

Makalah Falsafah Sains (PPs 702)

**Program Pasca Sarjana/S3
Institut Pertanian Bogor
November 2004**

Dosen :

Prof. Dr. Ir. Rudy Tarumingkeng (*Penanggung Jawab*)

Prof. Dr. Ir. Zahrial Coto

Dr. Ir. Hardjanto

**PERANAN MIKROORGANISME
DALAM MENGURANGI EFEK TOKSIK
PADA TANAH TERKONTAMINASI LOGAM BERAT**

Oleh :

**Sartji Taberima
A261030021 / TNH - IPB
e-mail : atji_t@yahoo.com**

ABSTRAK

Lingkungan tanah yang terkontaminasi logam berat merupakan salah satu kendala utama karena adanya saling interaksi secara langsung maupun tidak langsung dengan organisme di atas permukaan tanah (manusia, tumbuhan, binatang), maupun di dalam tanah (mikroorganisme). Pemanfaatan mikroorganisme untuk mengurangi efek toksik pada tanah terkontaminasi logam berat dewasa ini mulai menjadi perhatian para peneliti karena lebih bersifat ramah lingkungan. Secara alami, suatu ekosistem alam memiliki mekanisme dalam mengurangi bahaya dari kontaminasi logam berat. Bila suatu ekosistem terkontaminasi logam berat dan berlebihan, maka akan terjadi akumulasi dan bersifat toksik, sehingga akan terjadi ketidakseimbangan di dalam ekosistem tersebut.

Teknologi secara biologi yang menerapkan mikroorganisme untuk memperbaiki kualitas lingkungan terkontaminasi dikenal sebagai Bioteknologi. Salah satunya melalui bioremediasi, yaitu penggunaan kehidupan organisme untuk menurunkan atau menghilangkan bahaya lingkungan dari akumulasi logam-logam toksik dan sampah berbahaya lainnya. Proses mikroorganisme dalam mempengaruhi sifat mobile atau im-mobile unsur-unsur logam berat adalah melalui beberapa tahapan, yaitu : (1). Mobilisasi, seperti : oksidasi enzimatis, reduksi enzimatis, pembentukan kompleks, dan siderapore; (2). Immobilisasi, seperti : pengendapan, biosorpsi, dan bioakumulasi.

PENDAHULUAN

Kasus tanah-tanah terkontaminasi logam-logam berat akibat aktifitas manusia dalam industri-industri penambangan adalah sudah mulai terasa dampaknya bagi lingkungan ekologi tanah. Lingkungan tanah yang terkontaminasi logam berat merupakan salah satu kendala utama, karena adanya saling interaksi secara langsung maupun tidak langsung dengan organisme di atas permukaan tanah (manusia, tumbuhan, binatang) maupun di dalam tanah (mikroorganisme). Sumber antropogenik dari tanah terkontaminasi terbagi dalam 5 kelompok, yaitu : (1). Penambangan logam Fe dan peleburan (As, Cd, Hg); (2). Industri (As, Cd, Cu, Pb, Sm, U, Zn); (3). Deposisi atmosfer (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, U); (4). Pertanian (As, Cd, Cu, Pb, Sm, U, Zn); (5). Pembuangan sampah/limbah (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Zn) (Turpeinan, 2002). Pada beberapa daerah di Indonesia, kasus tanah terkontaminasi logam berat sebagian besar disebabkan oleh kondisi lingkungan alam yang sejak awalnya telah didominasi oleh unsur logam hasil pelapukan batuan mineral, misalnya : tanah-tanah sulfat masam dan hasil penambangan yang melibatkan aktivitas manusia. Namun permasalahan utama saat ini yang muncul pada tanah-tanah terkontaminasi logam berat adalah akibat aktifitas manusia melalui industri-industri penambangan yang menghasilkan limbah (misalnya : pertambangan tembaga & emas, dan batubara), sehingga mencemari lingkungan tanah di sekitarnya.

Dalam beberapa tahun terakhir ini, bahaya yang muncul akibat kontaminasi logam berat di lingkungan tanah dan perairan adalah merupakan isu lingkungan yang sangat menonjol. Permasalahan pada lingkungan tanah terkontaminasi logam berat adalah tidak mudah untuk ditangani dengan cepat, karena melibatkan masyarakat yang ada di sekitarnya. Limbah yang dihasilkan dalam bentuk padat mungkin tidak berdampak luas, tetapi bila buangan dalam

bentuk limbah cair atau menguap berpengaruh lebih luas, karena penyebarannya dapat melalui air atau atmosfer (udara), sehingga bahaya kontaminasinya tidak mudah untuk diatasi. Sebagai contoh : di daerah bekas pertambangan emas di Teluk Buyat - Minahasa, walaupun keracunan Hg⁺ terhadap masyarakat di sekitar daerah pertambangan masih diragukan, namun limbah Hg⁺ tetap merupakan toksik bagi ikan di perairan, dan manusia yang memakan ikan tercemar.

Di sisi lain , logam-logam tersebut juga mempunyai peranan penting dalam proses kehidupan mikroorganisme. Beberapa logam-logam seperti : Ca, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, dan Zn adalah hara esensial dan berperan dalam proses redoks untuk menstabilkan molekul melalui interaksi elektrostatik. Namun ada beberapa logam yang tidak mempunyai peranan biologi, seperti : Ag, Al, Cd, Au, Pb, dan Hg, karena bukan merupakan hara esensial (*non-esensial*), tetapi racun (toksik) bagi mikroorganisme. Logam-logam non-esensial ini dapat pula menggantikan posisi logam esensial yang terjerap dalam kompleks koloid atau melalui interaksi ligan. Bila kondisi ini terjadi, dapat merugikan mikroorganisme maupun tumbuhan yang menyerap unsur hara non-esensial tersebut.

Namun demikian pemanfaatan mikroorganisme akhir-akhir ini dalam mengurangi efek toksik logam pada tanah terkontaminasi telah menjadi perhatian para peneliti karena lebih bersifat ramah lingkungan. Secara alami, suatu ekosistem alam mempunyai mekanisme dalam mengurangi bahaya kontaminasi logam berat. Bila kontaminasi logam berat berlebihan, terjadi akumulasi dan bersifat toksik, sehingga akan terjadi ketidakseimbangan di dalam suatu ekosistem. Dalam hal ini peranan mikroorganisme dalam mengatasi permasalahan lingkungan terkontaminasi logam berat akan sangat membantu.

SUMBER-SUMBER LOGAM BERAT

Sumber-sumber logam berat dapat berasal dari hasil pelapukan batuan mineral dan antropogenik. Mineral dalam batuan merupakan mineral utama (mineral primer) dalam tanah sebagai akibat melapuknya batuan dan membetuk tanah. Mineral-mineral tersebut akan melapuk dan melepaskan unsur-unsur yang dikandungnya, sebagian merupakan hara bagi tanaman, sebagian tercuci dari tanah bersama air perkolasi atau erosi, dan sebagiannya lagi bereaksi membentuk mineral sekunder. Pelapukan akan berjalan terus, sehingga pada tanah-tanah dengan tingkat pelapukan lanjut (Ultisol, Oxisol) hanya tertinggal mineral sukar lapuk (kuarsa) dan mineral sekunder seperti : oksida besi (hematite, goetit) dan oksida Al (gibsit).

Pelapukan adalah proses penghancuran fisik dan kimia dari batuan, karena mineral-mineral dalam batuan tersebut tidak berada dalam keseimbangan dengan suhu, tekanan, dan kelembaban yang ada. Pelapukan mineral primer diawali dengan adanya penurunan suhu. Mineral primer yang paling mudah melapuk adalah golongan Nesosilikat, seperti : olivin, diikuti piroksin, amfibol, biotit, dan seterusnya sebagaimana dikemukakan dalam seri reaksi Bowen (Hardjowigeno, 1993). Mineral-mineral tersebut adalah mineral kelam yang kaya unsur Mg dan Fe yang berasal dari batuan basalt atau ultra basalt. Dari setiap jenis mineral mudah lapuk akan dihasilkan hara-hara yang di dalamnya terkandung juga unsur-unsur logam berat dalam bentuk hara utama maupun hara minor. Proses pelapukan ini menghasilkan kadar logam berat yang tentunya berbeda dan tergantung dari bahan induknya, juga didukung oleh proses vulkanik yang sangat berperan dalam menghasilkan jenis batuan dan mineral.

Sumber logam berat yang berasal dari aktivitas manusia adalah logam berat yang dihasilkan melalui limbah dari suatu industri atau penambangan. Aktivitas manusia terhadap peningkatan pergerakan, perpindahan, dan

akumulasi logam berat menyebabkan logam berat masuk ke atmosfer, tanah, atau ekosistem perairan melebihi kemampuan alami ekosistem tersebut untuk memprosesnya. Aktivitas industri menyebabkan peningkatan jumlah logam berat beracun (toksik) dan radionuclide yang diemisikan ke biosfer, sehingga mempunyai indikasi potensi berbahaya bagi suatu ekosistem (Gazso, 2001). Kehadiran logam berat secara berlebihan dapat menyebabkan polusi pada air bawah tanah, toksik pada tanaman, dan pengaruh merugikan bagi jaringan tanaman atau mikroorganisme tanah (California State Water Resources Control Board, 2000).

Tabel 1. Kisaran konsentrasi logam berat yang berasal dari pupuk; pupuk dari lahan pertanian, kapur dan kompos (mg/kg)

Jenis Logam Berat	Pupuk Fosfat	Pupuk Nitrat	Pupuk dari Lahan pertanian	Kapur	Kompos dari sampah
Ag	-	-	-	-	-
As	2 – 1200	2,2 – 120	3 – 25	0,1 – 25	2 – 52
B	5 – 115	-	0,3 – 0.6	10	-
Cd	0,1 – 170	0,05 – 8.5	0,1 – 0.8	0,04 – 0.1	0,01 – 100
Co	1 – 12	5,4 – 12	0,3 – 24	0,4 – 3	-
Cr	66 – 245	3,2 – 19	1,1 – 55	10 – 15	1,8 – 410
Cu	1 – 300	-	2 – 172	2 – 125	13 – 3580
Hg	0,01 – 1.2	0,3 – 2.9	0,01 – 0.36	0,05	0,09 – 21
Mn	40 – 2000	-	30 – 969	40 – 1200	-
Mo	0,1 – 60	1 – 7	0,05 – 3	0,1 – 15	-
Ni	7 – 38	7 – 3.4	2,1 – 30	10 – 20	0,9 – 279
Pb	7 – 225	2 – 27	1,1 – 27	20 – 1250	1,3 – 2240
Sb	< 100	-	-	-	-
Sc	0,5	-	2,4	0,08 – 0.1	-
U	30 – 300	-	-	-	-
V	2 – 1600	-	-	20	-
Zn	50 - 1450	1 – 42	15 – 566	10 – 450	82 – 5894

Sumber data : Disuplai oleh Warren Springs Laboratory, UK (Alloway, 1995)

Umumnya lingkungan yang terkontaminasi oleh logam Cd masuk ke dalam tanah adalah melalui aktivitas antropogenik (Clara *et al.*, 1998). Dalam bidang pertanian, penggunaan pupuk fosfat, pestisida, herbisida, maupun fungisida, dan penggunaan bahan bakar fosil juga memberi sumbangan terhadap polusi Cd. Sebagai gambaran dalam Tabel 1 disajikan kisaran tipikal

konsentrasi beberapa logam berat dari penggunaan beberapa jenis pupuk pada suatu lahan pertanian di UK. Tampaknya bahwa penggunaan pupuk fosfat dan kompos dari sampah dapat sebagai sumber penting penghasil beberapa logam berat. Demikian halnya dengan endapan lumpur atau kotoran buangan (*sewage sludge*), selain mengandung bahan organik dan hara, juga mengandung logam-logam berat.

LOGAM BERAT DAN SIFAT-SIFAT TANAH

Tanah adalah suatu sistem yang dinamik. Perubahan terhadap sifat-sifat tanah (kelembaban, pH, kondisi redoks, dan alterasi gradual di dalam tanah) mempengaruhi bentuk dan ketersediaan logam-logam dalam larutan tanah. Perubahan ini diperlukan dalam penanganan tanah yang terkontaminasi logam berat tersebut.

Reaksi tanah (pH)

Reaksi Tanah (pH) berperan dalam mengontrol sifat-sifat kimia logam dan proses lainnya di dalam tanah. Tingkat ketersediaan logam berat tergantung pada pH lingkungan dimana logam tersebut berada. pH tanah juga dipengaruhi oleh perubahan redoks potensial yang terjadi di dalam tanah secara periodik. Dalam kondisi reduksi, umumnya pH tanah meningkat, sedangkan kondisi oksidasi menyebabkan pH tanah menurun. Besi ferro (Fe^{2+}) larut dalam kondisi reduksi, sehingga terjadi pelepasan ion OH^- dengan meningkatnya pH tanah, sedangkan dalam kondisi oksidasi, besi ferri (Fe^{3+}) terbentuk dan menempati kompleks jerapan, sehingga terjadi pelepasan ion H^+ dari kompleks ke dalam larutan tanah dan menyebabkan pH tanah menurun. Pada pH rendah ketersediaan beberapa logam berat meningkat, seperti : Fe, Al, Cu, Zn, dalam bentuk larut. Ion Al^{3+} larut pada $\text{pH} < 5.5$, sedangkan pada pH 5.5 terjadi pengendapan Al dalam bentuk $\text{Al}(\text{OH})_3$. Pada $\text{pH} < 8$, Cd dalam bentuk bebas, Cd^{+2} dan $\text{Cd}(\text{OH})^+$ mulai terbentuk pada kisaran pH 7 – 7.5, dan $\text{Cd}(\text{OH})_2$ pada

pH 9 (Babich dan Stotzki, 1978). Penurunan pH tanah umumnya meningkatkan ketersediaan beberapa logam berat, kecuali Mo dan Se.

Bahan Organik Tanah

Bahan organik (BO) adalah salah satu komponen terpenting di dalam tanah. Berperan dalam perkembangan struktur tanah dan mengatur perpindahan polutan dan bahan pencemar di dalam tanah, dan berperan penting di dalam siklus perputaran serta penyimpanan hara dan air. Rata-rata kandungan BO di permukaan tanah adalah 6%. Untuk lahan yang dapat ditanami, kandungan BO < 4%. Namun dalam 15 tahun terakhir, perubahan praktis dalam sistem pertanian telah menyebabkan konsentrasi BO menurun di beberapa tanah (Environment agency, 2002). Bahan organik juga sering digunakan sebagai bahan amelioran untuk mereklamasi tanah-tanah terkontaminasi logam/limbah, yang bersumber dari lapisan tanah atas, atau bahan kompos, jerami, serbuk gergaji, miselia jamur, dan pupuk kandang (Moynahan *et al.*, 2000).

Penggunaan tanaman (*revegetation*) sebagai sumber BO untuk mengembalikan kesuburan tanah, meningkatkan populasi mikroorganisme, sehingga keracunan logam-logam berat dapat menurun akibat aktivitas mikroorganisme tanah telah banyak dilakukan. Pemanfaatan tanaman cepat tumbuh (*fast growing species*) seperti sengon buto (*Enterolobium syclocarpum*), sengon (*Paraserianthes falcataria*) angkana (*Pterocarpus indicus*), dan gmelina (*Gmelina arborea*) sebagai sumber BO lebih efektif dibandingkan tanaman semusim (Puradyatmika & Husin, 1999). Selain itu pemanfaatan tanaman kacang-kacangan dan tanaman penutup tanah (*Leguminosa*) sebagai sumber N juga banyak digunakan pada lingkungan tanah terkontaminasi.

Bahan organik bersifat koloid (organik) di dalam tanah dan mempunyai peranan penting terhadap sifat-sifat kimia tanah, dapat dibagi kedalam bahan-bahan humik dan non-humik. Bahan non-humik adalah senyawa-senyawa

dalam tanaman dan organisme, seperti : asam amino, karbohidrat, asam-asam organik, lemak, dan lignin yang biasanya mengalami reaksi-reaksi degradasi dan dekomposisi. Namun terkadang dijerap oleh komponen inorganik tanah atau dalam kondisi anaerobik, sehingga terlindung dari dekomposisi. Sebaliknya bahan humik (humus atau senyawa humat) merupakan hasil akhir dari dekomposisi bahan tanaman di dalam tanah. Senyawa-senyawa humat diartikan sebagai bahan koloidal terpolidispersi yang bersifat amorf, berwarna kuning hingga coklat hitam dan memiliki berat molekul tinggi. Senyawa humat ini berperan dalam pembentukan tanah dan translokasi atau pergerakan liat, Al dan Fe yang menghasilkan perkembangan horison spodik dan horison argilik. Senyawa humat juga berperan dalam membentuk ikatan kompleks dengan logam-logam. Adanya pembentukan kompleks mempengaruhi kereaktifan dan efek toksik dari logam (Matagi *et al.*, 1998).

Oksidasi – Reduksi

Di dalam larutan tanah, proses-proses kimia sebagian besar dikendalikan oleh elektron dan proton. Hampir seluruh reaksi kimia berlangsung karena adanya pemindahan elektron dari ion ke ion lainnya. Proses oksidasi berarti memberi (donor) atau mengurangi elektron, sedangkan proses reduksi berarti menerima (akseptor) atau menambah elektron. Dalam kondisi tereduksi, logam Fe (II) merupakan donor elektron, sedangkan dalam kondisi teroksidasi Fe (II) akan berubah menjadi Fe (III).

Kondisi reduksi dari logam berat dalam larutan tanah memiliki suatu parameter yang spesifik, karena secara drastis mempengaruhi keracunan, serapan, dan pergerakan logam berat (Merz and Cornazer, 1971; Henne *et al.*, 1971; Florence *et al.*, 1983 *In* Matagi *et al.*, 1998). Kondisi reduksi-oksidasi dari logam berat tergantung juga pada ada tidaknya oksigen. Perubahan dalam potensial redoks (Eh) dibawah kondisi tereduksi menghasilkan endapan logam, seperti logam sulfida. Pengendapan tergantung pada produk kelarutan (Ksp)

dari jenis logam, pH, konsentrasi dari ion logam dan anion. Sebagai contoh karbonat (CO_3^-), kelarutannya dipengaruhi oleh tekanan parsial CO_2 . Kelarutan PbCO_3 dapat meningkat beberapa kali dengan adanya CO_2 . Besi ferro (Fe^{2+}) teroksidasi menjadi ferri (Fe^{3+}) akan mengendap pada pH 3, sedangkan Al^{3+} mengendap menjadi $\text{Al}(\text{OH})_3$ pada pH 5,5.

Aktivitas mikroorganisme umumnya mempengaruhi redoks potensial di dalam lingkungan tanah. Bila kondisi lingkungan *anoxic* berarti kaya akan Fe (III), bahan organik, dan bakteri pereduksi Fe akan dominan. Bakteri pereduksi Fe (II) dan CO_2 berada dalam jumlah besar. Hasil potensial redoks akan dikontrol oleh Fe(II)/Fe(III) pada atau dibawah -100 mV (Ledin & Pedersen, 1996). Mikroorganisme bertindak sebagai katalis dalam proses geokimia melalui metabolismenya, misalnya : *Thiobacillus sp.* Dalam kasus limbah (tailing) yang tercemar polutan inorganik karena penambangan logam Fe, dan partikel-partikel bijih mineral di dalam tanah, seperti : PbS , ZnS dan CuFeS_2 , bila teroksidasi akan melepaskan kation-kation Pb^{2+} , Zn^{2+} , dan Cu^{2+} di dalam tanah, sedangkan oksidasi dari polutan organik dihasilkan oleh mikroorganisme melalui enzim oksigenase (Moffet and Zika, 1987 *In* Matagi *et al.*, 1998).

PERANAN MIKROORGANISME

Mikroorganisme memainkan peranan penting di banyak bidang industri dan teknologi, terutama di tanah-tanah bekas penambangan, pertanian, dan juga sebagai pengontrol sampah/limbah buangan. Di daerah pertambangan, bakteri *Thiobacillus ferrooxidans* merupakan salah satu mikroorganisme penting. Bakteri ini termasuk pelarut (*leaching*) logam-logam dari bijih tambang, ditemukan pada daerah tambang yang telah didrainase dengan pH lingkungan masam. *Thiobacillus ferrooxidans* merupakan kelompok *acidophilik kemolithotropik* yang toleran terhadap logam-logam toksik (Clausen, 2000) dan hidup pada lingkungan masam dengan temperatur panas, retakan bahan vulkanik, dan deposit bijih sulfida dengan konsentrasi asam sulfurik tinggi (Brierley, 1982).

Bakteri *Thiobacillus ferrooxidans* memperoleh energi untuk pertumbuhannya dari oksidasi zat inorganik besi atau sulfur. Sebagian besar bersifat autotropik, mengambil karbon untuk sintesis senyawa selular bukan dari bahan organik, tetapi dari CO₂ di atmosfer (Brierley, 1982). Bakteri ini berfungsi sebagai katalis dalam mengoksidasi logam sulfida yang larut seperti : $\text{Cu}_2\text{S} \rightarrow 2\text{Cu}^+ + \text{SO}_4^{2-}$. Secara alami Cu₂S akan teroksidasi di alam dengan adanya udara (O₂) dalam lingkungan masam, tetapi sangat lambat. Namun dengan adanya *T. ferrooxidans*, proses ini akan berlangsung 100 kali lebih cepat dari proses alami. Selain berfungsi sebagai katalis dalam oksidasi logam sulfida, juga mengoksidasi ion ferro (Fe²⁺) menjadi ion ferri (Fe³⁺) berbentuk endapan keras. Persamaan reaksi : $4\text{FeSO}_4 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{H}_2\text{O}$ (Fowler *et al.*, 1999) pada pH 1,0 dan 4,5, dengan pengucualian tidak terdapat CaCO₃ sebagai agent penetral (Jensen and Webb, 1995 *In* Wood, 2001).

Selain *Thiobacillus ferrooxidans* sebagai pelarut logam-logam berat, terdapat pula *Thiobacillus thiooxidans* yang tumbuh dan berkembang dari unsur sulfur dan beberapa senyawa sulfur dapat larut. Suatu penelitian oleh Donovan P. Kelly dan asosiasinya di Universitas Warwick telah dilakukan dengan menggabungkan kedua bakteri tersebut dalam medium kultur untuk mengekstrak logam dari bijih tambang. Penggabungan kedua bakteri menjadi lebih efektif dalam pelarutan (*leaching*) daripada tidak digabungkan. Hal yang mirip dijumpai pada penggabungan *Leptospirillum ferrooxidans* dan *T. organoparus* dapat menurunkan konsentrasi pyrite (FeS₂) dan chalcopyrite (CuFeS₂) (Wood, 2001).

Mikroorganisme ekstrim dari spesies thermophilik dan acidophilik adalah genus *Sulfolobus*. Bakteri ini tumbuh subur di lingkungan pH masam dan temperatur panas, serta retakan volkanik pada temperatur > 60 °C. Beberapa strain dari *Sulfolobus* telah diamati pada temperatur mendekati titik didih air. Dinding selnya memiliki suatu struktur yang berbeda dari kebanyakan bakteri. Mikroorganisme dari bakteri ini termasuk *Archaeobacteria*. *Sulfolobus acidocaldarius*

dan *S. brierleyi* dapat mengoksidasi sulfur dan besi sebagai sumber energi, dan memanfaatkan CO₂ atau senyawa organik sederhana untuk mendapatkan karbon. Bakteri ini hidup dalam lingkungan aerobik maupun anaerobik. Mineral-mineral chalcopyrite (CuFeS₂) dan molybdenite (MoS₂) yang tahan terhadap kebanyakan mikroorganisme, dapat dengan mudah diserang oleh *Sulfolobus* dan menghasilkan logam-logam dapat larut yang tidak toksik bagi organisme. Molibdenum adalah sangat toksik untuk *Thiobacilli*, namun dengan mudah dapat ditahan oleh *S. brierleyi* pada konsentrasi 750 mg/L. Walaupun *Sulfolobus* belum diisolasi sebagai pelarut komersil, tetapi studi laboratorium menegaskan bahwa mikroorganisme tersebut memiliki kemampuan untuk berkembang biak di dalam lingkungan tanah. Kemampuannya untuk melarutkan logam-logam dari bijih tambang baru diakui saat ini, yaitu dapat menyerang struktur mineral resisten (Brierley, 1982).

Proses mikrobiologi untuk penghilangan/pemindahan logam-logam dari larutan dibagi kedalam 3 kategori, yaitu : (1). Adsorpsi ion logam di atas permukaan dari mikroorganisme; (2). Ketersediaan intraselular dari logam; (3). Transformasi kimia dari logam oleh agent biologi. Sebagian besar mikroorganisme mempunyai suatu muatan elektrik negatif pada kelompok bermuatan negatif dari atom pada membran sel dan dinding sel. Kelompok bermuatan atau ligan termasuk phosphoryl (PO₄⁻), carboxyl (COO⁻), dan hidroksil (OH⁻) yang bertanggung jawab untuk adsorpsi ion-ion logam bermuatan positif dalam larutan. Proses adsorpsi berlangsung cepat tergantung pada temperatur dan metabolisme energi. Umumnya ragi bir *Saccharomyces cerevisiae* dan fungus *Rhizopus arrhizus* telah dibuktikan dapat menyerap uranium (U) dari sampah cair. Konsentrasi uranium adalah antara 10 % dan 15 % berat kering sel telah diperoleh dari ragi tersebut, sedangkan *R. arrhizus* menyerap uranium tertinggi sebanyak 18,5% berat kering sel.

LOGAM BERAT DAN MIKROORGANISME

Pengaruh logam-logam berat terhadap komunitas mikroorganisme alami telah menarik banyak perhatian dalam beberapa tahun terakhir ini. Polusi logam berat berpengaruh terhadap pertumbuhan, morfologi, dan metabolisme mikroorganisme di dalam tanah, melalui gangguan fungsi, perubahan protein atau penghancuran sel membran. Mikroorganisme adalah lebih sensitif/stres terhadap logam-logam berat dibandingkan binatang tanah atau tanaman pada lingkungan tanah yang sama (Ghorbani *et al.*, 2002). Ekosistem mikroorganisme tanah merupakan suatu fungsi yang kompleks, terdiri dari kelompok-kelompok mikroorganisme yang mempunyai peranan integral dalam mempertahankan kesuburan tanah dan hubungannya dengan unsur hara tanaman (Producers, 2000). Beberapa parameter yang umumnya digunakan untuk mengukur perubahan populasi mikroorganisme di dalam tanah diantaranya : respirasi mikrobial, biomasa mikrobial tanah, mineralisasi N dan C, aktivitas enzim tanah, dan fiksasi N₂.

Respirasi mikroorganisme tampaknya tidak berpengaruh terhadap konsentrasi logam berat, hanya pada konsentrasi sangat tinggi menyebabkan CO₂ menurun di dalam tanah. Seperti dilaporkan Ghorbani *et al.* (2002), bahwa respirasi mikroorganisme menurun bila konsentrasi Cu atau Zn lebih dari 1.000 mg/kg. Chander & Brooke (1991) *In* Ghorbani *et al.* (2002) juga menyatakan bahwa peningkatan aktivitas respirasi spesifik dari biomassa mikroorganisme tanah adalah merespon terhadap penambahan substrat (glukosa dan tunas jagung) di dalam tanah dengan kandungan logam berat tinggi.

Ada kecenderungan bahwa jumlah biomassa mikroorganisme tanah menurun sebagai akibat pemberian *sewage sludge* yang terkontaminasi logam berat dalam waktu lama. Selain itu sumber-sumber logam berat (Cu dan Zn) yang berasal dari pupuk kandang dan aplikasi fungisida juga menyebabkan biomassa mikroorganisme menurun. Doelman, 1986 *In* Ghorbani *et al.*, 2002

juga melaporkan bahwa adanya hambatan mineralisasi N dan nitrifikasi sekitar 1.000 mg/kg Zn, Cu, Ni 100–500 mg/kg Pb dan Cr; dan 10–100 mg/kg Cd pada tanah-tanah terkontaminasi. Proses mineralisasi yang menurun terkadang meningkatkan akumulasi bahan organik pada lapisan sampah (*litter layer*) yang pernah diamati di tanah-tanah hutan terkontaminasi, sedangkan di tanah-tanah pertanian, akumulasi bahan organik jarang terlihat.

Fiksasi N₂ oleh bakteri heterotropik juga cenderung menurun pada tanah-tanah di Rusia yang terkontaminasi Cu dan Zn atau Pb dan Zn pada konsentrasi bervariasi. Beberapa hasil penelitian menyatakan bahwa kemampuan fiksasi N₂ oleh bakteri heterotropik menjadi sensitif dengan penambahan garam-garam Cu dan Cr, juga pada tanah-tanah terkontaminasi logam dari limbah. Tanah-tanah terkontaminasi Cu atau Cd secara nyata dapat menurunkan jumlah bakteri heterotropik dan menyebabkan fluktuasi terhadap aktivitas mikroorganisme. Fiksasi N₂ oleh bakteri autotropik, seperti : *Cyanobacteria* tampaknya juga sensitif terhadap keracunan logam-logam berat (Ghorbani *et al.*, 2002). Demikian pula hubungan simbiosis antara genus *Rhizobium* dan tanaman inang legum berpengaruh terhadap kehadiran logam berat dari limbah dan secara nyata dapat menyebabkan kepunahan *rhizobia* di dalam tanah.

TOLERANSI MIKROORGANISME TERHADAP LOGAM BERAT

Penambahan logam berat pada suatu ekosistem dalam jumlah dan konsentrasi tinggi dapat menyebabkan mikroorganisme (bakteri) tertekan /stres. Pada konsentrasi tinggi, ion logam berat akan bereaksi membentuk senyawa toksik di dalam sel mikroorganisme (Spain, 2003). Agar dapat mempertahankan hidup dibawah kondisi stres, bakteri mempunyai beberapa tipe mekanisme toleran dalam pengambilan ion-ion logam berat. Mekanisme ini meliputi : *efflux* ion logam pada bagian luar sel, akumulasi dan kompleks ion logam pada bagian dalam sel, dan reduksi ion logam untuk menurunkan efek toksik. Mikroorganisme mempunyai kemampuan beradaptasi dan toleran terhadap

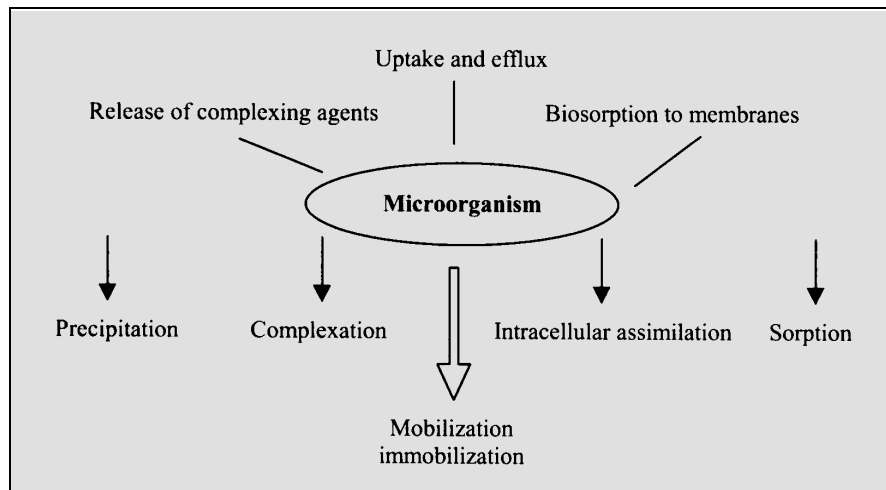
kehadiran logam berat, bahkan dapat tumbuh. Pengaruh menguntungkan antara mikroorganisme dan logam adalah mikroorganisme dapat membersihkan lingkungan terkontaminasi logam, namun yang tidak menguntungkan adalah mekanisme toleran terhadap logam menyebabkan terjadinya peningkatan bakteri resisten bersifat antibiotik.

Suatu teknologi yang menerapkan mikroorganisme untuk memperbaiki kualitas lingkungan dikenal sebagai *Bioteknologi*. Salah satunya melalui *Bioremediasi* adalah salah satu teknologi untuk merehabilitasi lingkungan termasuk tanah yang terkontaminasi oleh limbah (logam-logam berat). Teknologi ini menggunakan kehidupan organisme untuk menurunkan atau menghilangkan bahaya lingkungan dari akumulasi logam-logam toksik dan sampah berbahaya lainnya (Fahrenholz, 1999; Gazso, 2001). Peranan mikroorganisme dalam mempengaruhi proses mobilisasi atau immobilisasi unsur-unsur toksik adalah melalui beberapa mekanisme berikut : (1). Kelat unsur oleh proses metabolisme; (2). Oksidasi-reduksi logam yang dipengaruhi daya larut atau valensi; (3). Perubahan pH yang mempengaruhi sifat ion, biosorpsi oleh kelompok fungsional pada permukaan sel; (4). Bioakumulasi oleh sistem transport energi; (5). Immobilisasi untuk membentuk bahan stabil, biometilasi, dan biodegradasi kompleks organik pada logam.

Sebagai ilustrasi disajikan mekanisme pengolahan logam oleh mikroorganisme (Gazso, 2001) dalam Gambar 1.

Mobilisasi

Mobilisasi/pelarutan terhadap logam-logam toksik adalah melalui reaksi oksidasi-reduksi dan produksi metabolisme asam organik atau mineral yang dipengaruhi oleh naik turunnya pH dalam larutan.



Sumber : Gazso, 2001

Gambar 1. Mekanisme Pengolahan Logam oleh Mikroorganism

1. Oksidasi enzimatik

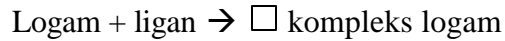
Oksidasi enzimatik berguna untuk memindahkan spesies inorganik dari larutan. Pencucian logam dari bijih tambang secara biologi dilakukan oleh mikroorganism autotropik, seperti : *Thiobacillus ferrooxidans* atau *T.thiooxidans*. Aktivitas *T.ferrooxidans* berperan memindahkan uranium dari bijih tambang melalui reaksi secara langsung dan tidak langsung. Secara langsung adalah : $UO_2 + 2 Fe^{3+} \rightarrow UO_2^{2+} + Fe^{2+}$, dan secara tidak langsung adalah : $UO_2 \rightarrow UO_2^{2+}$. Besi ferro yang dihasilkan adalah sebagai pembawa elektron untuk oksidasi uranium (U) dan direduksi oleh *T. ferrooxidans* melalui reaksi : $4 Fe^{2+} + O_2 + 4 H^+ \rightarrow 4 Fe^{3+} + 2 H_2O$.

2. Reduksi enzimatik

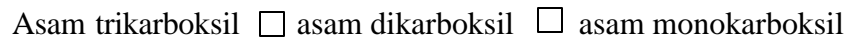
Reduksi enzimatik diperankan oleh mikroorganism anaerobik obligat dan fakultatif yang memiliki potensi bioremediasi secara *in situ*. Contoh reduksi oleh mikroorganism adalah : $UO_2^{2+} \rightarrow UO_2$; $Fe^{3+} \rightarrow Fe^{2+}$; $Mn^{4+} \rightarrow Mn^{2+}$.

Pembentukan Kompleks

Agent pembentuk kompleks dari mikroorganisme bermanfaat dalam menggerakkan senyawa inorganik toksik dan memindahkannya dari sampah/limbah padat, melalui reaksi :



Agent pengkompleks mikroorganisme dapat sebagai asam-asam organik dengan berat molekul (BM) rendah dan alkohol, ligan dengan BM tinggi, siderapore, dan senyawa pengikat logam toksik. Asam-asam organik dengan BM rendah bervariasi, misalnya : asam sitrat dan asam trikarboksil yang dilepaskan selama degradasi mikroorganisme dan memiliki kemampuan mengkompleks logam. Beberapa asam amino dari bakteri dapat juga sebagai agent pengkompleks. Urutan kemampuan mengkompleks asam-asam organik adalah :



Senyawa organik terutama selulosa dan lignin yang melepaskan senyawa makromolekul, yaitu : humat dapat membentuk kompleks dengan logam-logam berat tergantung peningkatan pH. Bahan humik dapat membentuk kompleks dengan ion-ion logam adalah merupakan salah satu metode remediasi pada air terkontaminasi dan radionulide (Koopal, *et al.*, 2001).

4. Siderapore

Siderapore atau pengkelat Fe spesifik adalah dihasilkan ketika mikroorganisme bertumbuh dalam medium yang kekurangan Fe. Siderapore memegang peranan penting dalam mengkompleks logam-logam toksik dan meningkatkan daya larutnya (Gazso, 2001). Siderapore lebih spesifik untuk Fe (III), tetapi dapat juga mengkompleks logam-logam berat lainnya.

Immobilisasi

Immobilisasi pada logam-logam berat ditunjukkan dengan terbentuknya pengendapan (*presipitasi*), biosorpsi, dan bioakumulasi.

1. Pengendapan (*presipitasi*)

Degradasi mikroorganisme dari senyawa organo-phosphate hingga ortho-phosphate dapat menyebabkan pengendapan logam melalui pembentukan logam-phosphate, khususnya pada $\text{pH} > 7$, termasuk phosphate intraselular yang menyebabkan immobilisasi logam-logam.

Rufus *et al.*, 2001, menyatakan bahwa kontribusi Fe dan P yang tinggi di dalam tanah dapat juga memperbaiki ekosistem tanah dan limbah yang terkontaminasi Zn, Cd, dan Pb bila pH tanah ditingkatkan dengan penambahan kapur. Penerapan bahan kapur CaCO_3 , CaO, dan CaOH, saat ini telah digunakan sebagai perlakuan pada tanah-tanah masam dan terkontaminasi logam berat (Winking and Dollhopf, 2000).

2. Biosorpsi

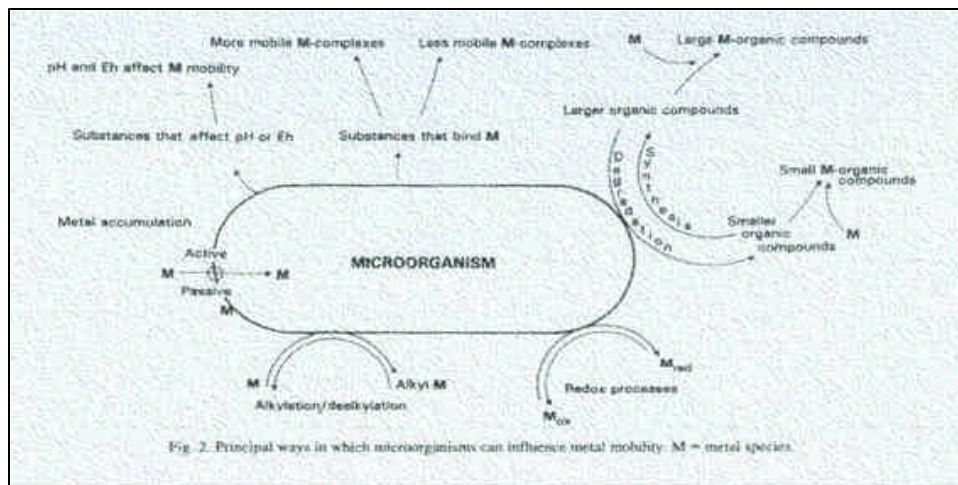
Biosorpsi logam toksik didasarkan pada proses *non-enzimatik* seperti adsorpsi. Adsorpsi adalah pengikatan *non-spesifik* dari spesies ionik pada permukaan sel, atau polisakarida dan protein ekstraselular. Dinding sel bakteri dan lapisannya, dinding fungi, ragi, dan alga adalah efisien sebagai biosorbent logam (kelompok pengikat bermuatan). Ion-ion logam dapat dipindahkan melalui biomassa bakteri hidup atau mati. Banyak spesies mempunyai kandungan kitin yang tinggi pada dinding sel dan polimer ini dari Nasetil-glukosamine merupakan biosorbent efektif.

3. Bioakumulasi

Salah satu faktor yang mempengaruhi bioakumulasi atau biosorpsi oleh mikroorganisme adalah pH. Penelitian yang dilakukan oleh Suh *et al.*, 1999 : "Pengaruh pH terhadap akumulasi Pb^{2+} dari limbah industri oleh

mikroorganisme”, menunjukkan bahwa pH optimum akumulasi Pb^{2+} pada *Saccharomyces cerevisiae* adalah pH 4-5, sedangkan *Aureobasidium pullulans* pada pH 6-7. Proses akumulasi kedua mikroorganisme tersebut jelas berbeda, karena pada *S. cerevisiae*, ion Pb^{2+} dapat menembus ke dalam bagian sel inner, sedangkan pada *A. pullulans* akumulasi hanya terjadi pada bahan polimerik ekstraselular di sekitar permukaan sel.

Ledin & Pedersen (1996) juga menegaskan pentingnya peranan mikroorganisme di lingkungan terkontaminasi (limbah) dengan konsentrasi logam berat tinggi (Gambar 2). Prinsip kerja mikroorganisme dapat mempengaruhi mobilisasi atau immobilisasi logam. Kehadiran mikroorganisme dapat mempengaruhi penyebaran logam dengan cara yang berbeda. Kehidupan mikroorganisme bebas merupakan partikel *mobile* yang memiliki kemampuan tertinggi dalam menjerap logam. Bila mayoritas dari mikroorganisme bertumbuh dalam *biofilms* pada permukaan, maka pergerakan logam menjadi berkurang, karena beberapa mikroorganisme dapat menyebabkan logam-logam mengendap, seperti : sulfida.



Sumber : Ledin & Pedersen, 1996

Gambar 2. Prinsip Kerja Mikroorganisme yang mempengaruhi Mobilisasi Logam

Interaksi antara logam dan mikroorganisme dapat juga terganggu dengan kehadiran senyawa lain, seperti : mineral liat, anion inorganik, kation, kompleks bahan organik (BO), dan lainnya. Logam dapat terhidrasi, dikelat, atau dijerap oleh senyawa tersebut, sehingga ketersediaan logam berkurang sebagai akibat interaksi dengan mikroorganisme.

Aktivitas mikroorganisme dalam siklus karbon juga berpengaruh terhadap jumlah dan karakter BO. Senyawa organik memiliki variasi ukuran dalam menjerap logam. Ukuran dari senyawa organik seperti sifat lainnya juga menentukan bila kompleks logam-organik dalam bentuk *mobile* atau *immobile* di lingkungan. Adanya degradasi oleh mikroorganisme dapat merubah senyawa logam-organik dalam bentuk *immobile* menjadi *mobile* dan menyebabkan logam larut dalam air

KESIMPULAN

Pemanfaatan mikroorganisme dalam mengurangi efek toksik logam pada tanah terkontaminasi logam-logam berat mulai menjadi perhatian para peneliti karena lebih bersifat ramah lingkungan. Secara alami, suatu ekosistem alam mempunyai mekanisme dalam mengurangi bahaya kontaminasi logam berat. Bila suatu ekosistem terkontaminasi logam berat berlebihan, sehingga terjadi akumulasi dan bersifat toksik, maka akan terjadi ketidakseimbangan di dalam ekosistem tersebut.

Teknologi secara biologi yang menerapkan mikroorganisme untuk memperbaiki kualitas lingkungan dikenal sebagai *Bioteknologi*. Salah satunya melalui bioremediasi, yaitu penggunaan kehidupan organisme untuk menurunkan atau menghilangkan bahaya lingkungan dari akumulasi logam-logam toksik dan sampah berbahaya lainnya. Proses mikroorganisme dalam mempengaruhi sifat *mobile* atau *immobile* unsur-unsur toksik adalah melalui beberapa tahapan, yaitu : (1). Mobilisasi, seperti : oksidasi enzimatis, reduksi

ensimatik, pembentukan kompleks, dan siderapore; (2). Immobilisasi, seperti : pengendapan, biosorpsi, dan bioakumulasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Alloway, B.J., 1995. Heavy Metals in Soils. Blackie Academic and Professional. Second edition. London.
- Babich, H and G. stotzky. 1978. Effect of cadmium on the biota : influence of environmental factors. Edv. Appl. Microbiol. 23:55-117.
- Brierley, C.L., 1982. Microbial Mining. Scientific American. 247:42-50.
- California State Water Resources Control Board, 2000. Risks and Benefits.
- Clara. C., Fox, T. C., Garvin, D. F., and Kochian, L. V., 1998. The role of iron deficiency stress responses in stimulating heavy metal transport in plants. TEKRAN. Agricultural Research Service.
- Clausen, C. A., 2000. Isolating metal-tolerant bacteria capable of removing Cu, Cr, and As from treated wood. Waste Management & Research. 18: 264-268. UK.
- Environment Agency, 2002. Enviromental Facts and Figures. Soils.
- Fahrenheit, J. 1999. Remediation of heavy metal contaminated soil. Data Requirements for Soil, Sediment, and Sludge.
- Fowler, T.A., P.R. Holmes, and F.K. Crundwell. 1999. Mechanism of pyrite dissolution in the presence of *Thiobacillus ferrooxidans*. Appl. Environ. Microbiol. 65:2987-2993.
- Gazso, L. G. 2001. The key microbial in the removal of toxic metal and radionuclides from the enviroment. CEJOEM 2001. 7:178-185.
- Ghorbani, N. R., Salehrastin, N., and Moeni, A., 2002. Heavy metals affect the microbial populations and their activities. Symposium No. 54. 17th WCSS 14-21 August, Thailand. 2234:1-11.
- Hardjowigeno, S., 1993. Klasifikasi Tanah dan Pedogenesis. Edisi Pertama. Akademika Pressindo. Jakarta.
- Koopal, L. K., Willem, H. V. R., and David, G. K., 2001. Humic matter and contaminants. General aspects and modeling metal ion binding. Pure Appl. Chem. 73: 2005-2016.
- Ledin, M., and K. Pedersen, 1996. The environmental impact of mine wastes – Roles of microorganisms and their significance in treatment of mine wastes. Earth-Science Reviews 41 (1996) 67-108.

- Matagi, S. V., Swai, D., and Mugabe, R., 1998. Heavy metal removal mechanisms in Wetlands. *Afr. J. Trop. Hydrobiol. Fish.* 8:23-35.
- Moynahan, S. O., Stuart, R. J., Chaterine, A. Z., 2000. Microbial inoculation potential of organic matter amendements for mine tailing reclamation. Land Reclamation Symposium.
- Producers, R. A., 2000. Evaluating organic amendements for revegetation. Land Reclamation Symposium.
- Puradyatmika, P., and Y. Husin, 1999. Pemanfaatan Kompos Dalam Upaya Peningkatan Kesuburan Tailing. Departemen Lingkungan, PT. Freeport Indonesia.
- Rufus, C., Brown, S. L., Stuczynski, T. I., Daniel, W. L., Li, Y. M., Siebielec, G., Malik, M., and Compton, H., 2001. Progress in remediation of soils contaminated by mining and smelting of Pb, Zn, Cd using tailor made biosolids mixtures and composts. TEKRAM. Agricultural Research Service.
- Spain, A., 2003. Implication of microbial heavy metal tolerance in the environment. Review in Undergraduate Research. 2: 1-6.
- Suh, J. H. , J. W. Yun, D. S. Kim, 1999. Effect of pH on Pb²⁺ accumulation in *Saccharomyces cerevisiae* and *Aureobasidium pullulans*. *Bioprocess Engineering*,. 20:471-474. Springer-Verlag.
- Turpeinan, R., 2002. Interactions between metals, microbes, and plants– Bioremediation of arsenic and lead contaminated soils. Academic Dissertation in Environmental Ecology. Dept. of Ecological and Environmental Sciences, Univ. of Helsinki.
- Winking, S. R., and D. J. Dollhopf, 2000. Alkaline industrial by-products as mine waste amendements. Land Reclamation Symposium.
- Wood, T.A., K.R. Murray, J. G. Burgess, 2001. Ferrous sulphate using *Thiobacillus Ferrooxidans* cells immobilized on sand for the purpose of treating acid mine-Drainage. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 56:560-565.