

KAJIAN FITOREMEDIASI SEBAGAI SALAH SATU UPAYA MENURUNKAN AKUMULASI LOGAM AKIBAT AIR ASAM TAMBANG PADA LAHAN BEKAS TAMBANG BATUBARA

Phytoremediation, an Alternative to deal with Metal Accumulation due to Acid Mine Drainage on Ex-Coal Mining site: a Review

Eddy Widyati

Pusat Litbang Hutan dan Konservasi Alam
Jl. Gunung Batu No. 5 Bogor 16610, Telp. (0251) 8633234, 7520067 Fax. (0251) 8633111

Naskah masuk : 27 Mei 2009 ; Naskah diterima : 11 Juni 2009

ABSTRACT

Forests play important roles in keeping the equilibrium of life. Unfortunately, people activities often give disadvantages to the forests. Mining activities, for instance, bring contradictive points, prosperity and environmental risk. Income from coal and mineral extraction increases national affluence. On the other hand, this activity decreases or totally removes forests. Coal mining as opened pit mining removes all layers above the coal deposit. The elimination encourages oxidation of sulfur mineral to release sulfate that generating soil and water acidity. This phenomenon is called acid mine drainage (AMD). The most critical problem caused by AMD is metal accumulation both in water and soil. These are vulnerable both for land rehabilitation and human health near mining location that strongly depend on water supply from rivers. Phytoremediation that uses plantation can be adopted to solve the problem. This method is categorized as inexpensive, harmless, and applicable than the traditional method using chemical. Phytoremediation can enhance aesthetic, due to some ornamental plants and has capability to treat pollutant. It is suggested that phytoremediation which has a good prospect to be further developed to reduce metal accumulation in ex-mining site.

Key words: *ex-mining site, metal accumulation, phytoremediation*

ABSTRAK

Hutan mempunyai peranan yang sangat penting dalam mengatur keseimbangan kehidupan di bumi. Namun demikian seringkali aktivitas manusia dapat mengancam keberadaan hutan tersebut. Salah satu contoh, kegiatan penambangan memberikan pengaruh yang berlawanan, yaitu sumber kemakmuran dan kerusakan lingkungan. Pendapatan negara dari sektor penambangan batubara dan mineral meningkatkan ekonomi nasional. Tetapi sektor tersebut telah menurunkan luasan bahkan menghilangkan hutan. Penambangan batubara yang umumnya menggunakan penambangan terbuka menyingkirkan seluruh lapisan tanah yang berada di atas cadangan bahan galian tersebut. Aktivitas ini akan mendorong terjadinya oksidasi mineral sulfidik, melepaskan asam sulfat yang akan menurunkan pH secara drastis. Peristiwa ini dikenal dengan air asam tambang (*acid mine drainage/AMD*). Akibat yang paling berbahaya dari air asam tambang adalah tingginya akumulasi logam-logam pada tanah dan air. Hal ini selain akan memperberat pekerjaan rehabilitasi lahan juga dapat membahayakan kesehatan masyarakat, karena pada umumnya masyarakat yang tinggal di dekat lokasi pertambangan memanfaatkan air sungai yang mengalir melalui lahan pertambangan tersebut. Fitoremediasi dengan menggunakan aktivitas tanaman merupakan salah satu teknologi yang dapat diterapkan untuk menangani akumulasi logam-logam tersebut. Metode ini lebih murah, ramah lingkungan dan mudah

dilakukan daripada metode dengan bahan kimia. Disamping itu, fitoremediasi akan memperbaiki lingkungan karena beberapa tanaman hias mempunyai kemampuan fitoremediasi. Dengan demikian fitoremediasi mempunyai prospek yang baik untuk dikembangkan dalam mengatasi polusi logam pada lahan bekas tambang.

Kata kunci: akumulasi logam, fitoremediasi, lahan bekas tambang batubara

I. PENDAHULUAN

Salah satu fungsi hutan adalah sebagai pengatur tata air. Melalui mekanisme penyaringan oleh partikel tanah di bawah tegakan hutan, kualitas air yang muncul di sekitar hutan menjadi jernih. Disamping itu, hutan juga dapat mengatur kuantitas air, sehingga air tidak meluap/banjir ketika musim penghujan dan air tetap tersedia ketika musim kemarau.

Aktivitas manusia sering kali dapat mengganggu fungsi hutan. Salah satu kegiatan manusia yang paling berat dampaknya terhadap hutan adalah kegiatan di sektor pertambangan. Sektor ini memberikan dua dampak penting terhadap kerusakan hutan, yaitu menghilangkan keberadaan hutan (penambangan terbuka) dan limbahnya (*tailing*) mencemari lingkungan (penambangan terbuka dan tertutup).

Penambangan terbuka (*opened pit mining*) merupakan sistem penambangan yang umum diaplikasikan pada kegiatan esktraksi batubara di Indonesia. Hal ini karena cadangan batubara di Indonesia umumnya terletak dekat dengan permukaan tanah sehingga penambangan terbuka merupakan cara yang paling aman dan ekonomis. Namun demikian, sistem penambangan terbuka dilakukan dengan menyingkirkan seluruh lapisan tanah yang berada di atas deposit batubara. Akibatnya, hutan yang berada di atasnya dengan segala fungsinya juga ikut hilang.

Dampak penambangan terbuka yang paling serius adalah adanya fenomena air asam tambang sehingga upaya revegetasi lahan menghadapi banyak hambatan. Air asam tambang adalah oksidasi mineral bersulfur sehingga melepaskan sulfat ke lingkungan. Akibatnya pH tanah menjadi sangat rendah sehingga unsur hara makro menjadi tidak tersedia karena terikat oleh ion-ion logam. Sebaliknya unsur-unsur hara mikro yang umumnya terdiri atas logam-logam kelutannya menjadi sangat tinggi (Tan, 1993).

Beberapa jenis tumbuhan dapat beradaptasi dengan baik pada tanah-tanah yang tercemar logam. Mekanisme tanaman yang dapat tumbuh pada lahan yang demikian dibedakan menjadi adaptif atau toleran (Marchner, 1995), tergantung apakah mereka menahan supaya logam tersebut tidak diserap atau bahkan aktif mengumpulkan logam-logam tersebut dalam jaringan (Ross dan Koye, 1994). Tanaman dikategorikan toleran apabila mereka mampu tumbuh pada tanah dengan kandungan logam yang tinggi tanpa terganggu pertumbuhannya. Salah satu contoh jenis yang toleran adalah *Acacia crassicarpa* yang dapat tumbuh pada tanah bekas tambang batubara (Widyati, 2009). Sedangkan tanaman dikatakan adaptif apabila mereka secara aktif beradaptasi terhadap kandungan logam yang tinggi dalam tanah, misalnya bunga matahari (*Helianthus annuus*) (wikipedia, 2008), tumbuhan paku *Pteris vitata* (Rathinasabapathi *et al.*, 1999) atau *Thlaspi* spp. (wikipedia, 2008). Adaptasi yang dilakukan antara lain menahan logam pada akar atau mengumpulkan dan melokalisasi logam pada vakuola sel (Ross dan Koye, 1994).

Makalah ini mengulas kemungkinan penanganan air asam tambang melalui pemanfaatan kinerja tanaman untuk menurunkan akumulasi logam-logam pada lahan bekas tambang batubara.

II. MEKANISME TERJADINYA AIR ASAM PADA LAHAN BEKAS TAMBANG

Kegiatan penambangan selalu menyebabkan masalah lingkungan yang dapat merusak ekosistem dan kesehatan manusia. Pertambangan merusak eksistensi hutan dan formasi geologis (yang pembentukannya memerlukan waktu jutaan tahun), yang tentu saja juga merusak sistem hidrologis baik secara fisik maupun kimia, karena masalah yang paling serius dan berdampak luas akibat penambangan adalah selalu berkaitan dengan air.

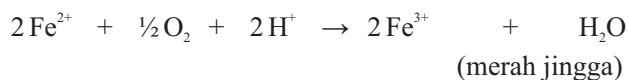
Curah hujan yang tinggi dan sisa bahan galian yang tersusun atas mineral sulfidik merupakan penyebab utama tingginya fenomena air asam tambang di Indonesia. Air asam tambang mengakibatkan air di sekitar lokasi penambangan tidak layak untuk mendukung kehidupan masyarakat sekitar. Air asam tambang ditandai dengan berubahnya warna air menjadi merah jingga karena ion ferro (Fe^{2+}) yang terdapat pada mineral pirit teroksidasi menjadi ferri (Fe^{3+}). Hasil pengukuran logam Fe, Mn, Zn dan Cu pada tanah bekas tambang batubara PT. Bukit Asam mempunyai nilai jauh di atas ambang batas yang diijinkan, sedangkan untuk air hanya Fe dan Mn yang melampaui ambang batas (Widyati dan Kresno, 2007). Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Neculita *et al.* (2006) bahwa air asam tambang ditandai dengan pH yang sangat rendah, konsentrasi sulfat tinggi dan terjadi akumulasi logam-logam berat.

Secara fisik, aktivitas penyingkiran lapisan tanah di atas batubara sekaligus mengusir kantong-kantong aliran air seperti sungai dan mata air di lokasi tersebut. Secara kimia, formasi batuan tempat terbentuknya batubara di Indonesia umumnya tersusun atas mineral sulfidik (PT. Bukit Asam, komunikasi pribadi). Mineral yang tersisa (baik *over burden* maupun sisa galian) ketika bersinggungan dengan udara dan atau air akan cepat teroksidasi menghasilkan asam sulfat. Karena asam sulfat merupakan asam yang sangat kuat, maka pH tanah dan air akan mengalami penurunan secara drastis. Hasil pengukuran pada tanah bekas tambang batubara PT. Bukit Asam mempunyai pH 2,8 - 3,2; sedangkan air mempunyai pH 1,6 - 5,2 (Widyati dan Kresno, 2007).

Menurut Costelo (2003) terjadinya air asam tambang diawali dari oksidasi pirit seperti digambarkan pada reaksi berikut ini:



Selanjutnya ion ferro sangat mudah teroksidasi menjadi ferri yang memberi warna merah pada air (Gambar 1), reaksinya digambarkan sebagai berikut:



Dari reaksi tersebut terlihat bahwa logam (Fe) akan terakumulasi baik pada tanah maupun air. Disamping Fe juga dijumpai logam-logam lain seperti Mn, Zn, Cu, Ni, Pb, Cd, dan lain-lain. Hal ini karena mineral umum yang terdapat pada lahan bekas tambang batubara selain pirit (FeS) antara lain spalerit (ZnS), galena (PbS), milerit (NiS), grinokit (CdS), covelit (CuS), kalkopirit (CuFeS), dan lain-lain (Costelo, 2003).

Akibat air asam tambang inilah yang mengakibatkan lahan bekas tambang batubara memerlukan penanganan yang serius terutama untuk memperbaiki tingkat kemasaman dan menurunkan akumulasi logam-logam. Beberapa teknik telah diterapkan baik yang berbasis ilmu fisika, kimia maupun biologi. Penanganan yang berbasis ilmu fisiko-kimia yang banyak diterapkan adalah melalui pemadatan atau pelapisan material sisa penambangan sehingga terhindar kontak dengan oksigen dan atau air. Hasil pemantauan di PT. Bukit Asam, lahan bekas tambang setelah diratakan selanjutnya dilapisi dengan material yang disebut "*blue clay*" setebal 1 - 2 meter. Hal ini mengakibatkan kepadatan tanah menjadi sangat tinggi dan memerlukan biaya ratusan juta rupiah untuk melapisi tiap hektar lahan.

Cara yang didasarkan pada kejadian kimia adalah dengan menggunakan kapur. Namun demikian cara ini memerlukan jumlah kapur yang sangat tinggi untuk menaikkan pH menjadi netral. Cara-cara biologi belum banyak dikembangkan di Indonesia. Mikroba dan tumbuhan tertentu dapat dimanfaatkan untuk keperluan ini, karena mereka menghasilkan enzim dan bahan organik yang dapat mereduksi sulfat dan menurunkan ketersediaan logam-logam di tanah dan air. Kelangkaan bahan organik pada lahan bekas tambang batubara dapat memacu pertumbuhan bakteri pengoksidasi sulfur yang berperan sebagai biokatalisator air asam tambang. Adanya bahan organik akan menghambat pertumbuhan bakteri tersebut sehingga dapat menurunkan laju air asam tambang.



(Foto: Widyati, 2006)



(Foto: Costello, 2003)

Gambar (Figure) 1. Air asam tambang pada tanah buangan (kiri) dan pada genangan air (kanan) (*acid mine drainage at an overburden pile (left) and at a water pool (right)*)

III. FITOREMEDIASI, PENANGANAN PENCEMARAN LINGKUNGAN BERBASIS TANAMAN

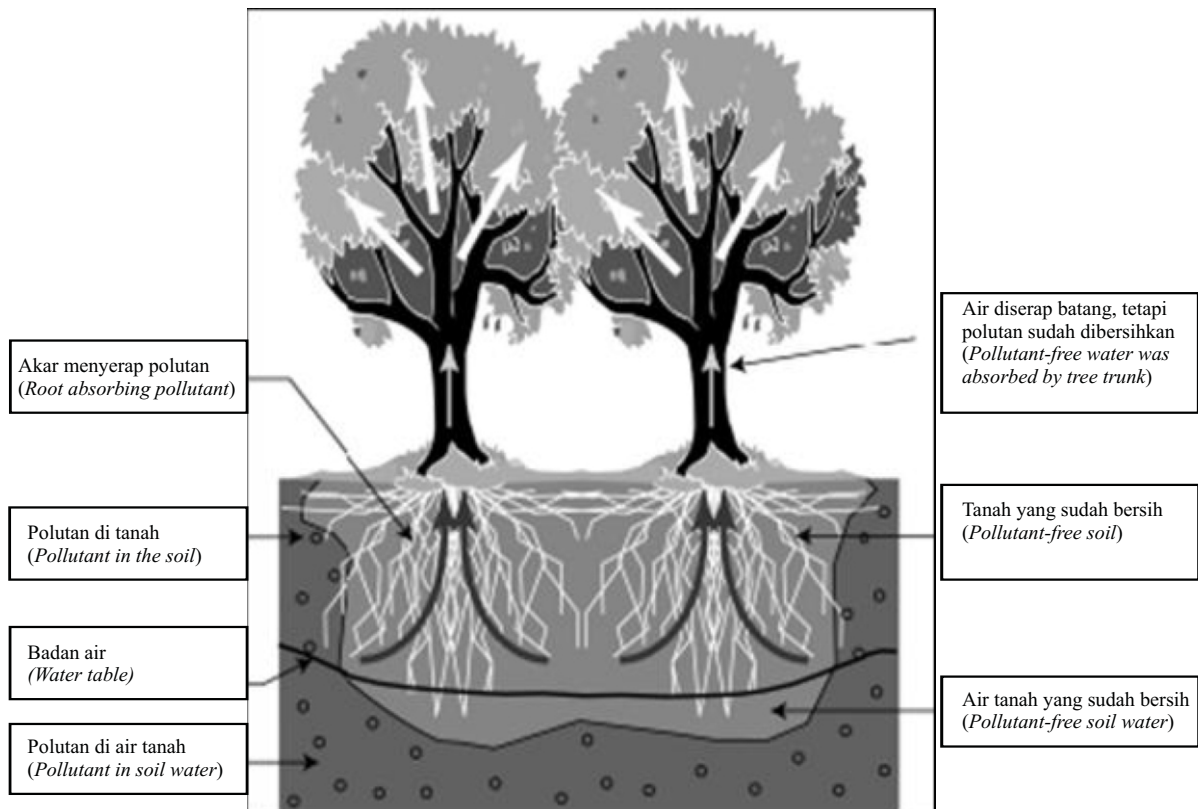
Secara ringkas fitoremediasi dapat didefinisikan sebagai suatu proses untuk menurunkan (dosis atau tingkat), mengeliminasi atau membersihkan tanah, air atau udara dari polutan atau kontaminan dengan memanfaatkan jasa tanaman (Wikipedia, 2000). Di alam, tanaman bukan merupakan agen independen yang bisa hidup dan memainkan perannya tanpa bantuan Pihak lain. Oleh karena itu Wong (2003) mendefinisikan fitoremediasi sebagai suatu kesatuan proses yang melibatkan tumbuhan hijau dan mikroba yang berasosiasi dengan mereka, teknik ameliorasi tanah, teknik agronomi untuk membuang, mengambil, atau mengurangi bahaya kontaminan di alam. Menurut EPA (2001), tanaman dapat membantu membersihkan berbagai macam polutan seperti logam-logam, pestisida, minyak maupun bahan peledak (*explosives*). Setelah tersimpan dalam tanaman, hal ini dapat mencegah perpindahan polutan dari suatu tempat ke tempat lain karena angin, hujan maupun air tanah (EPA, 2001). Jadi tanaman dapat melokalisasi polutan sehingga tidak menyebar ke areal yang lebih luas.

Menurut Wikipedia (2000) pada dasarnya terdapat 5 (lima) cara tanaman dalam memainkan perannya dalam proses fitoremediasi tanah terpolusi logam, yaitu rizofiltrasi, fitoekstraksi, fitotransformasi, fitostimulasi dan fitostabilisasi. Wikipedia (2000) selanjutnya menjabarkan rizofiltrasi adalah tanaman menyerap logam dan ditahan di akar serta dicegah supaya tidak berpindah ke biomas atas. Mekanisme ini selain dapat mencegah tanaman keracunan logam-logam sekaligus dapat menghindarkan perpindahan logam ke tempat yang lebih luas. Di samping itu, mekanisme ini juga dapat mencegah akumulasi logam ke dalam rantai makanan karena tanaman yang dimakan oleh herbivora tidak mengandung bahan pencemar (logam). Rizofiltrasi oleh tanaman dapat diringkaskan melalui skema pada Gambar 2 (diadopsi dari www.epa.gov).

Fitotransformasi adalah mekanisme fitoremediasi di mana logam diinaktivasi, didegradasi atau diimmobilisasi oleh aktivitas metabolisme tanaman. Sedangkan fitostimulasi adalah fitoremediasi dengan cara tanaman menstimulasi aktivitas mikroba tanah untuk mendegradasi logam. Umumnya adalah mikroba yang berasosiasi dengan akar tanaman tersebut. Pada mekanisme ini tanaman mengeluarkan eksudat akar yang umumnya berupa protein, asam-asam organik atau senyawa lain yang diperlukan oleh tanaman. Contohnya tanaman legum mengeluarkan flavonoid yang dapat merangsang asosiasi tanaman 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 tanaman berasosiasi dengan mikoriza terutama fungi mikoriza arbuskula (FMA).

Menurut Davies *et al.* (2001), dalam membantu tanaman inangnya 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. Fitostimulasi sering juga disebut sebagai biodegradasi rizosfir. Sedangkan fitostabilisasi adalah tanaman menurunkan kemampuan mobilitas logam sehingga tidak menyebar ke tempat lain.

Fitoekstraksi merupakan mekanisme fitoremediasi dimana tanaman menyerap logam dan mengakumulaskannya ke dalam biomas tanaman. Tanaman yang mempunyai mekanisme fitoekstraksi seringkali disebut sebagai akumulator. Untuk tanaman yang mempunyai kemampuan mengakumulasi lebih dari 1.000 mg/kg biomas (Ni, Cu, Co, Cr atau Pb) atau lebih dari 10.000 mg/kg biomas untuk logam Zn atau Mn disebut sebagai hiperakumulator (Baker dan Brook, 1989). Tanaman bunga matahari (*Helianthus annuus*) selain dapat digunakan sebagai tanaman hias juga dapat mengakumulasi/menetralkan arsen dan uranium, salah satu jenis tumbuhan paku *Pteris vitata* dapat menetralkan Arsen (Tabel 1) (www.wikipedia.com). Sehingga pemanfaatan kedua jenis tumbuhan yang mempunyai bunga yang indah dan bentuk tanaman yang bagus ini dapat memberi fungsi dekorasi bagi lokasi fitoremediasi.



Gambar (Figure) 2. Skema mekanisme fitoremediasi rhizofiltrasi oleh tanaman (Scheme of rhizofiltration mechanisms in the plants root)

Tabel (Table) 1. Beberapa jenis tanaman yang dapat dimanfaatkan untuk mengakumulasi logam
(Some plants that can be used in metals accumulation)

Logam (Metal)	Nama Tumbuhan (Species)	Akumulasi/Accumulation (mg/kg biomass)	Sumber (Source)
Aluminium (Al)	<i>Hordeum vulgare</i>	1.000	www.frtr.gov
Arsen (As)	<i>Pteris vitata</i>	27.000	Rathinasabapathi <i>et al.</i> , 1999
	<i>H. annus</i>	Belum ada data/No data	Wikipedia, 2008
Chromium (Cr)	<i>Brassica matula</i>	700	www.frtr.gov
	<i>Hidrila verticillata</i>	600	www.frtr.gov
	<i>Eichornia crassipes</i>	1.000	www.frtr.gov
Tembaga/Copper (Cu)	<i>Azeolenthus biformifolius</i>	9.000	www.frtr.gov
Mangan (Mn)	<i>Macademia neurophylla</i>	1.000	www.frtr.gov
Merkuri/Mercury (Hg)	<i>Eichornia crassipes</i>	600	www.frtr.gov
Seng (Zn)	<i>Thlaspi caerulescens</i>	10.000	Wikipedia, 2008
Nikel/Nichel (Ni)	<i>Alyssum argenteum</i>	29.400	Davis <i>et al.</i> , 2001
	<i>Thlaspi sylvium</i>	31.000	Davis <i>et al.</i> , 2001
Cadmium (Cd)	<i>Thlaspi caerulescens</i>	13.000	Wikipedia, 2008
Uranium (U)	<i>H. annus</i>	Belum ada data/No data	Wikipedia, 2008
	<i>Nicotiana tabaccum</i>	Belum ada data/No data	Hannink <i>et al.</i> , 2001

Gen-gen yang mengendalikan fitoremediasi diduga berasal dari mikroba tanah kemudian menyisipi gen tumbuhan dan tumbuhan bermutasi menjadi fitoremediator (Hannink *et al.*, 2001), contohnya gen yang mengkode nitroreduktase yang mereduksi trinitro toluen (TNT) pada tembakau menyisip dari bakteri ke tanaman tersebut. Dengan demikian banyak kesempatan untuk menyisipkan gen-gen merkuri reduktase, arsenik reduktase, krom reduktase yang dimiliki oleh bakteri-bakteri *Desulfovibrio vulgaris* atau *Shewanella putrefaciens* untuk disisipkan ke dalam tanaman-tanaman kehutanan bagi para peneliti yang punya kemampuan di bidang tersebut. Apabila gen-gen tersebut dapat disisipkan pada jenis-jenis cepat tumbuh (*fast growing trees*) sehingga akan dihasilkan banyak serasah, maka AMD beserta akumulasi logam-logam yang menyertainya pada lahan bekas tambang batubara dapat dengan cepat ditangani.

IV. KEUNTUNGAN DAN KENDALA YANG DIHADAPI DALAM FITOREMEDIASI

Beberapa keuntungan aplikasi teknologi fitoremediasi antara lain lebih murah, lebih mudah dimonitor, logam yang terkumpul dalam tanaman dapat dipanen dan lebih aman dibandingkan dengan metode kimia (www.wikipedia.com).

Fitoremediasi lebih murah karena hanya memerlukan bahan bibit tanaman dan bahan-bahan untuk memperbaiki kualitas tanah. Menurut www.epa.gov, fitoremediasi tidak memerlukan fasilitas yang rumit dan tidak memerlukan banyak tenaga kerja sehingga dapat menekan biaya aplikasi. Selanjutnya dalam www.epa.gov dijelaskan bahwa efisiensi juga dapat dicapai karena fitoremediasi tidak memerlukan biaya pengangkutan polutan ke tempat lain (*in situ*) dan tidak perlu memompakan polutan dari dalam tanah. Disamping itu tanaman dapat digunakan selama satu daur sedangkan kalau menggunakan bahan kimia hanya dapat digunakan dalam jangka waktu yang pendek sampai seluruh bahan bereaksi dengan logam.

Keunggulan kedua adalah tanaman dapat dengan mudah dimonitor. Keadaan pertumbuhan tanaman dapat dengan mudah diketahui gejala keracunan yang di alami oleh tanaman atau mudah diketahui kapan tanaman harus dilakukan penggantian/pemanenan. Dalam hal ini tanaman dapat menjadi indikator proses yang terjadi di dalam tanah (rhizosfir) karena akan sangat sulit mengetahui reaksi yang terjadi akibat penambahan bahan kimia tanpa melalui pengukuran (analisis).

Logam yang dikumpulkan oleh tanaman dapat dipisahkan dari jaringan tanaman ketika tanaman sudah dipanen. Untuk logam-logam yang mempunyai nilai ekonomi tinggi seperti besi, timah, emas, perak dan lain-

lain yang tersisa pada lumpur *tailing* dapat dipanen dengan menggunakan tanaman sehingga dikenal sebagai "phyto-mining" (www.epa.gov). Dalam hal ini, penggunaan tanaman dapat memberikan nilai tambah.

Penggunaan tanaman lebih aman dibandingkan dengan penggunaan bahan kimia untuk menangani polutan, karena proses yang terjadi dengan melibatkan tanaman adalah proses alami. Disamping itu, penggunaan bahan kimia menghasilkan limbah sebab tidak ada proses reaksi kimia yang sempurna. Penggunaan tanaman juga menghindarkan kontak langsung antara pekerja dengan polutan sehingga dapat menghindarkan pekerja dari bahaya keracunan (www.epa.gov). Disamping hal-hal tersebut di atas, penggunaan tanaman dapat menambah keindahan lokasi penanganan polutan. Misalnya penggunaan tanaman bunga matahari (Gambar 3) akan memberikan nilai estetik yang lebih pada lahan-lahan tercemar yang ditangani.



Gambar (Figure) 3. Bunga matahari (*Helianthus annuus*) selain indah bunganya, juga mempunyai potensi sebagai hiperakumulator (*Sun flower (Helianthus annuus), an ornamental plants as well as a hyper-accumulator*) (Foto: www.wikipedia.com)

Namun demikian, untuk mengembangkan teknologi fitoremediasi perlu diperhatikan beberapa hambatan atau kendala antara lain fitoremediasi hanya terbatas pada areal permukaan tanah sampai dengan kemampuan akar tanaman menjangkau polutan (logam) (www.wikipedia.com), sehingga karakter tanaman (sistem perakaran) sangat menentukan proses ini (www.frtr.gov). Tanaman mempunyai keterbatasan kemampuan dalam menetralkan polutan sehingga proses yang dilakukan oleh tanaman tidak dapat mencegah seluruh polutan/logam dari pelindihan. Dalam hal ini logam yang berada cukup dalam mempunyai peluang yang sangat tinggi untuk terakumulasi di air tanah (*ground water*).

Untuk tanaman yang tumbuh lambat dan menghasilkan sedikit biomas, memerlukan waktu yang cukup lama sehingga pemilihan jenis tanaman yang akan digunakan harus dilakukan dengan cermat. Ketahanan tanaman yang digunakan pada proses fitoremediasi sangat ditentukan oleh tingkat toksisitas polutan dan kondisi umum dari tanah tersebut. Oleh karena itu (Setiadi, 2004, komunikasi pribadi) syarat tanaman yang akan digunakan pada rehabilitasi lahan tercemar adalah harus cepat tumbuh dan menghasilkan banyak biomas dan tahan pada tanah yang sangat kahat unsur hara.

Kendala yang lain adalah masih adanya kemungkinan bioakumulasi melalui rantai makanan. Oleh karena itu menurut www.frtr.gov perlu dilakukan penelitian lebih mendalam mengenai nasib dari polutan di dalam proses metabolisme tanaman sehingga didapatkan kepastian bahwa serasah atau kotoran hewan yang memakannya tidak menyumbangkan senyawa berbahaya ke dalam rantai makanan dan tidak meningkatkan resiko pemaparan (*exposure*) kepada masyarakat luas.

Pada beberapa kasus kadang-kadang terjadi kontaminan justru menjadi lebih berbahaya ketika sudah terjadi kontak dengan tanaman. Contohnya adalah stronsium (Sr) dan cesium (Cs) berubah menjadi limbah radioaktif setelah diproses oleh bunga matahari, sehingga tanaman jenis ini jangan sampai digunakan untuk fitoremediasi pada tanah yang tercemar logam-logam tersebut (Adler, 1996; dalam www.epa.gov).

Kendala lain yang tidak kalah penting adalah kadang-kadang spesies yang digunakan untuk proses fitoremediasi bukan merupakan jenis asli (*native species*). Penggunaan spesies asing hendaknya memperhatikan dua hal sebagai berikut: spesies tersebut sudah diketahui betul tidak akan menimbulkan masalah ekologi pada areal yang baru (bukan jenis invasif) dan spesies tersebut tidak dapat membiak dengan efektif secara liar (disterilkan atau perkembangbiakannya tergantung pada kultivasi oleh manusia) (www.epa.gov).

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Teknologi fitoremediasi dapat digunakan untuk memperbaiki lingkungan bekas tambang terutama untuk menurunkan logam-logam akibat terjadinya air asam tambang. Fitoremediasi merupakan teknologi yang murah, mudah dimonitor, logam yang diakumulasi mudah dipisahkan serta lebih aman dibandingkan dengan teknologi menggunakan bahan kimia. Fitoremediasi harus memperhatikan pemilihan jenis yang tepat yaitu yang mempunyai sistem perakaran yang dapat menjangkau polutan, mempunyai biomasa besar, tahan terhadap polutan, tidak mengubah polutan menjadi lebih berbahaya serta bukan jenis invasif.

Penelitian yang berkaitan dengan fitoremediasi mempunyai prospek yang sangat bagus untuk dikembangkan di masa depan. Peluang yang sangat besar terutama untuk bidang-bidang rekayasa genetika. Para perekayasa hendaknya tertantang untuk merekayasa tanaman menjadi berkemampuan untuk mengatasi akumulasi logam-logam yang sangat besar di daerah-daerah bekas tambang.

DAFTAR PUSTAKA

- Alexander, M. 1977. *Introduction to Soil Microbiology*. John Willey and Son. New York.
- Baker, A.J.M. and R.R. Brooks. *Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements - A review of their distribution, ecology and phytochemistry*. *Biorecovery* (1989), 1:81-126
- Costello, C. 2003. Acid Mine Drainage: Innovative Treatment Technologies. www.clu-in.org
- Davis, M.A, J.F. Murphy and R.S. Boyd. 2001. *Nickel increases susceptibility of a Nickel hyper-accumulator to turnip mosaic virus*. *J. Env. Qual.* 30: 85-90.
- Hannink N, S.J. Rosser, C.E. French, A. Basran, J.A. Murray, S. Nicklin and N.C. Bruce. 2001. *Phytodetoxification of TNT by transgenic plants expressing a bacterial nitroreductase*. *Nat Biotechnol.* 19(12):1168-72.
- 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
- Lauzon, S. 2002. *New iron eating microbe, major component of mining pollution and iron sulphur cycling*. www.who.edu/media/ironeatingmicrobes.html
- Marschner, H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2nd ed. Academic Press. London.
- Neculita, C.M., G.J. Zagury and B. Bussiere. 2007. *Passive treatment of acid mine drainage in bioreactors using sulfate-reducing bacteria*. *J Environ Qual* 36:1-16

- Rathinasabapathi, B., L.Q. Ma and M. Srivastava. 1999. *Arsenic Hyperaccumulating ferns and their application to phytoremediation of arsenic contaminated site*. Global Science Books. India.
- Ross, S.M. and K.J. Kaye. 1994. *The Meaning of Metal Toxicity in Soil-Plant System*. Toxicity in Soil-Plant System. S.M. Ross (ed). John Willey and Son. New York. pp: 27 - 62
- Tan, K.H. 1993. *Principles of Soil Chemistry (2nd Ed)*. Marcel Dekker Inc. New York.
- Widyati, E dan B.S. Kresno. 2007. Bioremediasi air asam tambang di beberapa KPL PT. Bukit Asam dengan bakteri pereduksi sulfat. Tidak dipublikasikan.
- Widyati, E. 2006. Bioremediasi Tanah Bekas Tambang Batubara dengan *Sludge* Industri Kertas untuk Memacu Revegetasi Lahan. Disertasi. Sekolah Pasca Sarjana IPB, Bogor.
- Widyati, E. 2009. Pengaruh ameliorasi tanah dan inokulasi mikroba terhadap kemampuan *Acacia crasicarpa* CUNN Ex-Benth dalam menurunkan akumulasi logam pada tanah bekas tambang. Jurnal Penelitian Hutan Tanaman. (*In Publish*).
- Wong, M.H. 2003. *Ecological restoration of mine degraded soils with emphasis on metal contaminated soils*. Chemosphere Issue 6: 775 - 780
- www.ars.usda.gov/is/AR/archive/jun00/soil0600.htm. *Phytoremediation: Using Plants to Clean Up Soils* [10 Januari 2008]
- www.epa.gov/superfund/site. 2001. *A Citizen Guide to Phytoremediation* [20 Desember 2007]
- www.ftrr.gov/matrix2/section4/4-33.html. PHYTOREMEDIATION [10 Januari 2008]
- www.wikipedia.com/thefreeencyclopedia/phytoremediation. [21 Desember 2000]