

OPTIMASI PERTUMBUHAN *Acacia crassicarpa* CUNN. EX BENTH. PADA TANAH BEKAS TAMBANG BATUBARA DENGAN AMELIORASI TANAH

Growth Optimization of Acacia crasicarpa Cunn. Ex Benth. on ex-coal Mining Site by Soil Amelioration

Eddy Widyati

Peneliti Biologi Tanah dan Kesuburan Lahan, Pusat Litbang Konservasi dan Rehabilitasi, Bogor
Jalan Gunung Batu No. 5 Bogor, 16610; Telp. (0251) 8633234, Fax. (0251) 8633111
Email: eddy_widyati@yahoo.com

Naskah masuk : 24 Februari 2010; Naskah diterima : 21 Januari 2011

ABSTRACT

Revegetation of ex-mining site is limited by metal accumulation in soil. Selecting species that is adaptable to that site, is one effort to solve the problem. Acacia crassicarpa is not only a potential commodity of forest plantation but also a remarkable rehabilitation plants. This study is aimed at observing influences of soil amelioration and seedling inoculation on the growth of A. crassicarpa in ex- mining site. Before planting, the soil samples were ameliorated with organic matter namely sludge of paper mills, top soil (1:1 v/v) and non treatment as control then were incubated in saturated water for 15 days. Seedlings were inoculated with promoting microbes consortium compared to non-inoculated seedlings as control. Three months after planting, availability of Fe, Mn, Zn and Cu were assessed, both in soil and plants tissue. The results showed that soil amelioration with sludge of paper mills reduced Fe, Mn, Zn and Cu in soil significantly compared to top soil and control. This treatment also encouraged the growth of A. crassicarpa better than microbes inoculation. By sludge amelioration seedlings could accumulate more metals without showing toxicity symptom.

Key words: *Amelioration, consortium of soil microbes, ex-mining, metal accumulation*

ABSTRAK

Salah satu hambatan yang dihadapi dalam kegiatan rehabilitasi lahan bekas tambang adalah tingginya akumulasi logam dalam tanah. *A. crassicarpa* merupakan salah satu jenis prioritas yang dikembangkan dalam hutan tanaman industri. Jenis ini juga mempunyai banyak keunggulan untuk ditanam pada kegiatan revegetasi lahan bekas tambang. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perlakuan ameliorasi tanah dan inokulasi mikroba terhadap pertumbuhan *A. crassicarpa* pada lahan bekas tambang. Sebelum ditanami, tanah diameliorasi dengan bahan organik (1:1 v/v) dan diinkubasi selama 15 hari. Selanjutnya ditanami dengan bibit *A. crassicarpa* dalam 2 perlakuan, diinokulasi dengan konsorsium mikroba dan kontrol. Setelah 3 bulan bibit dipanen dan diukur kandungan Fe, Mn, Zn dan Cu pada jaringan dan dalam tanah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ameliorasi tanah dengan *sludge* dapat menurunkan ketersediaan logam dalam tanah dibandingkan dengan *top soil* dan kontrol. Perlakuan ini juga memberikan pengaruh yang lebih baik terhadap pertumbuhan tanaman dibandingkan dengan perlakuan inokulasi dengan konsorsium mikroba. Ameliorasi tanah dengan *sludge* juga memberikan pengaruh yang lebih baik terhadap akumulasi logam dalam jaringan oleh *A. crassicarpa* tanpa menunjukkan gejala keracunan.

Kata kunci: *Ameliorasi, inokulasi, lahan bekas tambang batubara, akumulasi logam*

I. PENDAHULUAN

A. crassicarpa merupakan salah satu jenis yang banyak dibudidayakan untuk pengembangan hutan tanaman industri (HTI) karena memiliki pertumbuhan yang cukup baik walaupun ditumbuhkan pada lahan yang kritis (Turnbull *et al.*, 1983 dalam Widyati, 2006). HTI terutama ditujukan untuk meningkatkan produktivitas lahan-lahan kritis seperti padang alang-alang atau hutan sekunder yang umumnya mempunyai tingkat kesuburan yang rendah. Walaupun demikian, *A. crassicarpa* mempunyai pertumbuhan yang cepat karena kemampuan beradaptasi yang baik (Thomson, 1994 dalam Widyati, 2006).

A. crassicarpa merupakan pohon yang dapat mencapai tinggi 30 m, dan kayunya berpotensi untuk digunakan sebagai bahan konstruksi berat, panel kayu, perabot rumah tangga, dll (Turnbull *et al.*, 1983 dalam Widyati, 2006). Di Indonesia umumnya jenis ini diusahakan sebagai bahan baku industri kertas.

Menurut Turnbull *et al.* (1983) dalam Widyati (2006), *A. crassicarpa* menghasilkan banyak percabangan (tajuknya melebar) apabila tumbuh pada lahan yang terbuka. Oleh karena itu, jenis ini juga akan sangat baik untuk digunakan sebagai tanaman pionir pada kegiatan rehabilitasi lahan bekas tambang. Tajuk yang melebar akan mampu memberikan naungan sehingga akan cepat mengubah iklim mikro setempat. Dengan demikian akan mempercepat terjadinya kolonisasi tumbuhan (suksesi alam) pada lahan tersebut.

Banyak kendala dihadapi dalam kegiatan revegetasi lahan bekas tambang yang dioperasikan melalui tambang terbuka (*opened pit mining*) misalnya tambang batubara. Lahan umumnya mempunyai tingkat kemasaman yang tinggi, kepadatan tanah (*bulk density*/BD) tinggi, ketersediaan unsur hara sangat rendah tetapi akumulasi logam cukup tinggi. Hasil penelitian Widyati (2006) pada tanah bekas tambang batubara di PT. Bukit Asam menunjukkan bahwa tanah tersebut mempunyai pH 2,82; BD 1,71 g/cc, kandungan sulfat mencapai 60.000 ppm serta kandungan Fe (1.204 ppm), Mn (155 ppm), Zn (59 ppm) dan Cu (28 ppm) yang tergolong sangat tinggi (PPT, 1983). Kandungan kritis sulfat dalam tanah berkisar antara 50 - 90 ppm (Havlin *et al.*, 1999), Mn (5-50) ppm, Zn (25-40) ppm dan Cu (1,5-4,5) ppm (Alloway, 1995); sedangkan Fe dinyatakan kritis apabila kandungannya > 300 ppm (Havlin *et al.*, 1999).

Untuk melakukan revegetasi pada lahan dengan kondisi tanah seperti tersebut di atas tentu saja diperlukan pendekatan silvikultur yang tepat. Salah satunya adalah pemilihan jenis yang sesuai. Beberapa jenis akasia mampu tumbuh pada kondisi tanah dan iklim yang buruk sehingga jenis-jenis ini banyak digunakan sebagai tanaman revegetasi. Pada umumnya jenis-jenis akasia mempunyai beberapa keunggulan antara lain cepat tumbuh walaupun pada kondisi yang buruk, mampu menambat nitrogen melalui simbiosis dengan bakteri rhizobium, mempunyai akar di permukaan yang saling berjalanan sehingga dapat melindungi tanah dari erosi (Pinyopusarerk, 1998 dalam Widyati, 2006).

Seperti telah disebutkan di atas, salah satu masalah yang menghambat keberhasilan revegetasi lahan bekas tambang adalah akumulasi logam. Konsentrasi logam yang tinggi dalam tanah dapat mengganggu pertumbuhan bibit karena apabila terserap oleh tanaman dapat mengganggu proses metabolisme (Alloway, 1995). Tingginya akumulasi logam dalam jaringan tanaman antara lain dapat memblokir gugus fungsi biologis yang penting seperti enzim, polinukleotid; mensubstitusi ion logam esensial dari unit-unit fungsi sel; merusak integritas sistem membran organel sel; menyebabkan denaturasi dan deaktivasi enzim; serta mengganggu sistem transpor hara (Ochiai, 1987 dalam Ross and Kaye, 1994). Oleh karena itu, perlu dilakukan pemilihan jenis yang mampu tumbuh pada tanah yang memiliki kandungan logam tinggi. Akan lebih menguntungkan apabila jenis yang dipilih mampu menurunkan ketersediaan logam dalam tanah sehingga dapat membantu pertumbuhan tanaman jenis lain atau organisme tanah lainnya. Penggunaan tanaman untuk menurunkan polutan (termasuk logam) dikenal dengan istilah fitoremediasi.

Beberapa jenis tumbuhan untuk fitoremediasi dapat tumbuh dengan baik pada tanah-tanah yang mempunyai kandungan logam tinggi. Tumbuhan fitoremediasi dibedakan atas golongan toleran atau adaptif (Marschner, 1995). Menurut Ross and Koye (1994), tumbuhan dikategorikan toleran apabila mereka mampu tumbuh pada tanah dengan kandungan logam yang tinggi tanpa terganggu pertumbuhannya. Sedangkan tumbuhan dikategorikan adaptif apabila mereka secara aktif beradaptasi supaya tidak terganggu dengan kandungan logam yang tinggi dalam tanah. Adaptasi tersebut misalnya menahan logam pada akar atau menyerap logam

tetapi logam tersebut dilokalisasi pada vakuola sel (Ross and Koye, 1994).

Mengembangkan tumbuhan fitoremediasi akan memberikan keuntungan baik secara fisik maupun secara kimia terhadap tanah. Secara fisik, tumbuhan yang toleran dapat mencegah perpindahan polutan terangkut melalui erosi (Salt *et al.*, 1996). Adanya tumbuhan pada lahan tersebut akan melindungi tanah tererosi oleh air. Sehingga mekanisme ini disebut *fitostabilisasi*. Keuntungan secara kimia diberikan oleh tumbuhan yang adaptif. Melalui mekanisme *fitoimobilisasi* tumbuhan mengeluarkan metabolit sekunder yang dapat mengimobilisasi logam sehingga dapat mencegah pengangkutan logam terlarut dalam air. Disamping itu, tumbuhan adaptif mempunyai mekanisme *fitoekstraksi*, yaitu mengekstrak logam dari tanah dan dikumpulkan ke dalam jaringan (Salt *et al.*, 1996). Khan *et al.* (2000), juga berpendapat bahwa dalam proses remediasi tumbuhan berperan sebagai pengumpul, penstabil atau pendegradasi logam-logam.

Untuk mengoptimasi keberhasilan fitoremediasi pemilihan jenis tanaman sebaiknya yang mempunyai sifat-sifat cepat tumbuh, mempunyai kemampuan yang tinggi dalam menyerap logam dan menghasilkan biomasa yang besar (Khan *et al.*, 2000). Peningkatan pertumbuhan awal dan kemampuan adaptasi bibit dapat dilakukan melalui perbaikan kondisi tanah dan peningkatan mutu bibit. Perbaikan tanah dapat dilakukan dengan ameliorasi tanah dengan bahan organik sedangkan peningkatan mutu bibit dapat dilakukan melalui inokulasi bibit dengan mikroba pemacu pertumbuhan tanaman.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perubahan ketersediaan logam-logam dalam tanah bekas tambang batubara. Penelitian juga ditujukan untuk mengetahui pengaruh ameliorasi tanah sebelum tanam dan inokulasi konsorsium bakteri rhizobium, bakteri pelarut fosfat (BPS) dan fungi mikroriza arbuskula (FMA) terhadap pertumbuhan dan akumulasi logam dalam jaringan tanaman *A. crassicarpa*.

II. BAHAN DAN METODE

Percobaan dilakukan di rumah kaca Departemen Ilmu Tanah dan Sumber Daya Lahan, Institut Pertanian Bogor, dari bulan September 2005 – Februari 2006. Percobaan dilakukan dalam dua tahapan kegiatan, yaitu

penyiapan media tanam dan percobaan fitoremediasi.

A. Penyiapan Media Tanam

Tanah bekas tambang batubara diambil dari lahan bekas tambang batubara di Sumatera Selatan, disimpan selama 3 hari. Selanjutnya tanah dihaluskan dan disaring dengan saringan berukuran 25 mesh, untuk memberi permukaan kontak yang luas dengan bahan amelioran. Pada percobaan ini ameliorasi menggunakan bahan organik yang terdiri atas *sludge* industri kertas (SIK) 50% (v/v), *top soil* (TS) 50% (v/v) dan kontrol. TS merupakan standar operasional baku (SOP) dalam kegiatan revegetasi lahan bekas tambang di Indonesia. Pada penelitian ini TS diambil dari bawah tegakan dipterocarpaceae yang dianggap mewakili kondisi lahan sebelum ditambang di daerah Sumatera Selatan. Sedangkan SIK adalah limbah dari pabrik pulp dan kertas yang merupakan *loss fiber* yang terkumpul dalam instalasi pengolahan air limbah. Bahan ini mempunyai kandungan bahan organik yang cukup tinggi dengan pH 8 - 8,7.

Setelah semua perlakuan dicampur secara homogen kemudian dari masing-masing perlakuan diambil 10 kg dan ditempatkan pada polibag berukuran 10 liter. Selanjutnya seluruh perlakuan disiram sampai jenuh dan diinkubasi selama 15 hari. Percobaan dilakukan dalam rancangan acak lengkap dengan 3 perlakuan dalam 3 ulangan dan masing-masing ulangan terdiri atas 8 unit percobaan. Variabel yang diamati meliputi kandungan unsur mikro Fe, Mn, Zn dan Cu dalam tanah pada hari ke-15 setelah inkubasi dengan metode *Atomic Absorbance Spectrometer* (AAS). Pengukuran dilakukan oleh Laboratorium (terakreditasi) Kimia dan kesuburan tanah IPB.

B. Percobaan Fitoremediasi

Setelah media tanam selesai diinkubasi, selanjutnya ditanami dengan bibit *A. crassicarpa* umur 4 bulan. Percobaan dilakukan dengan rancangan faktorial dalam rancangan acak kelompok (RAK) dengan arah datangnya cahaya matahari sebagai kelompok (paling timur, tengah dan paling barat letak di rumah kaca). Faktor perlakuan terdiri atas 2 faktor yaitu:

- Faktor pertama adalah perlakuan ameliorasi tanah (3): SIK, TS dan tanpa perlakuan sebagai kontrol tanah.
- Faktor kedua adalah perlakuan inokulasi bibit (2): yaitu bibit yang diinokulasi dengan

konsorsium mikroba dan bibit yang tidak diinokulasi sebagai kontrol bibit.

Masing-masing kombinasi perlakuan diulang 3 kali dan setiap ulangan terdiri atas 4 unit tanaman contoh, sehingga percobaan ini terdiri atas 72 unit percobaan. Variabel yang diamati meliputi biomasa, kandungan unsur mikro (Fe, Mn, Zn dan Cu) dalam tanah dan pada tanaman umur 90 hari setelah tanam. Untuk mengetahui pengaruh penanaman terhadap ketersediaan logam dalam tanah dilakukan perbandingan antara kandungan logam setelah ameliorasi dengan setelah ameliorasi dilanjutkan dengan penanaman 90 hari. Data yang telah dikumpulkan selanjutnya dilakukan analisis varian menggunakan *software* MINITAB.

Apabila berpengaruh nyata akan dilanjutkan dengan uji wilayah berganda dari Duncan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Percobaan Ameliorasi Tanah

Hasil analisis ragam pengaruh ameliorasi tanah terhadap ketersediaan unsur-unsur hara mikro 15 hari inkubasi disajikan pada Tabel 1. Hasil analisis varian (Tabel 1) menunjukkan bahwa ameliorasi tanah memberikan pengaruh yang berbeda nyata terhadap kandungan logam Fe, Mn, Zn dan Cu dalam tanah 15 hari setelah inkubasi.

Tabel (Table) 1. Nilai F pengaruh perlakuan ameliorasi terhadap ketersediaan unsur-unsur hara mikro 15 hari inkubasi (*F value on the influence of soil amelioration on metals availability in soil at 15 days of incubation*)

Sumber (<i>Source</i>)	Fe	Mn	Zn	Cu
F (hit)	22046,32*	71894,53*	1390,20*	15043,30*
Pr>F	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
KK (%)	1,73	0,52	3,78	1,28

Keterangan (*Remarks*): * = berbeda nyata (*significantly different*)
KK (*CV*) = koefisien keragaman (*coefficient of variance*); $\alpha = 0.05$

Sesungguhnya keempat logam tersebut merupakan unsur hara mikro yang diperlukan untuk pertumbuhan tanaman. Unsur hara mikro merupakan unsur hara yang hanya diperlukan dalam jumlah sedikit, tetapi harus ada dan tidak dapat digantikan oleh unsur yang lain. Akan tetapi ketika unsur-unsur tersebut berada dalam jumlah yang berlebihan akan menyebabkan keracunan yang mengakibatkan gangguan metabolisme bahkan kematian tanaman (Alloway, 1995; Havlin *et al.*, 1999).

Dalam tanaman, unsur Fe merupakan bagian dari penyusun sitokrom dan leghaemoglobin yang sangat penting dalam proses respirasi dan fotosintesis. Unsur ini juga merupakan unsur yang sangat penting dalam mengatur kerja enzim yang terlibat dalam sintesis klorofil (Havlin *et al.*, 1999). Sedangkan unsur Mn merupakan aktivator enzim yang mengatur sintesis glikoprotein, sintesis asam lemak serta mengatur fotosintesis dalam kloroplas (Alloway, 1995). Mn juga merupakan unsur yang mempengaruhi kandungan auxin pada tumbuhan (Havlin *et al.*, 1999). Cu merupakan aktivator

dan kofaktor enzim-enzim, sedangkan Zn merupakan komponen enzim, regulator dan kofaktor berbagai enzim (Alloway, 1995).

Tabel 2 menunjukkan bahwa perlakuan ameliorasi dengan *sludge* dan *top soil* dapat menurunkan ketersediaan logam-logam dalam tanah, kecuali Mn yang justru meningkat ketika diberi perlakuan *top soil*. Menurut Tjitrosemito (komunikasi pribadi), Fe dan logam-logam lainnya akan diendapkan pada pH tinggi sehingga tidak tersedia bagi tanaman. Pada penelitian ini pH *sludge* relatif tinggi. Namun demikian berbeda dengan Mn yang dapat membentuk MnO_4 sehingga ketika diukur pada penelitian ini konsentrasinya meningkat.

Merujuk pada Bohn *et al.* (1985), penurunan ketersediaan logam dapat terjadi apabila logam bereaksi dengan bahan organik sehingga dapat membentuk kompleks yang stabil sehingga menjadi bentuk yang tidak tersedia. Pembentukan kompleks adalah reaksi antara suatu ion logam dengan ligan melalui pembagian pasangan elektron (Tan, 1993). Ion logam merupakan pasangan penerima elektron,

sedangkan ligan merupakan donor elektron. Pembentukan kompleks stabil dengan bahan organik ini bahkan dapat menurunkan toksisitas logam-logam berat misalnya Cd dan Pb (Stevenson, 1994).

Tabel 2 menunjukkan bahwa *sludge* dapat menurunkan ketersediaan Fe, Mn, Zn dan Cu tanah yang berbeda nyata apabila dibandingkan dengan *top soil* dan kontrol. Menurut hasil penelitian Widyati (2006), dalam *sludge*

ditemukan populasi bakteri pereduksi sulfat (BPS). BPS menghasilkan gas H₂S ketika mereduksi sulfat yang terdapat dalam tanah bekas tambang batubara untuk mendapatkan elektron yang diperlukan dalam proses respirasinya. Gas tersebut akan segera bereaksi dengan logam-logam membentuk senyawa logam sulfida yang sukar larut sehingga tidak tersedia dalam tanah (Dvorak *et al.*, 1992 dalam Frank, 2000).

Tabel (Table) 2. Kandungan logam (ppm) pada tanah bekas tambang batubara 15 hari setelah inkubasi (*Metal availability (ppm) in ex-coal mining soil at 15 days after incubation*)

Perlakuan (<i>Treatments</i>)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)
Kontrol (<i>Control</i>)	315 a	153 b	53 a	8,75 a
<i>Top Soil</i>	97 b	298 a	36 b	6,04 b
<i>Sludge</i>	14 c	79 c	12 c	1,30 c

Keterangan (*Remark*): angka-angka yang diikuti oleh huruf yang sama pada kolom yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf α 5% berdasarkan uji Duncan (*Values followed by the same letter within a coulom are not significantly different at α = 0.05 level*).

Hal yang menarik pada penelitian ini adalah perlakuan *top soil* dapat meningkatkan ketersediaan Mn tanah dua kali lipat apabila dibandingkan dengan kontrol (Tabel 2). Kondisi ini diduga karena adanya peran koloni berbagai macam mikroba yang berasal dari proses akumulasi berbagai macam bahan organik yang berasal dari mineralisasi serasah dan eksudat akar dalam *top soil*. Mikroba yang berasosiasi dalam rhizosfir terdapat kelompok mikroba yang berperan sebagai pengoksidasi mangan seperti hasil penelitian Bromfield (1978) dalam Alloway (1995) yang mendapati konsentrasi Mn lebih tinggi pada rhizosfir karena adanya koloni bakteri pengoksidasi Mn, *Arthrobacter* spp.

B. Percobaan Fitoremediasi

1. Pertumbuhan Bibit 90 Hari setelah Tanam (HST)

Hasil analisis ragam pengaruh ameliorasi tanah dan inokulasi bibit terhadap kandungan logam tanah dan biomasa disajikan pada Tabel 3. Hasil analisis tersebut menunjukkan bahwa pengelompokan tidak memberikan pengaruh yang nyata baik terhadap kandungan Fe, Mn, Zn dan Cu dalam tanah maupun terhadap biomasa 90 HST. Tabel 3 juga menunjukkan bahwa inokulasi bibit tidak mempengaruhi kandungan logam dalam tanah tetapi mempengaruhi biomasa bibit 90 HST. Interaksi antara ameliorasi tanah dan inokulasi bibit memberikan pengaruh terhadap kandungan Fe, Mn dan Zn dalam tanah tetapi tidak berpengaruh terhadap ketersediaan Cu dan biomasa bibit 90 HST.

Tabel (Table) 3. Rekapitulasi probabilitas hasil analisis ragam pengaruh ameliorasi tanah dan inokulasi bibit terhadap kandungan logam tanah dan biomasa bibit 90 HST (*Analysis of variance probability on influence of soil amelioration and seedlings inoculation on metals availability in soil and biomasa at 90 days of planting*)

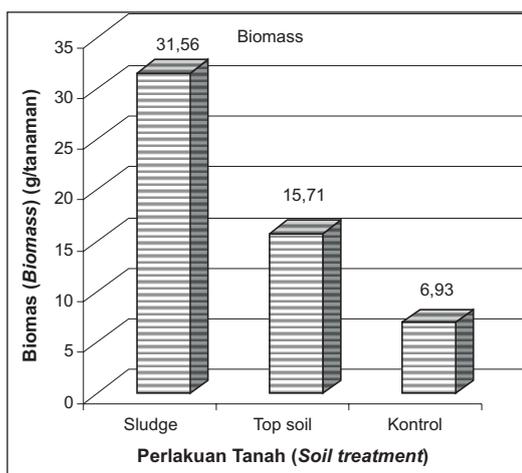
Sumber (Source)	Fe	Mn	Zn	Cu	Biomasa (Biomass)
Blok (Block)	0.205 tn	0.827 tn	0.641 tn	0.610 tn	0.943 tn
Ameliorasi (Amelioration)	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.000 **
Inokulasi (Inoculation)	0.093 tn	0.637 tn	0.458 tn	0.643 tn	0.000 **
Blok vs ameliorasi (Block vs amelioration)	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.560 tn	0.996 tn
Blok vs inokulasi (Block vs inoculation)	0.155 tn	0.941 tn	0.766 tn	0.861 tn	0.971 tn
Ameliorasi vs inokulasi (Amelioration vs inoculation)	0.001 **	0.000 **	0.000 **	0.546 tn	0.517 tn

Keterangan (Remarks): tn = tidak berbeda nyata (*non significantly differ*)
 ** = berbeda sangat nyata pada taraf $\alpha = 0.05$ (*significant at level of $\alpha = 0.05$*)

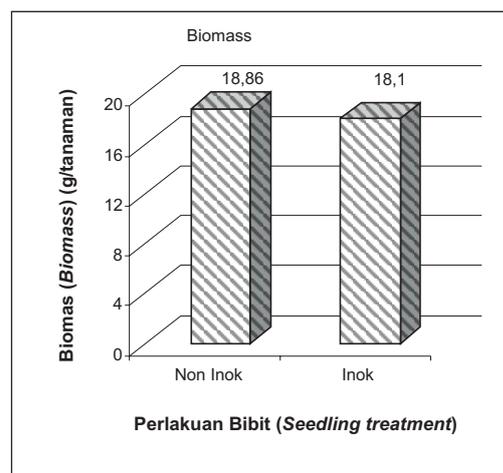
Hasil pengukuran pertumbuhan (Gambar 1) menunjukkan bahwa perlakuan ameliorasi tanah dengan *sludge* industri kertas dapat meningkatkan biomasa bibit *A. crassicarpa* pada 90 HST yang berbeda nyata apabila dibandingkan dengan perlakuan *top soil* dan kontrol (Gambar 1a). Gambar 1b menunjukkan bahwa untuk inokulasi dengan konsorsium mikroba ternyata tidak berpengaruh terhadap biomasa bibit 90 HST. Hal ini diduga karena pada tanah bekas tambang batubara yang digunakan sebagai media tanam mempunyai

kandungan P total yang rendah, sehingga mikroba tidak bekerja optimal.

Perlakuan *sludge* memberikan pengaruh yang baik terhadap pertumbuhan bibit karena perlakuan tersebut paling baik dalam menurunkan kandungan logam-logam dalam tanah (Tabel 1). Penurunan ketersediaan logam dalam tanah dapat meningkatkan pertumbuhan bibit (Gambar 1) karena dapat meminimalkan gangguan akibat akumulasi logam terhadap proses-proses metabolisme dalam tanaman.



(a)



(b)

Gambar (Figure) 1. a. Pengaruh ameliorasi dan b. Pengaruh inokulasi terhadap biomasa bibit *A. crassicarpa* 90 HST (*Influence of soil amelioration (a), and seedling inoculation (b) on biomass of A. crassicarpa seedlings 90 days of planting*)

2. Ketersediaan Unsur Mikro (Logam) dalam Tanah 90 HST

Tabel (Table) 4. Hasil pengukuran kandungan unsur-unsur hara mikro dalam tanah bekas tambang batubara setelah ditanami *A. crassicarpa* 90 HST (*Micronutrients availability in ex-coal mining soil 90 days of planting with A. crassicarpa*)

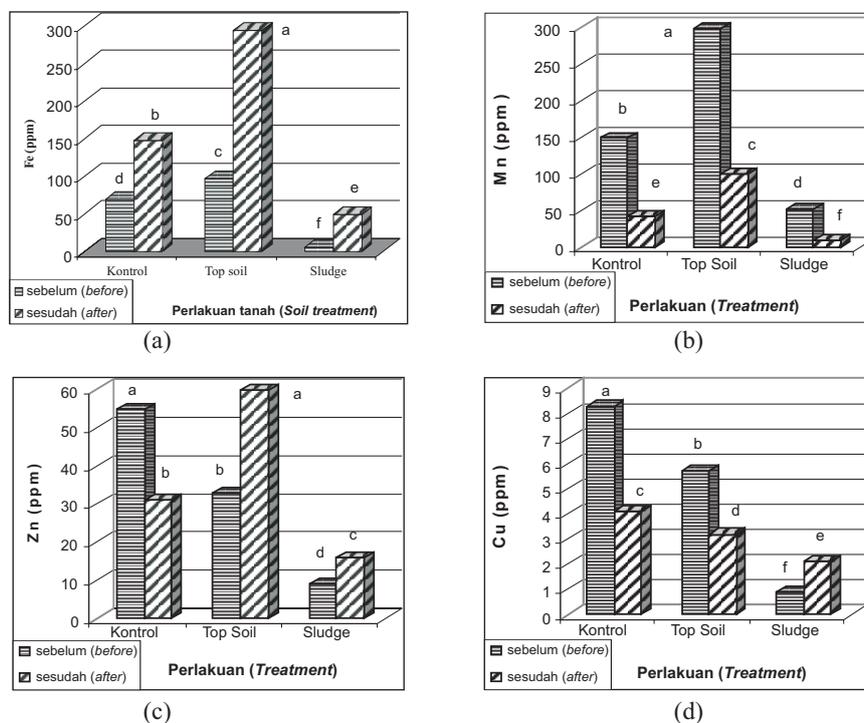
Perlakuan ameliorasi tanah (Soil amelioration)	Fe	Mn	Zn	Cu
	(ppm)			
Kontrol (control)	288 ^b	4 ^c	11 ^c	4,1 ^a
<i>Top soil</i>	231 ^a	113 ^a	62 ^a	3,9 ^a
<i>Sludge</i>	54 ^c	43 ^b	34 ^b	2,2 ^b

Keterangan (Remark): angka-angka yang diikuti oleh huruf yang sama pada kolom yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf α 5% berdasarkan uji Duncan (*Values followed by the same letter within a coulumn are not significantly different at $\alpha = 0.05$ level*)

Hasil analisis ragam (Tabel 3) menunjukkan bahwa perlakuan ameliorasi tanah menurunkan kandungan logam-logam dalam tanah. Pada percobaan ini perlakuan *sludge* memberikan pengaruh yang paling baik dalam menurunkan ketersediaan Fe, Mn, Zn dan Cu dalam tanah 90 HST (Tabel 4). Seperti telah disebutkan di atas bahwa pada perlakuan ini terdapat proses kimia (kelasi oleh bahan organik)

dan mikrobiologis (oleh BPS) sehingga hasil penurunan konsentrasi logam pada perlakuan *sludge* lebih baik dibandingkan dengan perlakuan *top soil* dan kontrol.

Apabila dibandingkan antara Tabel 3 (sebelum ditanami) dan Tabel 4 (setelah 90 hari ditanami) dapat digambarkan dinamika konsentrasi logam-logam Fe, Mn, Zn dan Cu disajikan pada Gambar 2a, 2b, 2c dan 2d.



Gambar (Figure) 2. Perubahan ketersediaan Fe (a), Mn (b), Zn (c) dan Cu (d) masa inkubasi 15 hari dilanjutkan dengan penanaman bibit *A. crassicarpa* 90 hari. sebelum: sebelum ditanami bibit; sesudah: 90 hari setelah tanam. (*Availability dynamics of Fe (a), Mn (b), Zn (c), and Cu (d), 90 days after planting*)

Ketersediaan logam-logam tersebut mengalami penurunan secara signifikan setelah perlakuan ameliorasi apabila dibandingkan dengan kontrol. Namun, setelah 90 hari dilakukan penanaman bibit *A. crassicaarpa* dapat meningkatkan kembali konsentrasi Fe dalam tanah (Gambar 2a), Zn pada tanah yang diberi perlakuan *top soil* dan *sludge* (Gambar 2c) serta Cu pada tanah yang diberi perlakuan *sludge* (Gambar 2d). Peningkatan konsentrasi Fe dan Zn dalam tanah 90 HST pada perlakuan *top soil* terjadi secara signifikan apabila dibandingkan dengan kontrol dan *sludge* (Gambar 2a dan 2c). Bagaimana fenomena ini bisa terjadi masih memerlukan kajian dan penelitian lebih lanjut.

Gambar 2 menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi logam-logam setelah penanaman pada perlakuan *sludge* jauh lebih rendah secara berbeda nyata apabila dibandingkan dengan ketersediaan pada perlakuan kontrol. Diduga perubahan konsentrasi logam-logam dalam tanah ini terjadi karena tanaman menghasilkan metabolit sekunder berupa eksudat akar yang dapat mempengaruhi ketersediaan unsur hara dalam tanah yang digunakan untuk mengatur pelepasan maupun pengkelatan unsur mikro (Metting, 1992). Menurut Smith (2002), tanaman mempunyai mekanisme untuk beradaptasi dengan konsentrasi logam-logam dalam tanah melalui pelepasan *phytosiderophore* oleh akar untuk menghambat mobilisasi Fe, Mn, Zn dan Cu untuk mencegah defisiensi logam-logam tersebut. Namun dalam penelitian ini bagaimana mekanisme tanaman yang bahkan meningkatkan unsur-unsur tersebut masih memerlukan penelitian lebih lanjut.

3. Penyerapan Unsur Mikro (Logam) oleh Tanaman

Analisis kandungan logam-logam dalam jaringan tanaman dilakukan untuk mengetahui pengaruh perlakuan media tanam terhadap serapan logam oleh tanaman. Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa pengelompokan tidak memberikan pengaruh yang nyata kecuali terhadap Cu (Tabel 5). Sedangkan perlakuan ameliorasi tanah memberikan pengaruh yang berbeda nyata terhadap kemampuan tanaman dalam menyerap Fe, Mn, Zn dan Cu 90 HST (Tabel 5). Perlakuan inokulasi bibit juga memberikan pengaruh yang nyata terhadap serapan logam kecuali terhadap Zn. Hasil analisis juga menunjukkan bahwa interaksi antara ameliorasi tanah dan inokulasi bibit memberikan pengaruh yang nyata terhadap serapan unsur-unsur mikro tersebut, kecuali unsur Zn, oleh bibit 90 HST (Tabel 5).

Hasil pengukuran kandungan unsur-unsur mikro dalam jaringan tanaman menunjukkan bahwa pemberian perlakuan *sludge* pada tanah bekas tambang batubara dapat menurunkan kandungan logam, sedangkan inokulasi bibit cenderung meningkatkan akumulasi logam dalam jaringan (Gambar 3). Hal ini menunjukkan bahwa penambahan *sludge* pada tanah bekas tambang batubara dapat menahan logam sehingga tidak diserap oleh tanaman. Bibit yang diinokulasi yang ditanam pada tanah dengan perlakuan kontrol (tanpa perlakuan bahan organik) mempunyai kandungan Mn (Gambar 3a) dan Cu (Gambar 3b) yang paling tinggi dibandingkan dengan perlakuan yang lain.

Tabel (Table) 5. Hasil analisis ragam pengaruh perlakuan terhadap serapan unsur-unsur hara mikro oleh bibit *A. crassicaarpa* 90 HST (*Analysis of variance on seedlings capacity on micronutrients uptake, 90 days of planting*).

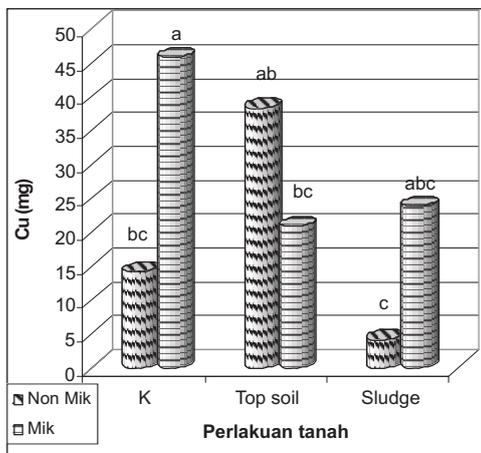
Perlakuan (<i>Treatments</i>)	Fe	Mn	Zn	Cu
Blok (<i>block</i>) (1)	0.059 tn	0.095 tn	0.358 tn	0.007 **
Ameliorasi (<i>soil amelioration</i>) (2)	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.000 **
Inokulasi (<i>inoculation</i>) (3)	0.000 **	0.000 **	0.613 tn	0.000 **
Ameliorasi vs blok (1 vs 2)	0.400 tn	0.743 tn	0.922 tn	0.406 tn
Inokulasi vs blok (1 vs 3)	0.831 tn	0.807 tn	0.992 tn	0.363 tn
Ameliorasi vs inokulasi (2 vs 3)	0.000 **	0.000 **	0.601 tn	0.000 **

Keterangan (*Remarks*): ** = berbeda nyata (*significant*)
tn = tidak beda nyata (*not significant*)
 α = 0,05

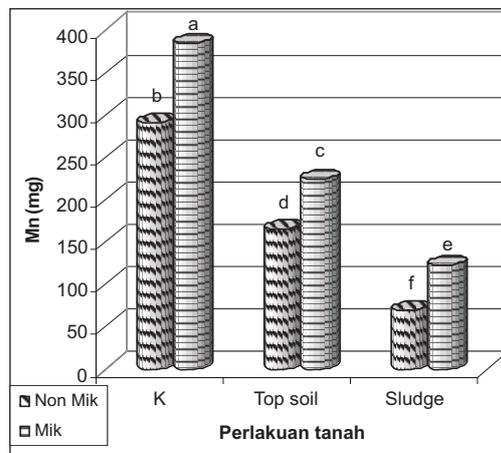
Pada penelitian ini, bibit yang diinokulasi menunjukkan kecenderungan untuk meningkatkan akumulasi logam dalam jaringan tanaman (Gambar 3a dan Gambar 3b). Merujuk pada hasil beberapa penelitian menunjukkan bahwa tanaman yang diinokulasi dengan FMA ketika ditanam pada tanah yang terkontaminasi logam berat memberikan pengaruh yang tidak konsisten. Weissenhorn and Leyval (1995) dalam Joner and Leyval (1997) menyatakan bahwa inokulasi FMA dapat meningkatkan konsentrasi logam berat sampai pada tingkat toksis terhadap tanaman inangnya, sedangkan hasil penelitian Heggo *et al.* (1990) menunjukkan bahwa inokulasi FMA menurunkan konsentrasi Zn dan Cu pada tanaman inangnya. Pada penelitian ini ketersediaan logam-logam tersebut dalam tanah memang sangat tinggi karena tanahnya masam sehingga inokulasi mikroba dapat meningkatkan serapan Cu (mg/berat kering tanaman) dan Mn (mg/berat kering tanaman).

Pada penelitian ini, ameliorasi tanah dengan *sludge* dapat membantu mengoptimalkan pertumbuhan *A. crassicarpa* pada tanah bekas

tambang batubara. Menurut Havlin *et al.* (1999) pada umumnya tanaman hanya memerlukan Fe 50 - 250 mg/kg biomasa dalam jaringan dan akan keracunan apabila kandungan Fe dalam jaringan melebihi 300 mg/kg biomasa. Dari Tabel 4 menunjukkan bahwa setelah dilakukan ameliorasi dengan *sludge A. Crassicarpa* dapat mengumpulkan Fe antara 50 - 65 kali lipat dari batas keracunan tanaman pada umumnya. Tanaman ini juga mampu menyerap Mn 43 - 75 kali lipat dari batas maksimum kebutuhan tanaman pada umumnya (Tabel 4), sebab tanaman umumnya memerlukan Mn 20 - 50 mg/kg biomasa dalam jaringan. Tanaman ini mampu menyerap 5,5 - 11 kali lipat dari batas keracunan tanaman terhadap Zn (400 mg/kg biomasa). Tanaman umumnya menyerap Cu pada kisaran 5 - 20 mg/kg biomasa, sedangkan *A. crassicarpa* pada penelitian ini mampu menyerap antara 6 - 42 kali lipat dari batas kebutuhan maksimum tanaman (Tabel 4). Sedangkan menurut Ross and Kaye (1994) bahwa kebutuhan unsur Fe, Mn, Zn dan Cu berkisar antara 1 - 100 mg/kg biomasa kering.



(a)



(b)

Gambar (Figure) 3. Kandungan Mn (a) dan Cu (b) per tanaman 90 HST. Non Mik: tidak diinokulasi; mik: diinokulasi dengan FMA, BPF dan rhizobium (*Mn (a) and Cu (b) accumulation in plant tissue 90 days of planting; mik is inoculated with rhizobium, AMF and phosphate solubilizing bacteria while Non mik is not inoculated seedlings*)

Tabel (Table) 6. Serapan unsur hara mikro (Fe, Mn, Zn dan Cu) dalam tanaman (*Fe, Mn, Zn and Cu accumulation in plant tissue*)

Perlakuan (<i>Treatments</i>)	Fe		Mn		Zn		Cu	
	mg/kg biomasa							
	Non Mik	Mik	Non Mik	Mik	Non Mik	Mik	Non Mik	Mik
Kontrol (<i>control</i>)	15303	13402	3674	3760	3176	2231	179,4	447,8
<i>Top soil</i>	19575	11233	3569	3451	4578	2689	829,1	321,6
<i>Sludge</i>	18533	18387	2157	3599	4621	5985	130,1	699,2

Perlakuan ameliorasi tanah dengan *sludge* ternyata terdapat kecenderungan untuk meningkatkan akumulasi unsur-unsur mikro dalam biomasa bibit. Tabel 4 menunjukkan bahwa perlakuan *sludge* merupakan perlakuan yang paling konsisten dalam meningkatkan akumulasi unsur-unsur Fe, Zn dan Cu dalam jaringan tanaman secara signifikan apabila dibandingkan dengan perlakuan kontrol. Perlakuan *sludge* dan inokulasi dengan konsorsium mikroba dapat meningkatkan penyerapan Mn, Zn dan Cu (Tabel 4) oleh tanaman. Walaupun tanaman menyerap logam yang tinggi pada perlakuan *sludge* tetapi tidak menunjukkan gejala keracunan (Gambar 4). Gambar 4 menunjukkan bahwa pertumbuhan

bibit yang ditanam pada perlakuan *sludge* memiliki keragaan yang lebih baik dibandingkan dengan *top soil* maupun kontrol, yaitu jumlah percabangan yang lebih banyak dan warna daun yang lebih hijau. Sedangkan perlakuan ameliorasi dengan *top soil* ternyata dapat meningkatkan penyerapan Fe, Zn dan Cu (Tabel 6) pada tanaman tetapi tanaman menunjukkan gejala keracunan yaitu tanaman berwarna kuning (Gambar 4). Pada perlakuan *top soil* ini apabila bibit diinokulasi dengan konsorsium mikroba ternyata dapat menurunkan akumulasi dalam jaringan tanaman (Tabel 4). Walaupun demikian tanaman masih menunjukkan gejala keracunan logam (Gambar 4).



Kontrol *top soil* *Sludge*

Gambar (Figure) 4. Keragaan tanaman 90 hari setelah tanam (*Seedlings performance at 90 days of planting*)

IV. KESIMPULAN

1. Ameliorasi tanah dengan *sludge* dapat mengoptimasi pertumbuhan *A. crassicaarpa* dan dapat menurunkan konsentrasi Fe, Mn, Zn dan Cu dalam tanah bekas tambang batubara.
2. Ameliorasi dengan *sludge* menunjukkan bahwa dalam jaringan didapatkan konsentrasi Fe (50 - 65 x), Mn (43 - 75 x), Zn (5,5 - 11x) dan Cu (6 - 42x) lebih tinggi dari batas kebutuhan maksimum atau batas keracunan tanaman pada umumnya.
3. Inokulasi bibit dengan konsorsium FMA, rhizobium dan bakteri pelarut fosfat pada perlakuan ameliorasi *sludge* dapat meningkatkan serapan logam tanpa menunjukkan gejala keracunan pada tanaman.

DAFTAR PUSTAKA

- Alloway, B.J. 1995. *Heavy Metals in Soil*. 2nd ed. Blackie Academic and Professionals. London.
- Bohn, H.L., B.L. McNeal and G.A. O'Connor. 1985. *Soil Chemistry*. 2nd ed. John Wiley & son. New York.
- Frank, F. 2000. *Bioremediation by sulphate reducing bacteria of acid mine drainage*. http://ist_socrates.berkeley.edu/es196/projects/final/frank.pdf. [16 Juli 2004].
- Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale dan W.L. Nelson. 1999. *Soil Fertility and Fertilizer: An Introduction to Nutrient Management*. Prentice Hall. New Jersey.
- Heggo, A, A. Angle and R.L. Chaney. 1990. *Effects of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi on heavy metal uptake by soybean*. *Soil. Biol. Biochem.* 22: 865 - 869.
- 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.
- Marschner, H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2nd ed. Academic Press. London.
- Metting, B. 1992. *Soil Microbial Ecology*. Marcel Dekker. New York.
- Pinyopusarek, K. 1998. *Acacias for amenity planting and environmental conservation*. Proceeding of 3rd Meeting of The COGREIDA, 28 - 29 June 1994. Wood, H and Awang, K (Ed). Taipei, Taiwan, ROC.
- Ripley, E.A., R.E. Redmann and A.A. Crowder. 1996. *Environmental Effects of Mining*. St. Lucia Press. Ontario.
- 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.
- Salt, D.E, M. Blaylock, N.P.B.A. Kumar, V. Dushenkov, B.D. Enshley, L. Chet and L. Raskin. 1996. *Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environments using plants*. *Biotechnology* (13): 468 - 474.
- Smith, N. 2002. *Waste utilization and bioremediation: the role of genetically modified organisms*. *Bioenergy Crops and Bioremediation: a Review*. Final Report Departemen of Food, Energy and Rural Affair, UK. Britt and Garstang (Ed). www.dlfra.gov.uk/firm/acu/research/report/NF.0417.pdf. [5 Mei 2006].
- Stevenson, F.J. 1994. *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reaction*. John Willey & son. New York.
- Tan, K.H. 1993. *Principles of Soil Chemistry* (2nd Ed). Marcel Dekker Inc. New York.
- Weissenhorn, I. and C. Leyval. 1995. *Root colonization of maize by a Cd-sensitive and a Cd-tolerant Glomus mossae and cadmium uptake in sand culture*. *Plant Soil* (175): 233-238).
- Widyati, E. 2006. *Bioremediasi Tanah Bekas Tambang batubara dengan Sludge Industri Kertas untuk Memacu Revegetasi Lahan*. Disertasi Doktor. Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor. Bogor.

Widyati, E. 2007. Formulasi Inokulum untuk *Acid Mine Drainage*. PT. Bukit Asam. Tidak dipublikasikan.

Www.wikipedia.com.thefreeencyclopedia/bioremediation.htmwww.wikipediathefreeencyclopedia.Bioremediation.Phytoremediation. [18 Juni 2006].