

PERANAN MIKROBA TANAH PADA KEGIATAN REHABILITASI LAHAN BEKAS TAMBANG (*Roles of Soil Microbes in Ex-Mining Land Rehabilitation*)*

Oleh/By:

Enny Widyati

Pusat Litbang Hutan dan Konservasi Alam

Jl. Gunung Batu No. 5 Po Box 165; Telp. 0251-8633234, 7520067; Fax 0251-8638111 Bogor

*) Diterima : 18 Maret 2008; Disetujui : 08 Agustus 2008

ABSTRACT

Ex-mining land with huge metal accumulation can be inhabited by soil microbes. With appropriate management, detrimental microbes such as sulphur-oxidizing bacteria, can be employed to recover metals, particularly iron, nickel, copper, gold and silver more efficiently. In land rehabilitation of these sites, soil microbes play important roles. Through bioremediation process they are able to use metals in their metabolisms as an electron acceptor or enzyme activator reducing their toxicity. Furthermore, they facilitate a more suitable environment for growing seedlings revegetation. Soil microbes can also associate with special plants to accelerate phytoremediation. In this case, root colonizing microbes inhibit the metals absorbed by plants or release a special substance to reduce the metal hazard. They also increase metal accumulation in the tissues without raising its harm to the plants. It is admitted that soil microbes can be involved to enhance the ex-mining land rehabilitation.

Key words: Ex-mining land, biodegradation, sulphur-oxidizing bacteria, rehabilitation

ABSTRAK

Lahan bekas tambang yang mempunyai kandungan logam-logam tinggi dapat dikoloni oleh mikroba tanah. Dengan pengelolaan yang tepat, bakteri-bakteri yang merugikan seperti bakteri pengoksidasi sulfur (BOS) dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan *recovery* logam-logam terutama besi, nikel, tembaga, emas, dan perak. Kegiatan rehabilitasi lahan bekas tambang dapat ditingkatkan dengan bantuan mikroba tanah. Melalui proses bioremediasi, mikroba tanah dapat menggunakan logam sebagai aktivator enzim atau aseptor elektron untuk pertumbuhannya sehingga logam menjadi tidak berbahaya di alam. Mikroba yang berperan pada proses bioremediasi tersebut membantu memberikan lingkungan tanah yang lebih baik untuk mendukung pertumbuhan tanaman. Mikroba tanah juga aktif berasosiasi dengan tanaman pada lahan tersebut sehingga tanaman menjadi lebih tahan tumbuh pada lahan bekas tambang yang mempunyai kandungan logam-logam tinggi. Dalam hal ini mikroba menghalangi tanaman menyerap logam dengan cara menahan logam di akar, mikroba menghasilkan enzim tertentu yang dapat mengurangi toksisitas logam atau mikroba bahkan membantu tanaman mengakumulasi logam dalam jumlah yang lebih besar tetapi tanaman tidak keracunan. Karena itu proses rehabilitasi areal bekas tambang dapat dipercepat dengan bantuan mikroba tanah.

Kata kunci: Lahan bekas tambang, biodegradasi, bakteri pengoksidasi sulfur, rehabilitasi

I. PENDAHULUAN

Hutan merupakan sumber kemakmuran bagi masyarakat di sekitarnya. Hutan menghasilkan kayu yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bangunan, bahan baku furnitur, alat-alat transportasi, dan lain-lain. Manusia dapat memperoleh sumber makanan seperti buah-buahan, umbi-umbian, binatang buruan, dan jamur dari dalam hutan. Hutan juga merupakan apo-

tik hidup raksasa di mana dari dalamnya terdapat berbagai macam tanaman obat, madu, bahkan dari lantai hutan dapat diperoleh berbagai mikroba penghasil antibiotik. Selain hasil yang dapat dipungut langsung, hutan juga merupakan pemasok oksigen yang melimpah yang dibutuhkan bagi kehidupan. Di samping itu, keberadaan hutan juga menjamin kualitas air bersih dalam jumlah yang seimbang sepanjang tahun.

Cadangan bahan tambang yang sangat besar seringkali tersimpan di dalam tanah di bawah tegakan hutan. Namun ketidak-arifan manusia dalam melakukan praktek penambangan seringkali menggesur keberadaan hutan di atasnya, sehingga eksploitasi bahan tambang yang awalnya ditujukan untuk meningkatkan kemakmuran berbalik menjadi bencana. Hal ini terjadi karena keinginan untuk mengambil cadangan bahan galian sebanyak-banyaknya tanpa memperhitungkan kemampuan lingkungan untuk menanggung beban akibat berubahnya keseimbangan ekosistem. Praktek penambangan yang tidak ramah lingkungan tersebut mengakibatkan proses rehabilitasi memerlukan banyak masukan (*input*). Sebagai contoh PT. Bukit Asam memerlukan biaya mencapai 600 juta rupiah per hektar untuk melapisi tanah dengan *blue clay*, biaya angkut "*top soil*", pengadaan *cover crops* dan benih, tenaga kerja, pupuk, dan biaya pemeliharaan.

Batuan yang tersisa umumnya mengandung senyawa sulfidik yang ketika teroksidasi melepaskan sulfat ke lingkungan sehingga pH lingkungan sangat rendah, sehingga peristiwa ini dikenal dengan *acid mine drainage* (AMD). Kondisi pH yang sangat rendah mengakibatkan unsur hara makro yang ditambahkan melalui pemupukan menjadi tidak efektif karena akan segera terikat oleh logam-logam. pH yang rendah juga akan meningkatkan kelarutan logam-logam (Tan, 1993 *dalam* Widyati, 2006), sehingga pada lahan bekas tambang umumnya terjadi akumulasi logam. Oleh karena itu AMD dianggap merupakan penyebab terbesar rendahnya keberhasilan revegetasi.

Beberapa mikroba tanah mampu menggunakan energi dari proses oksidasi/reduksi logam maupun senyawa-senyawa berbahaya lainnya untuk pertumbuhannya. Dengan beberapa manajemen lingkungan, kemampuan mikroba tersebut dapat dioptimalkan sehingga ketersediaan logam-logam dalam tanah dapat menurun sampai ke ambang batas yang diijinkan

sesuai dengan peruntukannya. Oleh karena itu makalah ini membahas bagaimana mikroba tanah berperan dalam proses rehabilitasi lahan bekas tambang.

II. PERANAN MIKROBA TANAH PADA LAHAN BEKAS TAMBANG

Mikroba merupakan organisme yang mempunyai *niche* yang sangat sempit sehingga sangat rentan terhadap perubahan lingkungan. Kerentanan tersebut memacu mikroba bermutasi untuk bertahan pada kondisi lingkungan yang baru (Metting, 1996). Banyak mikroba ditemukan menghuni lahan-lahan yang tercemar logam berat seperti pada lahan bekas tambang. Mikroba memainkan banyak peran, baik yang menguntungkan maupun yang merugikan bagi manusia pada lahan-lahan bekas tambang. Di satu sisi mikroba tanah dapat memperburuk keadaan lahan misalnya mikroba yang berperan sebagai biokatalisator AMD tetapi sebagian dari mereka aktif mereduksi logam-logam menjadi tidak tersedia, sebagian lagi membantu pertumbuhan tanaman sehingga proses revegetasi menjadi lebih baik. Secara terperinci peranan mikroba tersebut diuraikan sebagai berikut:

A. Sebagai Biokatalisator AMD dan Sebagai Agen *Biomining*

Peristiwa AMD terjadi karena adanya oksidasi mineral-mineral bersulfur yang merupakan sisa galian tambang terbuka dan melepaskan asam sulfat seperti reaksi $\text{FeS}_2 + 14\text{Fe}^{3+} + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow 15\text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}^+$ (Bond *et al.*, 2000). Asam sulfat merupakan asam kuat sehingga akan menurunkan pH tanah dan air secara drastis. Menurunnya pH dapat meningkatkan kelarutan logam-logam (Tan, 1993).

Menurunnya pH dan hilangnya bahan organik (akibat penambangan terbuka) akan memacu inisiasi bakteri pengoksidasi sulfur (BOS) seperti *Thiobacillus* spp., *Leptospirillum* spp., *Sulfolobus* spp., dan *Ferroplasma* spp. (Bond *et al.*,

2000). Mikroba tersebut bersifat suka asam (*acidophilic*), menggunakan sumber C dari bahan anorganik (*lithotroph* atau *ototrof*) dan menggunakan sumber energi dari oksigen (Wentzel, 2004 dalam Widayati, 2006). Spesies *T. ferrooxidans* yang dikenal sebagai kemolitotrof dan mensintesis selnya dari karbon yang diperoleh secara ensimatik dari CO₂, ternyata dapat menggunakan karbon organik secara terbatas (Bacelar-Nicolau and Johnson, 1999). Kehadiran BOS akan memacu laju AMD menjadi 500.000-1.000.000 kali lipat dibandingkan dengan reaksi yang terjadi secara geokimia (Mills, 2004) sehingga dalam hal ini kelompok mikroba tersebut sangat merugikan bagi lingkungan tempat hidupnya.

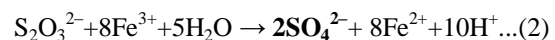
Namun demikian, BOS dapat dimanfaatkan untuk “memanen” sisa logam yang mempunyai nilai ekonomi tinggi seperti tembaga, seng, nikel bahkan dapat melepaskan emas dan perak dari mineral pirit (Brierley and Brierley, 1999 dalam Santosa, 2004). Kelompok mikroba tersebut dikenal dengan istilah “mikroba penambang” atau *biominer* dan aktivitas penambangan dengan menggunakan mikroba disebut *biomining*. Menurut Rawlings (2004) *biomining* adalah istilah untuk memfasilitasi ekstraksi logam-logam dari mineral bersulfur atau yang mengandung besi dengan menggunakan mikroba. Proses pelarutan logam merupakan kombinasi proses kimia dan mikrobiologi, di mana proses kimia terjadi karena adanya ion Fe³⁺ dan atau asam yang dihasilkan oleh aktivitas mikroba. Ekstrak logam pada proses *biomining* dilarutkan ke dalam air, sehingga proses ini disebut *bioleaching* sedangkan khusus untuk *recovery* emas dari lumpur *tailing* digunakan istilah biooksidasi (Rawlings, 2004). Menurut Rawlings (2004), tidak semua mineral dapat dipanen logamnya melalui teknologi *bioleaching* tetapi hanya logam yang terikat pada mineral yang mengandung sulfur, besi atau sulfur tereduksi, sehingga proses *bioleaching* selalu menghasil-

kan limbah berupa ion Fe³⁺ dan asam sulfat.

Menurut Rawlings dan Silver (1995) dalam Rawlings (2004) ekstraksi logam dengan mikroba lebih ekonomis dan lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan ekstraksi secara kimia. Kadar logam yang terlalu rendah dibandingkan dengan mineral yang mengikatnya mengakibatkan ekstraksi secara kimia menjadi tidak ekonomis dibandingkan dengan perolehan logam. Metode *bioleaching* juga tidak memerlukan energi dalam jumlah besar seperti yang digunakan untuk proses peleburan dan pembakaran pada proses pengambilan logam secara tradisional. Di samping itu, metode *bioleaching* lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan proses-proses secara fisika kimia karena proses ini menggunakan proses yang terjadi di alam. Sebagai contoh pada proses peleburan dan pembakaran akan menghasilkan gas berbahaya misalnya SO₂, hal tersebut tidak terjadi pada proses *bioleaching*.

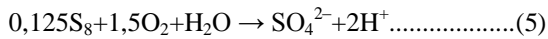
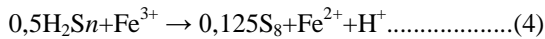
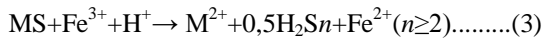
Mekanisme pelarutan mineral sulfid menunjukkan pola yang berbeda-beda. Schippers and Sand (1999) menemukan bahwa oksidasi logam sulfida yang berbeda dimulai dengan reaksi antara (*intermediate*) yang berbeda. Untuk pirit (FeS₂) dan molybdenit (MoS₂) melalui reaksi antara yang disebut mekanisme thiosulfat. Sedangkan spalerit (ZnS), kalkopirit (CuFeS₂) atau galena (PbS) melalui mekanisme polysulfida.

Pada mekanisme thiosulfat, pelarutan logam sulfida oleh asam terjadi dengan perantara thiosulfat dengan hasil akhir yang utama adalah sulfat. Schippers and Sand (1999) mencontohkan reaksi yang terjadi pada mineral pirit:



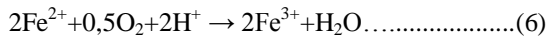
Pada mekanisme polysulfida, pelarutan logam sulfida memerlukan perantara sulfur elementer. Sulfur relatif stabil tetapi dapat dioksidasi menjadi sulfat de-

ngan bantuan BOS seperti reaksi 5 di bawah ini:



BOS

Ion Fe^{2+} yang dihasilkan dalam proses tersebut mungkin teroksidasi kembali oleh BOS menjadi Fe^{3+} .



BOS

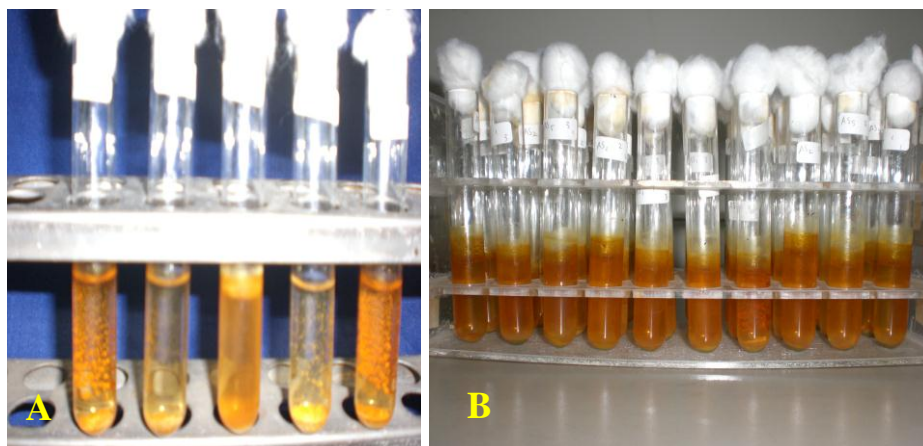
Peranan BOS pada proses solubilisasi logam adalah menyediakan asam sulfat (reaksi 5) untuk menangkap proton dan mengoksidasi besi menjadi ion feri (reaksi 6) untuk melarutkan mineral.

Bakteri yang telah dibuktikan efektif untuk melepaskan logam-logam komersial antara lain *T. ferrooxidans* dan *L. ferrooxidans* dengan kerapatan populasi 10^6 - 10^7 satuan pembentuk koloni/ml media tumbuh (Brierley and Brierley, 1999 dalam Santosa, 2004). Sejak tahun 1950-an bakteri tersebut telah digunakan untuk melepaskan logam-logam dari limbah bahan galian (*tailing*). Beberapa tahun terakhir dilaporkan bahwa 11% dari produksi tembaga (Cu) di USA (www.personals.psu.edu) dan 20% produk tembaga di dunia (Brierley and Brierley, 1999 dalam Santosa, 2004) diproduksi melalui tekno-

logi *bioleaching* dengan bakteri *T. ferrooxidans*. Valenzulaa *et al.* (2006) melaporkan bahwa sejak diterapkan teknik *biomining* di Chili (negara penghasil tembaga kelas atas dunia) produksi tembaga meningkat 400.000 ton per tahun.

Bakteri BOS membentuk lapisan biofilm yang melapisi permukaan mineral yang mengandung tembaga. Oksidasi yang dilakukan oleh bakteri terhadap mineral akan menghasilkan ferrosulfat dan "oksidan". Oksidan akan bereaksi dengan mineral-mineral tembaga-sulfida seperti kalkopirit ($CuFeS_2$), kalkosit (Cu_2S), kovelit (CuS), dan bornit (Cu_5FeS_4), dengan melepaskan larutan $CuSO_4$ (www.personals.psu.edu). Tembaga selanjutnya dapat dipisahkan melalui proses elektrolisis. Penelitian lain menunjukkan bahwa *T. ferrooxidans* dan *L. ferrooxidans* dilaporkan sebagai organisme yang paling signifikan dalam proses oksidasi mineral-mineral sulfidik.

Beberapa kelompok mikroba ditemukan bekerja pada suhu yang berbeda-beda sehingga dapat dimanfaatkan untuk *biomining* pada mineral yang berada pada kedalaman lapisan tanah yang berbeda. Pada oksidasi mineral yang dioperasikan pada kisaran suhu $40^\circ C$, mikroba yang paling efektif adalah campuran kelompok (konsorsium) dari BOS gram negatif, yang terdiri atas *Acidithiobacillus ferro-*



Gambar (Figure) 1. Bakteri *T. ferrooxidans* yang diisolasi pada media 9-K (A); bentuk koloni pada media agar miring (B). (*T. ferrooxidans* isolated on 9K-medium (A), colony formation on 9K-slant agar medium). Foto (Photo): Enny, 2008

oxidans (dahulu *Thiobacillus ferrooxidans*) (Gambar 1), *At. thiooxidans* (dahulu *T. thiooxidans*), dan *At. caldus* (dahulu *T. caldus*), dan bakteri pengoksidasi besi *Leptospirillum ferrooxidans* serta *L. ferriphilum* (Rawlings, 2004).

Bakteri yang aktif pada suhu 50°C terdiri atas campuran kelompok (konsorsium) *At. caldus*, beberapa *Leptospirillum* spp., bakteri gram-positif dari genera *Sulfolobus* dan *Acidimicrobium*, serta archaea dari genus *Ferroplasma* (Rawlings, 2004).

Pada *bioleaching* yang dioperasikan pada suhu >65°C, konsorsium lebih didominasi oleh archaea dibandingkan oleh bakteri. Spesies bakteri yang banyak ditemukan adalah *Sulfolobus* dan *Metallosphaera* sedangkan archaea terdiri atas genus *Acidianus* misalnya *Ad. ambivalens* atau *Ad. infernus* yang juga mampu tumbuh pada suhu sangat tinggi (90°C) (Rawlings, 2004). Mikroba yang ekstrim termofil yang dapat dipekerjakan pada proses *biomining* terutama anggota dari genus *Sulfolobus*, *Acidianus*, *Metallosphaera*, dan *Sulfurisphaera* (Valenzulaa *et al.*, 2006).

B. Sebagai Agen Bioremediasi Logam-logam

Sebagai penghuni tanah kehidupan mikroba selalu dipengaruhi secara langsung oleh perubahan-perubahan yang terjadi di dalam tanah. Pada lahan bekas tambang perubahan tanah (fisik, kimia, dan biologi) terjadi secara drastis, sehingga di dalam ekosistem tersebut mikroba harus beradaptasi dengan lingkungan yang baru, atau punah. Menurut Figuera *et al.* (2005) salah satu mekanisme adaptasi adalah mengubah ekspresi gen sehingga aktivitas enzim dan protein memungkinkan mereka untuk meneruskan hidup di lingkungan tersebut. Beberapa mekanisme mikroba beradaptasi pada tanah bekas tambang yang tercemar logam-logam antara lain mikroba mampu menggunakan logam sebagai sumber energi, memprespitasikan logam dalam bentuk

garam-logam yang tidak larut, mengimobilisasi logam dalam dinding sel, memproduksi agen pengkelat, mengubah permeabilitas membran sel mikroba terhadap logam, dan mereduksi logam menjadi bentuk yang tidak toksik (Figuera *et al.*, 2005). Kemampuan mikroba inilah yang dapat digunakan dalam proses detoksifikasi logam yang dikenal dengan istilah bioremediasi.

Bioremediasi adalah suatu proses pemulihan polutan dengan memanfaatkan jasa makhluk hidup seperti mikroba (bakteri, fungi, khamir), tumbuhan hijau atau enzim yang dihasilkan dalam proses metabolisme mereka (disarikan dari berbagai sumber). Bagi mikroba tertentu, polutan dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi untuk pertumbuhan mereka (Alexander, 1977).

Pada tanah bekas tambang dijumpai logam-logam yang awalnya berada dalam kondisi reduktif yang berikatan dengan sulfida membentuk mineral yang kompleks. Namun demikian logam-logam tersebut menjadi tersedia karena teroksidasi akibat bereaksi dengan udara dan atau air. Logam-logam Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, dan lain-lain banyak dijumpai pada lahan bekas tambang. Di samping itu, pada pertambangan yang memerlukan pemurnian bijih banyak dijumpai logam-logam berat seperti arsen (As), merkuri (Hg) atau bahan berbahaya lainnya misalnya sianida (CN). Salah satu spesies mikroba yang terbukti mampu melakukan bioremediasi sianida adalah *Pseudomonas pseudoalcaligenes* (Brierley and Brierley, 1999 dalam Santosa, 2004), yang dapat menurunkan ketersediaan CN pada kolam *tailing* sampai 90% dalam waktu 2-3 hari pada pH 10,5.

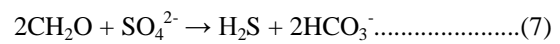
Untuk mendegradasikan merkuri (Hg) beberapa mikroba dikenal mempunyai enzim merkuri reduktase misalnya *Pseudomonas putida*, *Geobacter metallireducens*, *Shewanella putrefaciens*, *Desulfovibrio desulfuricans*, dan *D. vulgaris*. Kedua spesies terakhir adalah kelompok bakteri pereduksi sulfat (BPS). Peneliti-

an yang dilakukan oleh Lovley (1995) dalam Widyati (2006) menunjukkan bahwa remediasi merkuri dengan mikroba jauh lebih baik daripada secara kimia karena metode secara kimia selain lebih mahal juga masih menghasilkan timbunan lumpur yang mengandung Hg.

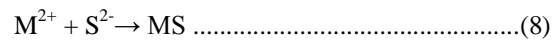
Akar permasalahan pada lahan bekas tambang terbuka (misalnya pada lahan bekas tambang batubara) telah diidentifikasi oleh Widyati (2006), yaitu sangat rendahnya pH akibat akumulasi sulfat pada lahan tersebut yang berakibat pada meningkatnya kelarutan logam-logam. Oleh karena itu kegiatan rehabilitasi pada lahan-lahan yang demikian harus dimulai dengan penurunan konsentrasi sulfat dan pencegahan oksidasi mineral sulfida lebih lanjut. Kelompok bakteri pereduksi sulfat (BPS) dapat dimanfaatkan untuk mereduksi sulfat. Hasil penelitian Widyati (2006) menunjukkan bahwa BPS dapat digunakan untuk mereduksi sulfat pada tanah bekas tambang batubara dengan efisiensi 80% dalam waktu 10 hari. Di samping itu, inokulum BPS (Gambar 2) dengan dosis inokulum 25% dari total volume tanah tersebut dapat menurunkan ketersediaan Fe, Mn, Zn, dan Cu dengan efisiensi mencapai 90% dengan waktu inkubasi 15 hari. Aplikasi pada air asam tambang (AAT) yang dilakukan oleh

Widyati *et al.* (2008) (Gambar 2) menunjukkan bahwa penambahan inokulum BPS 1% dari volume AAT dapat meningkatkan pH menjadi netral hanya dalam waktu beberapa jam setelah aplikasi. Untuk menurunkan kandungan logam-logam dosis yang efektif adalah 10% dengan waktu inkubasi 2-4 hari.

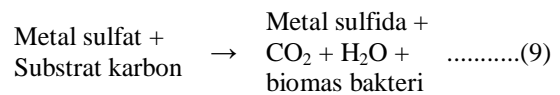
Inokulum BPS yang digunakan merupakan isolat yang dibiakkan pada media kompos. Meningkatnya pH terjadi karena BPS menggunakan sulfat sebagai aseptor elektron dan karbon (C) dari kompos sebagai donor elektron dengan menghasilkan hidrogen sulfida (reaksi 7).



Hidrogen sulfida akan segera berikatan dengan logam membentuk logam sulfida yang tidak larut sehingga ketersediaan logam turun (reaksi 8).



di mana M mewakili logam-logam valensi 2 (divalen) seperti Cu^{2+} , Zn^{2+} , dan lain-lain. Keseluruhan reaksi reduksi sulfat dan logam yang melibatkan BPS dapat diringkas menjadi (reaksi 9) (Groudev *et al.*, 2001 dalam Widyati, 2006).



Gambar (Figure) 2. Ujicoba aplikasi inokulum BPS untuk menangani AAT di rumah kaca (kiri) dan di lapangan (kanan) (*Greenhouse trial of SRB inoculum (left) and field (right) to deal with acid mine drainage (AMD)*)

C. Sebagai Pemacu Tanaman Melakukan Proses Fitoremediasi

Fitoremediasi merupakan istilah yang dikhususkan pada proses bioremediasi yang dilakukan oleh tumbuhan. Salah satu mekanisme tanaman dalam melakukan fitoremediasi adalah memfasilitasi aktivitas mikroba dalam tanah melalui pembentukan asosiasi sehingga hal ini dikenal dengan istilah fitostimulasi. Untuk mengoptimalkan proses fitoremediasi, tumbuhan menstimulasi aktivitas mikroba tanah dalam mendegradasikan logam-logam. Untuk menarik mikroba supaya mendekati akar dan berasosiasi dengan tumbuhan maka akar mengeluarkan eksudat akar yang umumnya berupa protein, asam-asam organik atau senyawa lain yang diperlukan oleh mikroba (Metting, 1996). Mikroba akan bergerak mendekati akar dan ini dikenal dengan istilah kemotaksis. Contohnya adalah tanaman legum yang mengeluarkan flavonoid yang dapat merangsang terjadinya asosiasi antara tanaman legum dengan bakteri rhizobium. Beberapa genus rhizobium didapatkan mempunyai peranan dalam proses bioremediasi logam pada lahan-lahan yang tercemar karena mereka mempunyai enzim metalothionin (Khan, 2000 dalam Widyati, 2006).

Contoh lain adalah asosiasi tanaman dengan jamur pembentuk mikoriza terutama fungi mikoriza arbuskula (FMA). Menurut Davies *et al.* (2001), dalam membantu tanaman inangnya yang hidup pada lahan-lahan yang mempunyai kandungan logam berat tinggi CMA mensekresikan senyawa pengkelat logam berat (misalnya asam organik dan siderofor) ke dalam rizosfir atau menghasilkan enzim metal-reduktase sehingga dapat mengimobilisasi logam. Sedangkan menurut Joner and Leyval (1997), hifa ekstraradikal FMA dapat menyerap logam berat lebih banyak akan tetapi logam diimobilisasi sehingga tidak dapat diserap oleh tanaman inangnya. Hasil penelitian Gonzalez-Chavez *et al.* (2002) menunjukkan

bahwa hifa ekstraradikal dari *Glomus caledonicum*, *G. mossae*, dan *G. claroideum* dapat menyerap dan mengakumulasi Cu pada bagian *mucilaginous* daerah dinding sel luar hifa, pada dinding sel hifa atau dalam sitoplasma. Dengan demikian tanaman tidak akan menyerap logam-logam berat dalam jumlah yang melebihi ambang batas toleransi tanaman.

Penelitian yang dilakukan oleh Toler *et al.* (2005) menunjukkan bahwa FMA yang diisolasi dari lahan yang tercemar Cu dan Zn mempunyai mekanisme yang berbeda dalam melindungi tanaman inangnya dari keracunan, penyerapan logam ke dalam hifa, dan perpindahan ke jaringan pucuk tanaman. FMA yang diisolasi dari lahan terpolusi meningkatkan serapan (*uptake*) Cu tetapi tidak menyebabkan keracunan tanaman inang. Di lain sisi, FMA yang diisolasi dari lahan tidak terpolusi akan mencegah tanaman menyerap Cu dalam jumlah yang melebihi ambang toleransi tanaman inangnya. Hasil penelitian Widyati (2006) menunjukkan bahwa tanaman *Acacia crassicaarpa* yang ditanam pada lahan bekas tambang batubara, kemampuan mengakumulasi Mn, Zn, dan Cu meningkat secara signifikan setelah diinokulasi dengan konsorsium *Rhizobium sp.*, *Glomus sp.* 6, dan bakteri pelarut fosfat *Bacillus sp.* yang juga diisolasi dari lahan bekas tambang batubara.

Dengan demikian, peranan mikroba tanah dalam membantu proses fitoremediasi adalah menyediakan lingkungan yang optimal sehingga bibit dapat tumbuh dan memainkan perannya secara optimal atau membantu peningkatan penyerapan logam tanpa tanaman menderita keracunan. Hal ini akan mempercepat penghilangan (*removal*) logam-logam dari lingkungan tersebut sehingga kualitas lingkungan akan menjadi lebih baik. Secara ringkas peranan mikroba tanah pada lahan bekas pertambangan diringkas pada Tabel 1.

Tabel (Table) 1. Peranan mikroba tanah pada rehabilitasi lahan bekas tambang (*Roles of soil microbes in ex-mining land rehabilitation*)

No.	Jenis mikroba (<i>Species of microbes</i>)	Peranan (<i>Roles</i>)	Dampak ekonomi (<i>Economic impact</i>)	Dampak ekologi (<i>Ecological impact</i>)
1.	<i>Thiobacillus ferrooxidans</i> ^{*,**}	AMD & <i>biominer</i>	<i>Recovery</i> logam naik	Lahan masam
2.	<i>T. thiooxidans</i> ^{*,**}	AMD & <i>biominer</i>	<i>Recovery</i> logam naik	Lahan masam
3.	<i>Leptospirillum</i> spp. ^{*,**}	AMD	Korosif besi & beton	Lahan masam
4.	<i>Ferroplasma acidarmanus</i> ^{*,**}	AMD	Korosif besi & beton	Lahan masam
5.	<i>Acidimicrobium</i> sp. ^{**}	<i>Biominer</i>	<i>Recovery</i> logam naik	Lahan masam
6.	<i>Ferromicrobium</i> sp. ^{**}	<i>Biominer</i>	<i>Recovery</i> logam naik	Lahan masam
7.	<i>Sulfobacillus</i> sp. ^{**}	<i>Biominer</i>	<i>Recovery</i> logam naik	Lahan masam
8.	<i>Sulfolobus</i> sp. ^{**}	<i>Biominer</i>	<i>Recovery</i> logam naik	Lahan masam
9.	<i>Acidianus</i> sp. ^{**}	<i>Biominer</i>	<i>Recovery</i> logam naik	Lahan masam
10.	<i>Metallosphaera</i> sp. ^{**}	<i>Biominer</i>	<i>Recovery</i> logam naik	Lahan masam
11.	<i>Sulfurisphaera</i> sp. ^{**}	<i>Biominer</i>	<i>Recovery</i> logam naik	Lahan masam
12.	<i>Pseudomonas putida</i> [§]	Bioremediasi sianida	Detoksifikasi murah	Akumulasi turun
13.	<i>P. pseudoalcaligenes</i> [§]	Bioremediasi merkuri	Detoksifikasi murah	Akumulasi turun
14.	<i>Geobacter metalireducens</i> [§]	Bioremediasi merkuri	Detoksifikasi murah	Akumulasi turun
15.	<i>Shewanella putrefaciens</i> [§]	Bioremediasi merkuri	Detoksifikasi murah	Akumulasi turun
16.	<i>Desulfovibrio vulgaris</i> [§]	Bioremediasi merkuri	Detoksifikasi murah	Akumulasi turun
17.	<i>D. desulfuricans</i> [§]	Bioremediasi merkuri	Detoksifikasi murah	Akumulasi turun
18.	<i>Desulfovibrio</i> spp. ^{&}	Bior. Fe, Mn, Zn, Cu	Detoksifikasi murah	AMD netral
19.	<i>Carnobacterium</i> spp. ^{&}	Bioremediasi Mn	Detoksifikasi murah	AMD netral
20.	<i>Glomus mosae</i> [#]	20-22 Membantu	20-25 Pemeliharaan	20-25 Meningkatkan
21.	<i>G. caledonicum</i> [#]	tanaman mengkelat	tanaman menjadi	keberhasilan
22.	<i>G. claroideum</i> [#]	Cu	lebih murah	revegetasi lahan
23.	<i>Rhizobium</i> sp. ^{@,^}	23-25 Membantu		
24.	<i>Bacillus</i> sp. [^]	tanaman mengkelat		
25.	<i>Glomus</i> sp. [^]	Mn, Zn, dan Cu		

Keterangan (*Remarks*):

*: Brierly & Brierly, 1999 dalam Santosa, 2004; **: Rawlings, 2004; §: Semple, 2003; &: Widyati *et al.*, 2008; #: Gonzalez-Chaves, 2002; @: Khan, 2000 dalam Widyati, 2006; ^: Widyati, 2006

III. PENGELOLAAN LINGKUNGAN UNTUK MENGOPTIMALKAN PERANAN MIKROBA PADA LAHAN BEKAS TAMBANG

Sesungguhnya apabila lingkungan memadai maka proses bioremediasi dapat berlangsung dengan sendirinya di alam (*intrinsic bioremediation*) (Semple, 2003), karena lingkungan mempunyai kemampuan untuk memulihkan dirinya sendiri, yang dikenal sebagai daya lenting. Namun pada lahan bekas tambang yang telah mengalami tingkat degradasi yang tinggi, kecepatan untuk memulihkan diri jauh lebih lambat dari kecepatan akumulasi logam, maka campur tangan manusia diperlukan supaya lingkungan mampu mendukung berlangsungnya proses bioremediasi. Proses bioremediasi yang melibatkan upaya manusia disebut *engineered*

bioremediation (Anas, 1997). *Engineered bioremediation* dapat dilakukan melalui dua cara, *nutrient amendment* dan *bioaugmentation*, yaitu perbaikan unsur hara supaya cukup dan seimbang (*sufficient and ballance*) dan pemberian inokulum mikroba fungsional dengan jenis dan jumlah yang memadai untuk berlangsungnya suatu proses bioremediasi.

Nutrient amendment perlu dilakukan untuk memperbaiki ketersediaan unsur-unsur hara. Seperti halnya organisme lain yang lebih tinggi, mikroba juga memerlukan unsur-unsur hara makro dan mikro untuk pertumbuhannya. Ketersediaan unsur hara sangat diperlukan oleh mikroba untuk menyusun sel-sel tubuhnya, sebagai aktivator enzim dan sebagai asektor elektron dalam proses respirasi.

Karena aplikasi bioremediasi di lapangan sangat tergantung pada sifat fisik

dan kimia lingkungan maka faktor-faktor kebutuhan oksigen atau sumber energi, pH, ketersediaan sumber karbon, kadar air, dan suhu lingkungan harus diperhatikan sebab faktor-faktor tersebut akan mempengaruhi aktivitas mikroba yang dipekerjakan. Masing-masing mikroba memerlukan kebutuhan lingkungan yang spesifik.

Dengan perbaikan-perbaikan faktor lingkungan pada lahan bekas tambang diharapkan lahan tersebut cocok untuk mendukung pertumbuhan mikroba yang mampu melakukan proses bioremediasi sehingga pada lahan tersebut akan terjadi suksesi kolonisasi oleh mikroba. Namun demikian, apabila perbaikan lingkungan sudah dilakukan tetapi proses bioremediasi tidak terjadi maka perlu dilakukan inokulasi mikroba yang diperlukan (bioaugmentasi).

IV. PROSPEK PENELITIAN KE DEPAN

Lahan bekas tambang di Indonesia cukup luas (>1,3 juta ha) dan terdiri atas berbagai macam bahan galian sehingga terbuka peluang untuk melakukan penelitian bioremediasi maupun fitoremediasi. Inovasi perlu dilakukan untuk menemukan jenis-jenis mikroba yang efektif, baik dalam meningkatkan *recovery* logam-logam komersial, menurunkan toksisitas logam-logam berbahaya serta membantu pertumbuhan bibit revegetasi yang mempunyai kemampuan fitoremediasi. Dengan bantuan mikroba yang kompatibel dan efektif maka kondisi tanah pada lahan bekas tambang dapat mendukung pertumbuhan bibit revegetasi dengan hasil yang memuaskan. Pada akhirnya restorasi kembali lahan bekas tambang menjadi ekosistem hutan akan lebih mudah dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

Alexander, M. 1977. Introduction to Soil Microbiology. John Willey and Son. New York.

- Anas, I. 1997. Polusi dan Bioremediasi Tanah. Diktat Kuliah Bioteknologi Tanah. Fakultas Pascasarjana IPB. Bogor. (Tidak diterbitkan).
- Bacelar-Nicolau, P. and D.B. Johnson. 1999. Leaching of Pyrite by Acidophilic Heterotrophic Iron-Oxidizing Bacteria in Pure and Mixed Cultures. Applied and Environmental Microbiology 65(2): 585-590.
- Bond, P.L., G.K. Druschel, and J.F. Banfield. 2000. Comparison of Acid Mine Drainage Microbial Communities in Physically and Geochemically Distinct Ecosystems. Applied and Environmental Microbiology 66 (11): 4962-4971.
- Davis, M.A., J.F. Murphy and R.S. Boyd. 2001. Nickel Increases Susceptibility of a Nickel Hyper-accumulator to Turnip Mozaic Virus. J. Env. Qual. 30: 85-90.
- Figuera, E.M.A.P., A.I.G. Lima and S.I.A. Pereira. 2005. Cadmium Tolerance Plasticity in *Rhizobium leguminosarum* bv. Viciae: Glutathione as a Detoxifying Agent. Can. J. Microbiol. 51: 7-14.
- Gonzalez-Chavez, C., J.D. Haen, J. Vangronsveld and J.C. Dodd. 2002. Copper Sorption and Accumulation by the Extraradical Mycelium of Different *Glomus* spp. Isolated from the Same Polluted Soil. Journal of Plants and Soil 240(2): 287-297.
- Joner, E.J. and C. Leyval. 1997. Uptake of ¹⁰⁹Cd by Roots and Hyphae of *Glomus mossae* and *Trifolium subterraneum* Mycorrhiza from Soil Amended with High and Low Concentration of Cadmium. New Phytol. 135: 105-113.
- Khan, A.G., C. Kuek, T.M. Chaudry, C.S. Khoo and W.J. Hayes. 2000. Role of Plants, Mycorrhizae and Phytochelators in Heavy Metal Contaminated Land Remediation. Chemosphere 21: 197-207.
- Metting, B. 1996. Soil Microbial Ecology. Marcel and Dekker. New York.

- Mills, C. 2004. The Role of Microorganisms in Acid Rock Drainage. [www. technology.infomine.com/environment/ard/Microorganism/ro](http://www.technology.infomine.com/environment/ard/Microorganism/ro). [2 Januari 2006].
- Rawlings, D.E. 2004. Microbially Assisted Dissolution of Minerals and Its Use in the Mining Industry. *Pure Appl. Chem.* 76(4): 847-859.
- Santosa, D.A. 2004. Peranan Mikroba di Industri Pertambangan. Bahan Kuliah Mata Kuliah Bioteknologi Lingkungan. Sekolah Pascasarjana IPB. Bogor. (Tidak diterbitkan).
- Schippers, A. and W. Sands. 1999. Microbial Metal Extraction. *Appl. Environ. Microbiol.* 65: 319-321.
- Semple, K.T. 2003. Environmental Microbiology. Lecture Note. Tersedia di Internet. Dikunjungi 14 Juni 2004.
- Toler, H.D., J.B. Morton and J.R. Cumming. 2005. Growth and Metal Accumulation of Mycorrhizal Shor-gum Exposed to Elevated Copper and Zinc. *Journal of Water, Air and Soil Pollution* 164(1): 155-172.
- Valenzulaa, L., A. Chib, S. Bearda, A. Orella, N. Guiliania, J. Shabanowitzb, D.F. Huntb and C.A. Jereza. 2006. Genomics, Metagenomics and Proteomics in Biomining Microorganisms. *Biotechnology Advances* 24:197-211.
- Widyati, E. 2006. Bioremediasi Tanah Bekas Tambang Batubara dengan *Sludge* Industri Kertas Untuk Memacu Revegetasi Lahan. Disertasi. Program Pendidikan Doktor IPB. Bogor.
- Widyati, E., F. Hazra dan I. Devita. 2008. Bioremediasi Air Asam Tambang dengan Bakteri Pereduksi Sulfat. (Tidak Diterbitkan). www.personals.psu.edu/biofilm/bioleaching.html. Leaching of Copper Ore with *Thiobacillus ferrooxidans*. Dikunjungi 11 Desember 2003.