass. Proses *biosorpsi* dapat lebih efektif dengan kehadiran pH tertentu dan kehadiran ion-ion lainnya di media di mana logam berat dapat terendapkan sebagai garam yang tidak terlarut (Suhendrayatna, 2001). Cendawan juga dapat digunakan untuk menyerap nikel, besi dan berbagai jenis elemen lantanida seperti thorium, uranium dan plutonium. Kebanyakan penelitian menggunakan pendekatan dengan pH 2. Tetapi di lain pihak, metode ini menjadi tidak efektif bila terdapat penghambat-penghambat proses metabolisme atau siklus gelap terang. Secara umum, *biosorpsi* ion logam berat berlangsung cepat, bolak balik dan tidak tergantung terhadap faktor kinetik

bioremoval bila dikaitkan dengan penyebaran sel

Aktif uptake dapat terjadi pada berbagai tipe sel hidup. Mekanisme ini secara simultan terjadi sejalan dengan konsumsi ion logam untuk pertumbuhan mikroorganisme atau/dan akumulasi intraselular ion logam tersebut. Logam berat dapat juga diendapkan pada proses metabolisme dan ekresi. Proses ini tergantung dari energi yang terkandung dan sensitifitasnya terhadap parameter-parameter yang berbeda seperti pH, suhu, kekuatan ikatan ionik, cahaya dll. Disamping itu proses ini dapat dihambat oleh suhu yang rendah, tidak tersedianya sumber energi dan penghambat-penghambat metabolisme sel. Di sisi lain, *biosorpsi* logam berat dengan sel hidup ini terbatas dikarenakan oleh akumulasi ion yang menyebabkan racun terhadap mikroorganisme sehingga dapat menghambat pertumbuhan mikroorganisme. Mikroorganisme yang tahan terhadap efek racun dari ion logam akan dihasilkan berdasarkan prosedur seleksi yang ketat terhadap pemilihan jenis mikroorganisme yang tahan terhadap kehadiran ion logam berat (Suhendrayatna, 2001).

Tabel 1. Perbandingan *biosorpsi* ion logam berat oleh berbagai jenis mikroorganisme.

Mikroorganism	Metode penyerapan	Logam Berat	Konsentasi Awal	% Removal
<i>Rhizomucor miehi</i> (F)	Pasif	Cu(II)	100	96
<i>Mucur mucedo</i> (F)	Pasif	Cu(II)	100	86
<i>Rhizopus stolonifer</i> (F)	Pasif	Cu(II)	100	82
<i>Aspergillus oryzae</i> (F)	Pasif	Cu(II)	100	58
<i>Penecillium chrysogenum</i> (F)	Pasif	Cu(II)	100	18
<i>Ecklonia radiata</i> (A)	Pasif	Cu(II)	0,29	95
<i>Phellinus badius</i> (F)	Pasif	Cu(II)	0,29	43
<i>Pinus radiata</i> (F)	Pasif	Cu(II)	0,29	24
<i>Saccharomyces cerevisie</i> (Y)	Aktif	Cu(II)	0,29	17
<i>Chlorella vulgaris</i> (A)	Pasif	Pb(II)	100,2	83
<i>Ecklonia radiata</i> (A)	Pasif	Pb(II)	0,82	100
<i>Phellinus badius</i> (F)	Pasif	Pb(II)	0,82	50
<i>Pinus radiata</i> (F)	Pasif	Pb(II)	0,82	21
<i>Saccharomyces cerevisie</i> (Y)	Aktif	Pb(II)	0,82	34
<i>Chlorella vulgaris</i> (A)	Aktif	As(V)	9	17
<i>Chlorella vulgaris</i> (A)	Aktif	As(III)	4	26
<i>Citrobacter</i> sp. (B)	Aktif	Cd(II)	40	24
<i>Ecklonia radiata</i> (A)	Pasif	Cd(II)	0,48	90
<i>Phellinus badius</i> (F)	Pasif	Cd(II)	0,48	33
<i>Pinus radiata</i> (F)	Pasif	Cd(II)	0,48	29
<i>Saccharomyces cerevisie</i> (Y)	Aktif	Cd(II)	0,48	10

Keterangan (A) alga, (B) bacterium, (F) Fungus, (Y) yeast.
Sumber : Suhendrayatna(2001)

Kedua mekanisme penyerapan di atas dapat berjalan serentak. Nakajima et al dalam Suhendrayatna (2001) melaporkan penyerapan selektif ion logam hampir sama antara sel hidup dan sel mati dari *Chlorella regularis*, di mana jumlah total logam berat yang diabsorpsikan oleh sel mati kira-kira dua kali lebih besar dibandingkan dengan yang diabsorpsikan oleh sel hidupnya. Disamping itu protein dan polisakarida memegang peranan yang sangat penting dalam proses biosorpsi ion logam berat di mana terjadi ikatan kovalen termasuk juga dengan gugus amino dan group carbonil. Pengambilan ion logam berat oleh *Chlorella regularis* misalnya secara selektif karena adanya ikatan yang kuat antara pasangan ion logam berat dan komponen sel, khususnya protein. Pada saat alga tersebut dibiakkan pada medium yang mengandung kadmium, protein yang kaya sistein disintesis oleh sel alga *Chlorella vulgaris*, tetapi ketika algae dibiakkan pada medium yang mengandung arsenik, protein seperti methallothionin tidak tersintesis. Tabel 1 menunjukkan biosorpsi ion logam berat oleh berbagai jenis mikroorganisme.

Selain dengan cara penyerapan, mikroorganisme juga dapat mengikat logam berat dan kemudian diikuti proses toksifikasi. Beberapa bakteri dari genus *Ralstonia*, *Pseudomonas* dan *Bacillus* dengan permukaan selnya yang mengandung protein mempunyai kemampuan untuk mengikat logam berat, sehingga dapat dimanfaatkan dalam bioremediasi. Protein yang dapat mengikat logam berat tersebut disebut *metallothionein*

6. KONSEP DASAR PROSES BIOREMEDIASI

Untuk mendesain suatu proses pengolahan limbah yang melibatkan mikroorganisme dalam mengatasi permasalahan ion logam berat, metode sederhana adalah secara proses bioremoval. Mikroorganisme pilihan (seperti terlihat pada Tabel 1) dimasukkan, ditumbuhkan dan selanjutnya dikontakkan dengan bagian yang tercemar ion-ion logam berat. Proses pengontakkan dilakukan dalam jangka waktu tertentu yang ditujukan agar kumpulan mikroorganisme berinteraksi dengan ion-ion logam berat dan selanjutnya mikroorganisme ini dipisahkan dari limbah. Kemudian

mikroorganisme yang terikat dengan ion logam berat dapat diregenerasi untuk digunakan kembali atau kemudian dibuang ke lingkungan. Beberapa variabel penting yang perlu diperhatikan dalam mendesain dan mengoperasikan proses bioremoval dalam melibatkan mikroorganisme, seperti dijelaskan berikut ini:

- a. seleksi dan pemilihan mikroorganisme yang sesuai serta treatment awalnya,
- b. waktu tinggal dan waktu kontak proses,
- c. proses pemisahan dan rekoveri mikroorganisme,
- d. pembuangan mikroorganisme yang telah digunakan, dan
- e. pertimbangan ekonomis dari proses.

Seleksi dan pemilihan mikroorganisme yang sesuai serta proses treatment awal merupakan unsur yang penting dalam mendesain suatu proses bioremoval. Proses ini juga meliputi pemilihan strain yang sesuai, metode kulturisasi dan kondisi fisik mikroorganisme. Walaupun ada beratus-ratus jenis spesies mikroorganisme yang telah diidentifikasi, namun sangat sedikit diantaranya teridentifikasi sebagai mikroorganisme yang mempunyai daya tahan yang tinggi terhadap pengaruh tingkat keracunan suatu ion logam berat.

Waktu tinggal dan waktu kontak juga merupakan variabel yang sangat berpengaruh terhadap desain proses bioremoval, termasuk ke dalamnya immobilisasi sel, pH dan konsentrasi mikroorganisme. Penggunaan sel hidup menawarkan sejumlah kelebihan, sementara itu secara praktis mikroorganisme dikemas dalam bentuk powder atau dikembangbiakkan terlebih dahulu sebelum digunakan. Dengan kondisi ini pemilihan penggunaan metode immobilisasi dinilai lebih menguntungkan. Augusto da Cocta dkk dalam Suhendrayatna (2001) melaporkan *Chlorella homospaera* yang diimmobilisasikan pada alginate menghasilkan sistem yang baik untuk mereduksi kadmium, seng dan emas dari suatu perairan yang tercemar. Dengan konsentrasi inisial logam beratnya berkisar 20-27 ppm, Cd dan Zn dapat direduksi sebesar 99% dalam jangka waktu 60 menit dan 90% tereduksi setelah 30 menit.

Proses pemisahan dan penemuan kembali (recovery) merupakan proses pemisahan mikroorganisme dari air limbah setelah pengolahan serta berkenaan dengan proses

pengikatan logam berat dari suatu mikroorganisme. Proses sentrifugasi dan filtrasi yang saat ini rutin dilakukan di laboratorium dinilai tidak praktis bila diterapkan pada proses industri, sehingga penerapan immobilisasi mikroorganisme yang dipacking pada suatu kolom dipandang sangat praktis untuk digunakan. Suatu metode alternatif juga dapat digunakan di mana mikroorganisme melakukan immobilisasi sendiri sebagai *biofilm* pada suatu media yang mempunyai porositas yang besar seperti pasir, batuan, sponses dan lain-lain. Sistem immobilisasi sangat cocok untuk non-destructive recovery, dimana setelah logam berat dimasukkan, logam tersebut dapat kontak dengan sejumlah material padatan dan selanjutnya mudah tertarik ke luar bersama sebagian kecil cairan untuk proses rekoveri dan pembuangan. Idealnya, proses bioremoval yang melibatkan immobilisasi sel akan mudah didapatkan kembali dan digunakan kembali untuk pengikatan ion logam oleh mikroorganisme.

Karena proses biologis dapat memecahkan masalah penghilangan ion logam berat dari suatu limbah dan terjadi banyak masalah yang menyangkut dengan lahan dan lautan dalam pembuangan lumpur yang mengandung logam berat maka metode yang ramah lingkungan sangat diperlukan untuk dikembangkan. Penggunaan mikroorganisme memiliki beberapa kelebihan berkaitan dengan rekoveri dan buangan ikatan logam, karena 1. pada banyak kasus, logam yang berikatan dapat dilepaskan dan mikroorganisme dapat digunakan kembali untuk beberapa siklus proses. 2. mikroorganisme yang berikatan dengan logam berat dapat di reduksi dengan menggunakan sistem pengeringan. Tentu saja, pada akhirnya pertimbangan ekonomis sangat penting untuk diperhatikan dalam mengevaluasi seluruh proses.

Menurut Vidale (2001) dan Wisnuprpto (1996) untuk optimalisasi proses bioremediasi membutuhkan hal-hal penting seperti:

1. Tersedianya mikroorganisme yang melaksanakan proses transformasi, yang mampu menghasilkan enzim untuk mendegradasi atau mendetoksifikasi bahan beracun yang diolah.
2. Sumber energi dan akseptor elektron karena mikroorganisme memperoleh energi dari reaksi-reaksi yang berlangsung.
3. Faktor lingkungan seperti tipe tanah, kelembaban yang cukup, pH dan suhu

yang sesuai, oksigen dan nutrisi yang cukup untuk pertumbuhan mikroorganisme.

7. FAKTOR LINGKUNGAN

Faktor lingkungan yang mempengaruhi proses bioremediasi adalah :

A. Kebutuhan Nutrisi

Mikroorganisme memerlukan nutrisi sebagai sumber karbon dan energi untuk metabolisme selnya. Nutrisi yang umum diperlukan adalah nitrogen, fosfor dan sejumlah unsur logam. Nitrogen merupakan unsure utama yang berperan dalam pertumbuhan, perbanyakan sel dan pembentukan dinding sel. Beberapa mikroorganisme menggunakan nitrogen sebagai sumber protein. Sedang Fosfor diperlukan mikroorganisme untuk pembentukan senyawa antara dalam reaksi metabolisme dan transfer energi. Karena ketersediaan nitrogen dan fosfor dalam system tanah tidak cukup untuk mendukung pertumbuhan microbial maka pada biodegradasi senyawa pencemar perlu ditambahkan. Bila ketersediaan tidak mencukupi maka pertumbuhan mikroorganisme dapat terhambat.

B. Suhu

Suhu merupakan salah satu faktor yang sangat berpengaruh terhadap bioremediasi karena suhu dapat mempengaruhi perkembangan dan pertumbuhan mikroorganisme. Suhu optimum untuk perkembangan mikroorganisme adalah 30-40°C oleh karena itu suhu tropis sangat mendukung perkembangan mikroorganisme. Aktivitas mikroorganisme menurun dengan menurunnya suhu.

C. Kelembaban

Kelembaban sangat berpengaruh dalam proses bioremediasi karena mikroorganisme sangat tergantung dengan kelembaban. Mikroorganisme memerlukan kelembaban yang cukup tinggi untuk pertumbuhannya.

D. pH

pH diketahui berperan dalam perkembangan atau pertumbuhan mikroorganisme. Mikroorganisme memerlukan kondisi lingkungan tertentu seperti pH dan suhu tertentu untuk mendukung aktivitas microbial dan reaksi-reaksi yang dikatalisisnya. pH optimum biosorpsi ion timbal (Pb)(II), nickel(II) dan tembaga (Cu)(II) oleh *Zoogloea ramigera* adalah berkisar antara 4.0-4.5 sedangkan untuk besi(II) adalah 2.0. Hasil penelitian

terhadap biosorpsi timbal oleh alga laut *Eckloniaradiata* menunjukkan bahwa laju penyerapan (biosorpsi) naik sejalan dengan kenaikan pH hingga 5.0.

8. KEUNTUNGAN DAN KEKURANGAN BIOREMEDIASI

A. Keuntungan

- Bioremediasi adalah proses alami sehingga mudah diterima oleh publik sebagai cara untuk memulihkan lingkungan yang tercemar. Mikroba yang dapat menguraikan kontaminan dapat meningkat sejalan dengan meningkatnya kontaminan dan ketika kontaminan terurai maka populasi mikroba juga turun. Hasil bioremediasi adalah produk yang tidak berbahaya.
- Dapat digunakan untuk mendegradasi limbah berbahaya dan beracun menjadi tidak berbahaya.
- Dapat merusak dengan sempurna polutan yang berbahaya dan beracun.
- Dapat dilakukan langsung pada tanah yang tercemar (on site) sehingga tidak perlu transportasi.
- Teknologi bioremediasi lebih murah dari pada penggunaan teknologi lain untuk membersihkan lingkungan.

B. Kekurangan

- Aplikasi bioremediasi terbatas hanya untuk senyawa yang dapat terdegradasi oleh makhluk hidup terutama mikroorganisme. Tidak semua senyawa cocok untuk proses biodegradasi yang lengkap dan cepat.
- Dikawatirkan produk hasil biodegradasi lebih persisten atau lebih toksik daripada senyawa asalnya.
- Sulit untuk ekstrapolasi dari skala bench ke skala pilot.
- Penelitian diperlukan untuk mengembangkan teknologi bioremediasi yang sesuai untuk tanah dan lokasi yang tercemar campuran kontaminan, baik yang berbentuk padat, cair dan gas.
- Bioremediasi memerlukan waktu yang lebih lama dari pada perlakuan lain seperti pembakaran dan penimbunan.
- Peraturan yang belum jelas, berhubungan dengan penerimaan

kriteria bersih hasil bioremediasi yang masih sulit didefinisikan.

9. KESIMPULAN

Bioremediasi ditujukan untuk membersihkan lingkungan dari senyawa beracun menggunakan mikroorganisme. Bioremediasi merupakan alternatif pembersihan lingkungan yang murah, ramah dan aman bagi lingkungan. Mikroorganisme dapat beradaptasi terhadap senyawa beracun dan dapat menggunakan senyawa tersebut untuk nutrisinya. Beberapa mikroorganisme dari spesies *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Thiobacillus*, *Moraxella*, *Acinetobacter*, *Burkholderia*, *Alcaligenes*, dan *Chlorella* dikenal sangat tahan terhadap senyawa beracun termasuk dari logam-logam berat dan dapat dengan baik mendegradasi senyawa beracun tersebut.

Teknik yang banyak digunakan dalam bioremediasi adalah bioaugmentasi yaitu dengan menambahkan populasi mikroorganisme dari luar (*eksogenous*). Hal tersebut dilakukan karena zat pencemar (polutan) yang mengandung bahan beracun degradasinya membutuhkan waktu yang lama jika hanya mengandalkan mikroorganisme *indigenous*.

Variabel penting yang perlu diperhatikan dalam mendesain dan mengoperasikan proses bioremediasi dalam melibatkan mikroorganisme, seperti dijelaskan berikut ini:

- a. seleksi dan pemilihan mikroorganisme yang sesuai serta treatment awalnya,
- b. waktu tinggal dan waktu kontak proses,
- c. proses pemisahan dan rekoveri mikroorganisme,
- d. pembuangan mikroorganisme yang telah digunakan, dan
- e. pertimbangan ekonomis dari proses.

DAFTAR PUSTAKA

1. Avakian, Maureen D. 2002. Research Brief 91: The Role of Bacteria in Bioremediation of Metals. [http://apps.niehs.nih.gov/sbrp/rb/cfm?resbrfnum=91&view="](http://apps.niehs.nih.gov/sbrp/rb/cfm?resbrfnum=91&view=) July 3 (Diakses November 2003).
2. Brahmana, S.S dan Moelyo, M. 2003. Penelitian Bioremediasi Sumber Air Tercemar Bahan Berbahaya dan Beracun. JLP. Vol.17, No.52.

3. Budiyanto, M,A,K. 2002. *Mikrobiologi Terapan*. Universitas Muhamadiyah Malang.
4. Cookson, J.T. 1995. *Bioremediation Engineering Design and Application*, McGraw-Hill, New York.
5. Dahuru, Muhamad. 2003. Pengaruh Mikroorganisme dari Kotoran Kuda dan Surfaktan pada Bioremediasi Tanah Terkontaminasi Minyak Diesel. Skripsi Fateta, IPB.
6. Imamura, Sathoshi. 2003. Soil and Groundwater Remediation in Japan. Makalah Training on Environmental Management of Chemical Industry. JICA-ICETT.
7. Pagilla, K.R. and Canter, L.W. 1999, Laboratory Studies on Remediation of Chromium-Contaminated Soils. *Journal of Environmental Engineering*, March 1999.
8. Priyanto Budhi dan Prayitno, Joko. 2006. Fitoremediasi Sebagai Sebuah Teknologi Pemulihan Pencemaran; Khususnya Logam Berat. Publikasi website (Diakses September 2006).
9. Raje, DV. 2001. Distinguishing The Five Most Dominating Bacteri in Bioremediation Based on Genus Spesific 16S rDNA Signature
10. <http://atlasconferences.com/c/a/im/15htm> . (Diakses 23 November 2003).
11. Suhendrayatna. 2001. Bioremoval Logam Berat Dengan Menggunakan Microorganisme:
12. Suatu Kajian Kepustakaan. Seminar on-Air Bioteknologi untuk Indonesia Abad 21. Sinergy Forum - PPI Tokyo Institute of Technology. 1-14 Februari
13. Thacker, B,K and Carol G,F. 1999. In Situ Bioremediation Technique for Sites Underlain by Silt and Clay. *Journal of Environmental Engineering*. December.
14. Valsecchi, G., C. Gigliotti and Farini, A. 1995. Microbial Biomass, Activity and Organic matter accumulation in soils contaminated heavy metals. *Biol. Fertil. Soils*. 20.
15. Vidali, M. 2001. Bioremediation. An overview. *Pure Applied Chemical*, Vol 73, No.7.
16. Wisnuprpto. 1996. Bioremediasi, Manfaat dan Pengembangannya. Prosiding Pelatihan dan Lokakarya: Peranan Bioremediasi dalam Pengelolaan Lingkungan. P. Citreksoko, A. Setiana, M.A.Subroto dan D.T.Djaja (Eds). Cibinong, 24-28 Juni.
17. Kategori Kimia Lingkungan: Masih Banyak Perusahaan Kimia Tidak Pedulikan Limbah B3. *Suara Pembaruan*, 12 Maret 2003.