



**KESESUAIAN DAN KINERJA TANAMAN KEHUTANAN  
SEBAGAI FITOREMEDIATOR LOGAM  
PADA LAHAN BEKAS TAMBANG BATUBARA**

**Selly Oktashariany Ayub**

**Universitas Diponegoro  
Semarang  
2015**

*Kupersembahkan untuk :*

*Ayahuda dan Ibunda tercinta*

**"(Alm.) Mohammad Ayub "**

*dan*

**"Sutarsih "**

*Suami tercinta*

**"Dwiyanto Purnomosidhi "**

*dan*

*Ananda tersayang*

**"Sulthon Faris Azroqy "**

**KESESUAIAN DAN KINERJA TANAMAN KEHUTANAN  
SEBAGAI FITOREMEDIATOR LOGAM  
PADA LAHAN BEKAS TAMBANG BATUBARA**

Disertasi  
untuk memperoleh gelar Doktor  
dalam Ilmu Lingkungan

Untuk dipertahankan di hadapan  
Rapat Senat Terbuka Terbatas Universitas Diponegoro  
Pada Tanggal 14 Agustus 2015

Oleh  
Selly Oktashariany Ayub  
Lahir di Samarinda

**KESESUAIAN DAN KINERJA TANAMAN KEHUTANAN  
SEBAGAI FITOREMEDIATOR LOGAM  
PADA LAHAN BEKAS TAMBANG BATUBARA**

**Selly Oktashariany Ayub**  
NIM : 21080110500007

**TIM PENGUJI**

**Prof. Dr. Ir. Purwanto, DEA**  
(Universitas Diponegoro / Ketua Sidang)

**Dr. Henna Rya Sunoko, Apt., MES**  
(Universitas Diponegoro / Sekretaris Sidang)

**Prof. Dr. Ir. Y. Budi Widianarko, M.Sc**  
(Universitas Katolik Soegijapranata / Promotor)

**Dr. Munifatul Izzati, M.Sc**  
(Universitas Diponegoro / Ko-Promotor)

**Prof. Dr. Nico M. van Straalen**  
(Vrije Universiteit Amsterdam / Penguji Eksternal)

**Dr. Endang Hilmi, S.Hut., M.Si**  
(Universitas Jenderal Soedirman / Penguji Eksternal)

**Dr. Tri Retnaningsih Soeprbowati, M.App.Sc**  
(Universitas Diponegoro / Penguji)

**Dr. Syafrudin, CES., MT**  
(Universitas Diponegoro / Penguji)

## **PERNYATAAN ORISINALITAS**

Yang bertandatangan di bawah ini :

Nama : Selly Oktashariany Ayub

NIM : 21080110500007

Program Studi : Doktor Ilmu Lingkungan, Program Pascasarjana, Universitas Diponegoro

Dengan ini menyatakan:

1. Disertasi yang berjudul “**Kesesuaian dan Kinerja Tanaman Kehutanan sebagai Fitoremediator Logam pada Lahan Bekas Tambang Batubara**” merupakan karya ilmiah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik, baik di Universitas Diponegoro maupun di perguruan tinggi lain
2. Disertasi ini murni gagasan, rumusan dan hasil penelitian saya tanpa bantuan orang lain, kecuali tim promotor dan penguji.
3. Disertasi ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama penulis dan judul aslinya pada daftar pustaka
4. Disertasi ini disusun berkat bimbingan dari promotor Prof. Dr. Ir. Y. Budi Widianarko, M.Sc dan Ko-Promotor Dr. Munifatul Izzati, M.Sc.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan sungguh-sungguh dan apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa disertasi ini hasil plagiasi, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Semarang, 14 Agustus 2015,

Yang membuat pernyataan,

Selly Oktashariany Ayub

NIM. 21080110500007

## UCAPAN TERIMAKASIH

Puji dan syukur dipanjatkan ke hadirat Allah SWT atas berkah, rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan Disertasi yang berjudul “**Kesesuaian dan Kinerja Tanaman Kehutanan sebagai Fitoremediator Logam pada Lahan Bekas Tambang Batubara**” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh derajat gelar Doktor pada Program Doktor Ilmu Lingkungan, Program Pascasarjana Universitas Diponegoro.

Pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada pihak-pihak yang banyak memberikan bantuan dan berjasa dalam penyelesaian penelitian dan pendidikan:

Rektor Universitas Diponegoro yang telah memberikan kesempatan dan bantuan dalam mengikuti pendidikan Program Doktor pada Program Doktor Ilmu Lingkungan Program Pascasarjana Universitas Diponegoro.

Prof. Dr. Ir. Purwanto, DEA, selaku Direktur Pascasarjana dan sebagai penguji yang telah memberikan dorongan, motivasi, dan saran selama menempuh pendidikan, dalam penyusunan disertasi.

Dr. Henna Rya Sunoko, Apt., MES, selaku plt. Ketua Program Doktor Ilmu Lingkungan, Program Pascasarjana Universitas Diponegoro dan sebagai penguji yang telah banyak memberikan dorongan, motivasi, semangat dan saran selama menempuh pendidikan, dalam penyelesaian penelitian, penyusunan serta perbaikan disertasi.

Prof. Dr. Sudharto P. Hadi, MES, selaku Rektor Universitas Diponegoro Periode 2010 – 2014, yang telah banyak memberikan kesempatan selama menempuh pendidikan.

Prof. Dr. Ir. Y. Budi Widianarko, M.Sc, Rektor Universitas Katolik Sugijapranata, selaku Promotor yang telah banyak memberikan bantuan, motivasi, semangat, bimbingan dan saran dalam pelaksanaan penelitian, serta penyusunan dan perbaikan disertasi sehingga disertasi ini dapat terselesaikan.

Dr. Munifatul Izzati, M.Sc, selaku Ko-Promotor yang telah memberikan bimbingan, motivasi, saran dan koreksi dalam pelaksanaan penelitian serta penyusunan dan perbaikan disertasi sehingga disertasi menjadi sempurna.

Dr. Endang Hilmi, S.Hut., M.Si, Kepala Pusat Penelitian Mitigasi Bencana, Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Jenderal Soedirman, selaku

penguji eksternal yang telah memberikan masukan, saran dan koreksi dalam penyempurnaan disertasi ini.

Dr. Tri Retnaningsih Soeprbowati, selaku penguji internal yang telah memberikan kritik, saran, dan koreksi untuk perbaikan disertasi.

Dr. Ir. Syafrudin, CES., M.T., selaku penguji internal yang telah banyak memberikan saran dan koreksi untuk perbaikan disertasi ini.

Direktur Jenderal Pengelolaan DAS dan Hutan Lindung, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan yang telah memberikan rekomendasi tugas belajar dan kesempatan menempuh pendidikan Program Doktor Ilmu Lingkungan Program Pascasarjana Universitas Diponegoro.

Kepala Pusat Pendidikan dan Pelatihan Kehutanan, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan yang telah memberikan bantuan dana pendidikan, kesempatan dan arahan dalam menempuh pendidikan Program Doktor Ilmu Lingkungan Program Pascasarjana Universitas Diponegoro.

Kepala Balai Pengelolaan DAS Mahakam Berau, UPT. Ditjen. Bina Pengelolaan DAS dan Perhutanan Sosial, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan yang telah memberikan arahan, dorongan, semangat dan masukan selama menempuh pendidikan.

Kepala Biro Perencanaan dan Kerjasama Luar Negeri, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Nasional yang telah memberikan bantuan dana penelitian di Amsterdam selama 2,5 bulan sehingga penelitian dapat terselesaikan.

Pemerintah Provinsi Kalimantan Timur yang telah memberikan bantuan stimulan dana penelitian sehingga penelitian dan penyusunan disertasi dapat terselesaikan.

Prof. Dr. Nico M. van Straalen, Profesor di Bidang Ekologi Hewan pada Department of Ecological Science, Faculty of Earth and Life Science Vrije Universiteit (VU) Amsterdam yang telah menerima penulis sebagai mahasiswa tamu di VU University Amsterdam serta memberikan bimbingan dan arahan selama pelaksanaan penelitian dan penyusunan disertasi.

Dr. Ir. Cornelis. A.M. van Gestel, Associate Profesor Ekotoksikologi Bidang Ekologi Hewan pada Department of Ecological Science, Faculty of Earth and Life Science Vrije Universiteit Amsterdam yang telah memberikan perhatian, bimbingan dan arahan selama pelaksanaan penelitian dan menjadi mahasiswa tamu di Amsterdam.

Rudo A. Verweij, Teknisi di Bidang Ekologi Hewan pada Department of Ecological Science, Faculty of Earth and Life Science Vrije Universiteit Amsterdam, yang telah banyak

memberikan pendampingan, bimbingan, arahan selama melaksanakan penelitian di VU University Amsterdam.

Rahmat Noveri, S.Hut., M.P. selaku Manager CV. Tujuh-Tujuh yang telah memberikan ijin, pendampingan dan akses serta bantuan untuk pengambilan sampel penelitian di Lapangan.

Ayahanda (Alm). Drs. H. Mohammad Ayub dan Ibunda Hj. Sutarsih, yang telah memberikan semangat dan motivasi, serta senantiasa memberikan doa dan mendampingi penulis selama menempuh pendidikan dan penyusunan disertasi.

Suami tercinta Dwiyanto Purnomosidhi, S.Hut., M.P. yang telah memberikan ijin untuk menempuh pendidikan S3, dan dengan penuh kesabaran mendampingi dan membantu penulis baik dalam tugas sehari-hari maupun selama pelaksanaan penelitian dan penyusunan disertasi.

Ananda tersayang, Sulthon Faris Azroqy, yang senantiasa mengerti dan sabar untuk ditinggal selama penelitian serta memberikan dorongan dan motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan disertasi.

Bapak Mertua, Prof. H. Mulyadi, M.M. dan Ibu Mertua, Dra. Hj. Suwarti yang telah memberikan bantuan dan motivasi dalam pelaksanaan penelitian dan penyelesaian disertasi.

Adik-adikku, terutama M. Haekal Firmanda Ayub yang telah banyak membantu penulis dalam pengambilan sampel di lapangan.

Sahabat dan senior rimbawan, Ir. Dyah Widiasasi, M.P. yang telah mendampingi penulis dalam pengambilan sampel di lapangan serta memberikan masukan dan arahan dalam pengolahan data dan penyusunan disertasi.

Seluruh dosen pengampu pada Program Doktor Ilmu Lingkungan Undip yang telah memberikan ilmu selama menempuh pendidikan dan penyusunan disertasi

Teman-Teman Program Doktor Ilmu Lingkungan Angkatan IV UNDIP, atas kebersamaan dan rasa kekeluargaan selama menempuh pendidikan di Semarang dan pelaksanaan penelitian di Amsterdam serta dorongan dan motivasi dalam penyelesaian disertasi; serta semua teman, rekan dan pihak yang telah membantu selama pelaksanaan penelitian dan penyusunan disertasi yang tidak dapat disebutkan satu persatu.



Penulis menyadari sepenuhnya bahwa disertasi ini memiliki keterbatasan dan jauh dari kesempurnaan, sehingga diharapkan kritik dan saran untuk perbaikan disertasi. Semoga disertasi ini bermanfaat bagi semua pihak.

Semarang, 2015

Penulis

## ABSTRAK

Pertambangan batubara memiliki pengaruh negatif terhadap lingkungan, seperti banjir, erosi, serta kontaminasi logam di dalam air, tanah dan udara. Oleh karena itu diperlukan teknologi yang mampu mengurangi pencemaran air dan tanah serta mengurangi erosi dan menambah penutupan lahan melalui fitoremediasi menggunakan tanaman kehutanan. Penelitian ini bertujuan untuk (1) mengidentifikasi kandungan logam serta sifat fisik dan kimia tanah di lahan bekas tambang batubara; (2) mengidentifikasi dominansi dan diversitas jenis tanaman Kehutanan di lahan bekas tambang batubara; (3) menganalisa kesesuaian jenis tanaman kehutanan yang ditemukan di lahan bekas tambang batubara dalam mengakumulasi logam; dan (4) mengevaluasi kinerja fitoremediasi jenis tanaman Kehutanan berdasarkan toksisitas logam dan translokasinya. Orisinalitas penelitian ini terletak pada kombinasi antara analisis vegetasi dengan eksperimen fitotoksitas logam untuk menghasilkan desain rehabilitasi lahan bekas tambang batubara berbasis fitoremediasi.

Tahap kesesuaian vegetasi sebagai fitoremediator logam dilakukan melalui analisis tanah meliputi sifat fisik-kimia dan kandungan logam di tanaman dan tanah untuk menyeleksi jenis logam dan tanaman remediator. Selanjutnya, pada tahap Kinerja Fitoremediator dilakukan pula analisis kinerja tanaman remediator melalui paparan Zn, Ni dan Cd selama 3, 4, dan 5 bulan. Analisis data mencakup statistik deskriptif, uji hipotesis (Anova), Kurva fitting (Kurva Gompertz) dan statistik non parametrik.

Lahan bekas tambang batubara mengandung As, Al, Cd, Cr, Fe, Hg, Pb, Ni dan Zn yang lebih tinggi tetapi hanya Cd, Ni dan Zn melebihi standar kualitas tanah di beberapa negara serta memiliki sifat fisik-kimia tanah yang tidak baik untuk kesuburan tanah. Lahan bekas tambang batubara memiliki keragaman vegetasi jenis kehutanan yang homogen dengan dominansi terdapat pada *Acacia mangium* Willd (Mangium), *Anthocephalus cadamba* (Roxb.) Miq. (Jabon) dan *Samanea saman* (Jacq.) Merr.(Trembesi). Kesesuaian vegetasi yang dominan sebagai fitoremediator Zn, Ni dan Cd secara berurutan adalah *A. mangium* (Mangium) diikuti oleh *A. cadamba* (Jabon) dan *S. saman* (Trembesi).

Kinerja tanaman sebagai fitoremediator berdasarkan pada pertumbuhan tinggi dan biomasa fitoremediator, kemampuan akumulasi logam di dalam organ, pengurangan logam di dalam tanah, muatan logam di dalam tanaman, efisiensi fitoremediasi serta pengurangan ketersediaan fraksi logam di dalam tanah adalah hanya *A. mangium* (Mangium) memiliki kinerja sebagai fitoremediator Seng, sementara tanaman yang memiliki kinerja terbesar sebagai fitoremediator Nikel secara berurutan adalah *S. saman* (Trembesi) yang diikuti oleh *A. mangium* (Mangium). Kinerja terbesar sebagai fitoremediator Kadmium secara berurutan terdapat pada *A. cadamba* (Jabon) yang diikuti oleh *S. saman* (Trembesi) dan *A. mangium* (Mangium). Fitoremediator Seng dan Kadmium yang memiliki kinerja untuk meningkatkan pH tanah adalah *A. mangium* (Mangium).

Desain rehabilitasi lahan bekas tambang batubara harus mencakup desain fitoremediasi dengan melakukan pemilihan jenis tanaman yang berdasarkan pada kondisi fisik-kimia tanah, jenis kontaminan, dominansi dan diversitas vegetasi yang ada di sekitar lahan serta kesesuaian dan kinerja tanaman tersebut.

Kata kunci: fitoremediasi, Zn, Ni, Cd, *Acacia mangium*, *Samanea saman*, *Anthocephalus cadamba*, dominansi vegetasi Kehutanan, kesesuaian fitoremediator, kinerja fitoremediator, lahan bekas tambang batubara

## ABSTRACT

Coal mining has negative impacts on the environment, such as flood, erosion and metal contamination in water, soil and air. Therefore, a technology such phytoremediation using forest plant species to remove the metals, as well as to reduce the flood and erosion is needed. Phytoremediation is a method to reduce and to remove contaminant from soil, water and air. The objectives of this research were (1) to identify metal content as well as to analyze soil physicochemical in a post mining area; (2) to analyze the dominancy and diversity of forest plant species growth on a post mining area; (3) to analyze suitability of forest plant species growth on a post mining soil in accumulating metal; (4) to evaluate and to analyze phytoremediation performance of forest plant species concerning metal toxicity and translocation. The originality of this research lies on the combination between vegetation analysis and metal phytotoxicity experiment to produce a design of post coal mining land rehabilitation based on phytoremediation .

Soil analysis regarding physico-chemical properties and measurement of metal content in plants and soil as well as Vegetation analysis concerning dominancy and diversity, in order to select metal type and plant species were done. Analysis of phytoremediator performance to accumulate Zn, Ni, and Cd was conducted through contamination of Zn, Ni and Cd for 3, 4, dan 5 months The data analysis include descriptive statistic, test of Hypothesis (Anova), Curve Fitting (Gompertz Curve) and non parametric statistic

Soils from post coal mining sites contain elevated level of As, Al, Cd, Cr, Fe, Pb, Ni and Zn, but only Zn at 784 mg/kg, Ni at 119 mg/kg and Cd at 2.61 mg/kg exceed soil quality standard. It also does not support soil fertility.

A post coal mining land had homogenous forest species vegetation with dominant vegetation belong to *Acacia mangium* Willd (Mangium), *Anthocephalus cadamba* (Roxb.) Miq. (Jabon) and *Samanea saman* (Jacq.) Merr.(Trembesi). The suitability of dominant vegetations as Zn, Ni and Cd phytoremediator respectively belong to *A. mangium* (Mangium), then *A. cadamba* (Jabon) and *S. saman* (Trembesi).

Plant performance as phytoremediator was analyzed based on plant height and biomass, capability to accumulate metal in the organ, metal reduction in soil, total load of metal in plant, phytoremediation efficiency as well as reduction of metal fraction availability in soil and soil pH. Mangium was the only phytoremediator for Zn; meanwhile, the best plant performance as phytoremediator for Ni was Trembesi followed by Mangium. The best plant performance as phytoremediator for Cd belongs to *A. cadamba* (Jabon) then *S. saman* (Trembesi) and *A. mangium* (Mangium). However, Mangium was the only phytoremediator for Zn and Cd that increased soil pH.

Design of rehabilitation on post coal mining site should include phytoremediation design by performing plant species selection based on soil physico-chemical properties, contaminant type, dominancy and diversity of vegetation as well as plant suitability and plant performance as phytoremediator.

Keywords: phytoremediation, Zn, Ni, Cd, *Acacia mangium*, *Samanea saman*, *Anthocephalus cadamba*, forest plant species, dominancy, diversity, phytoremediator suitability, phytoremediator performance, post coal mining land

## RINGKASAN

Maraknya pertambangan batubara di Indonesia tidak hanya memberikan potensi ekonomi tetapi juga memiliki pengaruh negatif terhadap lingkungan seperti banjir, erosi, kontaminasi logam di dalam air, tanah dan udara (EPA, 2000; WCI, 2009; WCA, 2011). Penelitian di Malaysia, India dan Indonesia menunjukkan bahwa terjadi lahan terkontaminasi pada pertambangan batubara mengandung Cr, As, Mn, Fe, Pb dan Zn dengan pH rendah (Maiti et al., 2004; Dowarah et al., 2009; Saidi dan Badruzsaufari, 2009; Wan Yaacob et al., 2009). Oleh karena itu diperlukan suatu teknologi yang mampu mengurangi pencemaran air dan tanah akibat pertambangan batubara, di samping mengurangi erosi dan menambah penutupan lahan bervegetasi. Fitoremediasi merupakan sebuah teknologi untuk proses penghilangan, pemindahan, penstabilan atau penghancuran bahan pencemar baik senyawa organik maupun anorganik pada tanah, limbah, kolam dengan menggunakan vegetasi (EPA, 2000; Komives and Gullner, 2006). Salah satu teknologi yang memiliki potensi tersebut untuk lahan bekas tambang batubara karena keefektifan dan efisiensinya adalah fitoremediasi. Keunggulan fitoremediasi adalah tidak mahal, dan tidak memerlukan keahlian khusus untuk mengimplementasikannya. Berbagai jenis tanaman memiliki potensi sebagai fitoremediator logam dengan kemampuan menyerap logam yang bervariasi. Pemilihan jenis tanaman kehutanan untuk tujuan fitoremediasi memiliki beberapa keuntungan seperti sistem perakaran yang dalam dan luas, produksi biomasa dan aktifitas transpirasi tinggi (Tlustoš et al., 2006).

Penelitian tentang fitoremediasi logam menggunakan jenis tanaman kehutanan telah banyak dilaksanakan (Chayed, 2009; Ang et al, 2010; ; Ashraf et al, 2011; Islam et al, 2011; Kabir et al, 2011; Madjid et al, 2011; Maldonado-Magaña et al 2011; Shibli et al, 2011; Arifin et al, 2012; Ghafoori et al, 2012), tetapi penjelasan spesifik tentang fitoremediasi di lahan bekas tambang batubara di Indonesia belum banyak ditemukan. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian potensi fitoremediasi menggunakan jenis tanaman kehutanan yang ditemukan di lahan bekas tambang batubara di Provinsi Kalimantan beserta toksisitas logam terhadap tumbuhan tersebut.

Tujuan dari penelitian ini adalah (1) untuk mengidentifikasi kandungan logam serta sifat fisik dan kimia tanah di lahan bekas tambang batubara; (2) mengidentifikasi dominansi dan

diversitas jenis tanaman Kehutanan yang dominan di lahan bekas tambang batubara; (3) menganalisa kesesuaian jenis tanaman kehutanan yang ditemukan di lahan bekas tambang batubara dalam mengakumulasi logam; dan (4) mengevaluasi kinerja fitoremediasi jenis tanaman Kehutanan berdasarkan toksisitas logam dan translokasinya. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dengan dikembangkannya standar teknik rehabilitasi lahan pasca penambangan batubara berdasarkan tingkat kontaminasi logam, pemilihan jenis dan karakteristik lapangan.

Orisinalitas penelitian ini terletak pada kombinasi antara analisis vegetasi dengan eksperiment fitotoksitas logam untuk menghasilkan desain rehabilitasi lahan bekas tambang batubara berbasis fitoremediasi.

Penelitian ini meliputi 3 tahap utama yaitu (1) Screening dan Identifikasi terhadap 10 jenis logam pada lahan bekas tambang batubara dan dilakukan pemilihan logam dengan konsentrasi tertinggi yang melebihi ambang batas; (2) Screening dan identifikasi jenis tanaman Kehutanan yang dominan di lahan bekas tambang batubara dan evaluasi terhadap kesesuaiannya sebagai fitoremediator logam di lahan tersebut, serta analisis terhadap sifat fisik-kimia tanah; (3) Evaluasi terhadap kinerja fitoremediasi berdasarkan efektifitas tanaman dalam menyerap logam selama 3, 4 dan 5 bulan melalui faktor Bioakumulasi (BAF) dan Faktor Translokasi (TF) (Madejón et al., 2006; Yoon et al., 2006; Ho et al., 2008; Ang et al., 2010; Ashraf et al., 2011; Madjid et al., 2011; Maldonado-Magaña, 2011; Arifin et al, 2012), muatan logam di dalam tanaman serta efisiensi fitoremediasi (Arifin et al., 2012).

Penelitian ini dilaksanakan di lahan bekas pertambangan batubara milik CV. Tujuh Tujuh yang terletak di Kota Samarinda, Provinsi Kalimantan Timur, Indonesia. Sampel tanah dan tanaman dipilih menggunakan plot berukuran 20 x 20 cm sejumlah tersebar pada lahan yang telah direklamasi seluas 8 ha. Analisis logam dilakukan terhadap sampel top soil yang diambil secara manual pada kedalaman 0 – 30 cm pada lubang bekas tambang batubara, tanah timbunan dan lahan reklamasi. Sementara analisis logam pada organ tanaman dilakukan pada akar, batang dan daun dengan 3 kali ulangan. Analisis data mencakup statistik deskriptive, uji hipotesis (Anova dua jalur 3 x 3) (Gomez and Gomez, 1984), Kurva fitting (Kurva Gompertz) (Winsor, 1932) dan statistik non parametrik yaitu uji Kruskal-Wallis dan Mann-Whitney (Gomez and Gomez, 1984).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa lahan bekas tambang batubara memiliki kandungan logam As, Al, Cd, Cr, Fe, Pb, Ni dan Zn yang lebih tinggi tetapi hanya kandungan Zn, Ni, dan Cd di lahan bekas tambang batubara yang melebihi ambang batas menurut standar Amlinger et al. (2004), Ministry of Environmental Protection of Republic China (1995), Hungarian Governmental Regulation Number 10/2000.

Sifat fisik tanah bekas tambang batubara yang mencakup porositas berkisar antara 49,16% - 54,81% yang termasuk kriteria normal untuk pertumbuhan tanaman (Lal and Shukla, 1994), dengan bobot isi tanah berkisar antara 1,29 g/cm<sup>3</sup> – 1,31 g/cm<sup>3</sup> yang masih dapat menunjang pertumbuhan tanaman dan tidak mengganggu pertumbuhan akar, meskipun tidak optimum (Lal and Shukla, 1994). Disamping itu, lahan tersebut memiliki permeabilitas yang berkisar antara 7,75 cm/jam – 15,29 cm/jam yang termasuk ke dalam kriteria agak cepat hingga cepat (Balitanah, 2005) dan bertekstur liat berpasir, dimana tekstur dan permeabilitas ini tidak optimal untuk pertumbuhan tanaman tetapi masih dapat menunjang pertumbuhan tanaman (Hillel, 1998). Dapat disimpulkan bahwa tanah bekas tambang batubara baik berasal dari lahan reklamasi, lahan timbunan maupun lubang bekas galian tambang batubara memiliki sifat fisik yang masih termasuk kriteria normal untuk pertumbuhan tanaman meskipun tidak optimal (Bendixen et al., 1948; Pearson et al., 1995; Hillel, 1998; Lal and Shukla, 2004; Balitanah, 2005; USDA, 2008).

Sifat kimia tanah bekas tambang batubara ditemukan berada dalam kondisi tidak menunjang kesuburan tanah (Balitanah, 2005), yaitu pH (CaCl<sub>2</sub>) yang masam; kandungan bahan organik, C dan N yang rendah; kation Na<sup>+</sup> yang tinggi hingga sangat tinggi; KTK dan K<sup>+</sup> yang sangat rendah hingga rendah; kandungan P, rasio C/N dan Ca<sup>2+</sup> yang sangat rendah; serta Mg<sup>2+</sup> yang sedang.

Beberapa perlakuan dapat diberikan untuk memperbaiki sifat fisik-kimia tanah bekas tambang batubara sehingga menjadi lebih optimal bagi pertumbuhan tanaman. Perlakuan tersebut berupa penambahan bahan organik seperti jerami dan serbuk gergaji (Eusufzai et al., 2007), pemupukan menggunakan pupuk organik berupa kotoran hewan (Bandyopadhyay et al., 2009; Pérez-Esteban et al., 2015), pengairan, dan praktik pembajakan pada tanah (Bandyopadhyay et al., 2009) serta pemberian kapur dolomit untuk meningkatkan pH tanah (Zulkarnain, 2014).

Vegetasi termasuk jenis tanaman Kehutanan yang dapat tumbuh menjadi pohon yang ditemukan pada lahan bekas tambang batubara adalah *Acacia mangium* Willd. (mangium), *Trema* sp, *Macaranga gigantea* (Reichb.f.& Zoll.) (Mahang), *Terminalia cattapa* L. (Ketapang), *Pometia pinnata* J.R. & G. Forst. (Matoa), *Mangifera indica* L. (Mangga), *Samanea saman* (Jacq.) Merr. (Trembesi) *Arthocarpus Integra* Merr. (Nangka) dan *Anthocephalus cadamba* (Roxb.) Miq. (Jabon). Lahan bekas tambang batubara memiliki keragaman vegetasi jenis Kehutanan yang homogen (Magurran, 1988; Fachrul, 2007), dengan dominansi terdapat pada *Acacia mangium* (Mangium), *Anthocephalus cadamba* (Jabon) dan *Samanea saman* (Trembesi).

Revegetasi lahan bekas tambang batubara dengan menanam secara langsung jenis pepohonan yang adaptif terhadap kondisi lahan tersebut akan memperpendek waktu untuk terjadinya suksesi. Adanya pertumbuhan tanaman yang baik maka akan menciptakan kondisi optimal untuk perkecambahan biji ditambah dengan dibantu hewan pemencar biji maka akan hadir jenis-jenis pohon baru melalui suksesi alami (Yassir dan Sitepu, 2014). Terjadinya suksesi akan memulihkan habitat bagi hewan-hewan yang ada di lahan tersebut, mulai dari hewan kecil seperti jenis serangga, hingga pada akhirnya hewan besar yang akan mengembalikan keanekaragaman hayati.

Mangium dan Jabon yang ditemukan di lahan bekas tambang batubara memiliki nilai BAF lebih besar dari 1, menunjukkan bahwa Mangium dan Jabon memiliki kemampuan untuk mengakumulasi Seng dan Nikel di dalam organnya, di mana BAF Seng tertinggi terdapat pada Mangium diikuti oleh Jabon kemudian Trembesi. Sementara BAF Kadmium lebih besar dari 1 hanya dimiliki oleh Mangium yang berarti bahwa hanya Mangium yang dapat mengakumulasi Kadmium di dalam organnya, di mana BAF Kadmium tertinggi terdapat pada Mangium diikuti oleh Jabon dan Trembesi. Sedangkan pada BAF Ni pada ketiga tanaman lebih besar dari 1 dengan yang tertinggi ditemukan pada Mangium diikuti oleh Trembesi dan Jabon. Jabon, Mangium dan Trembesi memiliki TF Seng lebih besar dari 1, sementara TF pada Nikel lebih besar dari 1 hanya dimiliki oleh Trembesi, sedangkan TF pada Kadmium lebih besar dari 1 dimiliki oleh Jabon dan Mangium. Hal ini menunjukkan bahwa Jabon, Mangium dan Trembesi hanya mengakumulasi Seng di bagian akar. Sementara Nikel diakumulasi di akar oleh Jabon dan Nikel diakumulasi pada organ bagian atas oleh Trembesi. Kadmium diakumulasi di organ bagian atas oleh Jabon dan Mangium, sedangkan Trembesi

hanya mengakumulasi Kadmium di bagian akar. Kesesuaian ketiga jenis tanaman tersebut sebagai fitoremediator Seng, Nikel dan Kadmium pada lahan bekas tambang batubara secara berurutan adalah Mangium diikuti oleh Jabon dan Trembesi.

Tingkat toksisitas Seng, Nikel dan Kadmium pada Mangium, Jabon dan Trembesi secara berurutan adalah Seng dengan konsentrasi  $\geq 800$  mg/kg lebih besar daripada Nikel dengan konsentrasi  $\geq 120$  mg/kg diikuti oleh Kadmium dengan konsentrasi  $\leq 5$  mg/kg. Paparan Seng dengan konsentrasi lebih dari 800 mg/kg mengakibatkan terjadinya kematian pada Jabon dan Trembesi, sedangkan pada Mangium mengalami penurunan tinggi yang tidak signifikan ( $\rho=95\%$ ) serta penurunan biomasa daun, batang dan akar secara signifikan ( $\rho=95\%$ ) yang semakin menurun seiring dengan bertambahnya waktu paparan. Sementara terhadap paparan Nikel, pertumbuhan tinggi dan biomasa terbesar dimiliki oleh Trembesi diikuti oleh Mangium. Sedangkan pertumbuhan tinggi dan biomasa tanaman yang terbesar akibat paparan Kadmium dimiliki oleh Jabon diikuti oleh Trembesi dan Mangium.

Kandungan Nikel terbesar akibat paparan Nikel dengan konsentrasi 120 mg/kg dan 240 mg/kg pada daun dan batang ditemukan pada Mangium diikuti oleh Trembesi, sedangkan di dalam akar yang terbesar terdapat pada Trembesi diikuti oleh Mangium. Sisa nikel di dalam tanah yang terkecil terdapat pada Trembesi diikuti oleh Mangium. Sementara pada paparan 2,5 mg/kg dan 5 mg/kg Kadmium ditemukan kandungan Kadmium terbesar di dalam daun, batang dan akar pada Jabon diikuti oleh Mangium dan Trembesi. Sisa Kadmium di dalam tanah yang terkecil terdapat pada Jabon diikuti oleh Trembesi dan Mangium.

Mangium yang terpapar Seng memiliki BAF Seng pada daun dan batang mengalami penurunan secara tidak signifikan ( $\rho=95\%$ ) dibandingkan dengan kontrol, sedangkan BAF Seng pada akar Mangium meningkat tidak signifikan ( $\rho=95\%$ ) pada paparan selama 3 dan 5 bulan dan menurun secara signifikan ( $\rho=95\%$ ) setelah terpapar selama 4 bulan. Mangium dan Trembesi yang terpapar Nikel memiliki BAF Nikel pada daun dan batang kurang dari 1. Sementara BAF Nikel pada akar Mangium lebih dari 1 hanya terdapat pada paparan Nikel dengan konsentrasi 120 mg/kg selama 3 bulan dan 240 mg/kg selama 4 bulan. Sedangkan BAF Nikel pada akar Trembesi lebih dari 1 hanya terdapat pada paparan 120 mg/kg selama 3 dan 5 bulan serta 240 mg/kg selama 3 bulan. Mangium yang terpapar Nikel memiliki TF kurang dari 1 kecuali pada paparan 120 mg/kg Ni selama 4 dan 5 bulan serta 240 mg/kg Ni selama 5 bulan, sedangkan pada Trembesi memiliki TF kurang dari 1, kecuali pada paparan



120 mg/kg selama 4 bulan. Mangium, Jabon dan Trembesi memiliki BAF kadmium pada daun, batang dan akar lebih dari 1. Trembesi dan Mangium yang terpapar Kadmium memiliki TF kurang dari 1, kecuali pada paparan 2,5 mg/kg selama 4 bulan. Sedangkan Jabon memiliki TF lebih dari 1 pada paparan 2,5 mg/kg Kadmium selama 5 bulan dan paparan 5 mg/kg Kadmium selama 3 dan 5 bulan. Kemampuan sebagai fitoremediator Seng dengan konsentrasi 800 mg/kg hanya dimiliki oleh Mangium. Kinerja sebagai fitoremediator Nikel yang terbesar dalam mengakumulasi Nikel terdapat pada Trembesi diikuti oleh Mangium. Sementara kinerja fitoremediator Kadmium dalam mengakumulasi Kadmium yang terbesar terdapat pada Jabon diikuti oleh Trembesi dan Mangium.

Distribusi Seng pada Mangium yang terpapar 800 mg/kg Seng selama 3 dan 5 bulan dari yang tertinggi terdapat pada bagian akar diikuti oleh bagian batang kemudian bagian daun, sedangkan pada paparan Seng selama 4 bulan secara berturut-turut terdapat di bagian batang diikuti oleh bagian daun dan akar. Sementara distribusi Nikel baik pada paparan 120 mg/kg Ni maupun 240 mg/kg Ni terhadap Mangium dan Trembesi dari yang tertinggi terdapat di bagian akar diikuti oleh bagian batang kemudian bagian daun. Selanjutnya distribusi Kadmium di dalam Mangium dan Trembesi yang tertinggi secara signifikan terdapat pada bagian akar, sedangkan pada bagian daun dan batang memiliki perbedaan kandungan Kadmium yang tidak signifikan ( $p=95\%$ ), sehingga secara keseluruhan distribusi Kadmium terbesar terdapat pada bagian akar diikuti oleh bagian batang dan daun. Sedangkan pada Jabon yang terpapar Kadmium selama 3 dan 4 bulan memiliki distribusi tertinggi pada bagian akar diikuti oleh bagian batang kemudian bagian daun dan paparan selama 5 bulan pada bagian batang diikuti oleh akar dan daun.

Paparan Seng, Nikel dan Kadmium pada Mangium, Jabon dan Trembesi mengakibatkan peningkatan pada muatan total Seng, Nikel dan Kadmium di dalam organ. Muatan total Nikel terbesar di dalam tanaman terdapat pada Trembesi diikuti oleh Mangium, sedangkan muatan total Kadmium terbesar di dalam tanaman terdapat pada Jabon diikuti oleh Trembesi kemudian Mangium.

Efisiensi fitoremediasi yang dimiliki oleh Mangium dalam meremediasi paparan Seng selama 3 hingga 5 bulan adalah kurang dari 0,1 % yang sangat rendah dan tidak efisien. Sementara efisiensi fitoremediasi Nikel terbesar dengan konsentrasi 120 mg/kg dan 240 mg/kg Nikel selama 3 hingga 5 bulan terdapat pada Trembesi diikuti oleh Mangium.

Sedangkan efisiensi fitoremediasi 2,5 mg/kg dan 5 mg/kg Kadmium selama 3 hingga 5 bulan yang terbesar terdapat pada Jabon diikuti oleh Trembesi dan Mangium. Namun penggunaan Mangium, Jabon dan Trembesi untuk meremediasi paparan  $\leq 800$  mg/kg Seng, 120 mg/kg hingga 240 mg/kg Nikel dan 2,5 mg/kg hingga 5 mg/kg Kadmium pada tahap awal pertumbuhan hingga berumur kurang dari 6 bulan tidak efisien.

Remediasi menggunakan Mangium, Jabon dan Trembesi mengakibatkan terjadinya peningkatan ketersediaan fraksi Seng, Nikel dan Kadmium di dalam tanah. Disamping itu, ketersediaan fraksi Seng dan Kadmium juga mengalami peningkatan signifikan dengan semakin lama waktu remediasi, sedangkan pada ketersediaan fraksi Nikel mengalami peningkatan yang tidak signifikan. Kemampuan ketiga jenis tanaman tersebut dalam menurunkan ketersediaan fraksi Seng di dalam tanah yang terbesar terdapat pada Mangium diikuti oleh Jabon dan Trembesi, sedangkan terhadap paparan Nikel, Mangium dan Trembesi memiliki kemampuan yang serupa dalam menurunkan ketersediaan fraksi Nikel di dalam tanah. Sementara kemampuan remediasi terbesar dalam menurunkan ketersediaan fraksi Kadmium di dalam tanah terdapat pada Jabon diikuti oleh Trembesi kemudian Mangium.

Tanah terpapar Nikel setelah diremediasi oleh Mangium dan Trembesi serta tanah terpapar Kadmium setelah diremediasi oleh Trembesi dan Jabon mengalami perubahan pH yang tidak signifikan. Sedangkan pada tanah yang terpapar Seng dan Kadmium yang diremediasi oleh Mangium selama 5 bulan mengalami peningkatan pH yang signifikan ( $p=95\%$ ).

Berdasarkan hasil penelitian di atas maka dapat diketahui secara pasti bahwa Trembesi memiliki kemampuan sebagai fitoremediator Nikel serta Jabon yang juga memiliki kemampuan sebagai fitoremediator Kadmium dengan pertumbuhan yang baik dan kemampuan mengakumulasi Kadmium. Disisi lain adanya peluang untuk aplikasi Mangium sebagai tanaman rehabilitasi yang memiliki potensi untuk meningkatkan pH tanah yang terpapar Seng dan Kadmium.

Disarankan agar Pemerintah membuat kebijakan mengenai standar kualitas tanah atau batas logam yang diperbolehkan pada tanah sesuai dengan peruntukan lahan. Disamping itu wajib dibuat desain rehabilitasi lahan bekas tambang batubara yang mencakup Desain Fitoremediasi dengan melakukan pemilihan jenis tanaman berdasarkan kondisi fisik dan kimia tanah, jenis kontaminan, dominansi dan diversitas vegetasi yang ada di sekitar maupun

pada lahan tersebut serta kesesuaian dan kinerja tanaman tersebut. Selanjutnya pada tahap awal revegetasi lahan bekas tambang batubara adalah remediasi tanah baik sifat fisik dan kimia tanah untuk perbaikan kesuburan tanah dan pencegahan erosi maupun kandungan logam di dalam tanah yang melebihi ambang batas yang diperbolehkan menggunakan jenis tanaman Kehutanan cepat tumbuh yang bernilai ekonomis.

## SUMMARY

Coal mining activities grow very rapidly in Indonesia, which contribute to economic development. In the other side, those activities also has negative impact on the environment, such as flood, erosion and metal contamination in water, soil and air (EPA, 2000; WCI, 2009; WCA, 2011). Studies in Malaysia, India and Indonesia showed that the contaminated land in coal mining sites contain Cr, As, Mn, Fe, Pb, and Zn with low pH. Therefore, a technology to remove metals, as well as to reduce flood and erosion is needed (Maiti et al., 2004; Dowarah et al., 2009; Saidi dan Badruzsaufari, 2009; Wan Yaacob et al., 2009). Phytoremediation is a technology to remove, to transfer, to stabilize or to destruct contaminants either organic or inorganic substances in soil, sludge, and pool using vegetation (EPA, 2000; Komives and Gullner, 2006). Phytoremediation is a prospective technology to remedy a post coal mining land due to its effectiveness and efficiency. It is relatively inexpensive and does not need special skill to implement. Many plant species have potentials to perform as a phytoremediator for metals, although their abilities to absorb metal are varied. Selection of forest plant species for a phytoremediation purpose has several benefits such as deep and wide root system, high biomass productivity and high transpiration activity.

Many studies concerning metal phytoremediation using forest plant species have been conducted. However, specific studies concerning phytoremediation in post coal mining site is still lacking in Indonesia. A study on phytoremediation potentials of forest plant species found in post coal mining land in East Kalimantan, Indonesia as well as metal toxicity to plant, therefore needs to be undertaken. The originality of this study lies on the combination between plant analysis and metal phytotoxicity experiment to produce a design/model of post coal mining rehabilitation based on phytoremediation. It should be performed based on stage of identification and screening of physico-chemical properties of post coal mining land, contaminant types and concentration; stage of vegetation analysis according to dominance of local biodiversity; as well as stage of vegetation suitability and performance as a metal phytoremediator concerning plant growth and metal accumulation..

The objectives of the study were (1) to identify metal contents and physico-chemical properties of soil in ex coal mining land, (2) to identify the diversity of dominant forest plant

species in post coal mining site, and (3) to analyze the suitability of forest plant species found in ex coal mining site to accumulate metals and (4) to evaluate the phytoremediation performance of forest plant species based on metal toxicity and translocation. The results of this study are expected to have a contribution for technical standard of rehabilitation a post coal mining site by means of phytoremediation based on metal contamination level, plant species and land characteristics.

This study consisted of three main stages, i.e. (1) screening and identification of 10 metals in post coal mining sites and selection of the highest metal content in the soil which exceeded soil metal standard as well as analysis of soil physico-chemical properties; (2) screening and identification of dominant forest plant species grown in post coal mining site and evaluation to its suitability as metals phytoremediator; (3) evaluation of phytoremediation performance based on plant capability in absorbing metal for 3, 4, and 5 months.

Soil and plant sampling for plant suitability analysis were taken in post coal mining site belong to CV. Tujuh Tujuh. It was located on 117°11'20" to 117°12'32" BT and 00°27'08" to 00°27'59" LS, Samarinda City, Province of East Kalimantan, Indonesia. The composite soil samples were taken manually from 0 – 30 cm depth. Metal analysis used the top soil samples which were taken from the mining sites and back filling soil. For vegetation analysis and phytoremediation suitability, soil and plant organ samples were selected using 20 x 20 cm plots distributed in 8 hectares reclaimed area, as well as all forest plant species found in 1 hectares ex-overburden filled site. Plant organs including root, stem and leave were analyzed for the metal contents in 3 replications. The analysis of data include descriptive statistic, test of hypothesis (Two Way Anova, 3x3) (Gomez and Gomez, 1984) and curve fitting (Gompertz Curve) (Winsor, 1932), as well as non parametric statistic were employed such as Kruskal-Walis and Mann-Whitney Test (Gomez and Gomez, 1984).

The result showed that soils from post coal mining sites contain elevated level metal content i.e. As, Al, Cd, Cr, Fe, Pb, Ni and Zn, but only Zn, Ni and Cd content exceed soil quality standard (Amlinger et al., 2004; Ministry of Environmental Protection of Republic China, 1995; ANZECC, 1992 and Hungarian Governmental Regulation Number 10/2000). Soils from post coal mining sites have porosity in range of 49.16% - 54.18%, which are classified as normal porosity for plant growth (Lal and Shukla, 1994). Those soils also have bulk density in range of 1.29 g/cm<sup>3</sup> – 1.31 g/cm<sup>3</sup>, which are not in optimum condition but they

are still suitable for plant growth (Bendixen et al., 1948; Lal and Shukla, 1994; Pearson et al., 1995). Besides that, those soils have permeability in range of 7.75 – 15.29 cm/hr and sandy clay texture. Although the permeability and the texture are not in optimum condition, both are still suitable for plant growth (Hillel, 1998). It can be concluded that soils from post coal mining sites have suitable physical properties for plant growth although part of those properties are not in optimum condition for plant growth ((Bendixen et al., 1948; Pearson et al., 1995; Hillel, 1998; Lal and Shukla, 2004; Balitanah, 2005; USDA, 2008).

Soils chemical properties taken from post coal mining site are not fertile, that consist of acid pH ( $\text{CaCl}_2$ ), low organic matter, C and N content, high to extremely high  $\text{Na}^+$ , extremely low to low  $\text{K}^+$  and CEC, extremely low  $\text{Ca}^{2+}$ , P and S/N ratio, as well as moderate  $\text{Mg}^{2+}$ .

Several treatments can be applied to improve soil physico-chemical properties from post coal mining sites. They consist of organic matter application such as hay and saw dust (Eusufzai et al., 2007), addition of organic fertilizer such as manure (Bandyopadhyay et al., 2009; Pérez-Esteban et al., 2015), practice of irrigation and plowing (Bandyopadhyay et al., 2009), as well as dolomite lime application to improve soil pH (Zulkarnain, 2014).

Forest plant species found in post coal mining site were *Acacia mangium* Willd. (mangium), *Trema* sp, *Macaranga gigantea* (Reichb.f.& Zoll.) (Mahang), *Terminalia cattapa* L. (Ketapang), *Pometia pinnata* J.R. & G. Forst. (Matoa), *Mangifera indica* L. (Mangga), *Samanea saman* (Jacq.) Merr. (Trembesi) *Arthocarpus Integra* Merr. (Nangka) dan *Anthocephalus cadamba* (Roxb.) Miq. (Jabon). A post coal mining area had a homogenous diversity for forest plant species with several dominant species belong to *A. mangium* (Mangium), *A. cadamba* (Jabon) dan *S. saman* (Trembesi).

A post coal mining land rehabilitation by direct plantation of adaptive trees species will shorten the succession time. Good plants growth will create an optimum condition for seed germination and with a helped of bird will make a new trees species grow through a natural succession (Yassir and Sitepu, 2014). The succession will recover habitat for animals, either small animal such as insect species untill bigger animal, and finally it will recover biodiversity.

Mangium and Jabon found on the post coal mining site had BAF for Zn > 1. Plant which had the highest BAF for Zn i.e. Mangium, followed by Jabon and then Trembesi. Whereas BAF for Cd > 1 is only Mangium. It was indicated that Mangium was the only plant

accumulated Cd in the organs. Those three plants had BAF for Ni  $> 1$ . It indicated that Mangium, Jabon and Trembesi accumulated Ni in their organs. The highest BAF for Ni was found in Mangium, followed by Trembesi, and then Jabon. Those plants had TF for Zn more than 1, whereas TF for Ni more than 1 is only Trembesi and TF for Cadmium more than 1 was found on Jabon and Mangium. Mangium and Jabon had an ability to accumulate Zn in the shoot and Ni in the root. Meanwhile Trembesi only accumulated Ni in the shoot and Mangium was the only species that accumulated Cd in the shoot. It can be concluded that plant species suitable as phytoremediator for Zn, Ni and Cd on post coal mining land were Mangium, followed by Jabon, and then Trembesi.

Toxicity level for Zn, Ni and Cd on Mangium, Jabon and Trembesi was as follow: Zn concentration  $\geq 800$  mg/kg  $>$  Ni concentration  $\geq 120$  mg/kg  $>$  Cd concentration  $\leq 5$  mg/kg. Contamination of  $> 800$  mg/kg Zn to those plants caused death on Jabon and Trembesi as well as a decrease on height of Mangium. It also caused significant decreases on leaf, stem and root biomass of Mangium along with an increase in contamination time. Meanwhile plants contaminated by Ni, Trembesi, followed by Mangium had the highest height and biomass. The highest height and biomass due to Cd contamination was found on Jabon, followed by Trembesi, and then Mangium.

Mangium, which was contaminated by Zn, had a decrease of BAF on its shoot; although statistically, it was not significant compared to control. Whereas Zn contamination on Mangium's root caused an increase on BAF for 3 and 5 months exposures and a decrease of BAF for 4 months exposure. Meanwhile, Ni contamination to Mangium and Trembesi caused BAF on its shoot less than 1. In contrast to Mangium's root which had BAF  $> 1$  because of 120 mg/kg Ni contamination for 3 months and 240 mg/kg Ni contamination for 4 months; as well as Trembesi's root which had BAF  $> 1$  because of 120 mg/kg Ni contamination for 3 and 5 months and 240 mg/kg Ni contamination for 3 months. Ni translocation from root to shoot on Mangium and Trembesi was showed by TF  $< 1$ , except for contamination of 120 mg/kg Ni for 4 and 5 months and 240 mg/kg Ni for 5 months on Mangium as well as contamination of 120 mg/kg Ni for 4 months on Trembesi. On the contrary to Cd contamination on Mangium, Jabon and Trembesi, it caused BAF  $> 1$  on the shoot and root of those plants. Cd translocation by Trembesi and Mangium were showed by TF  $< 1$  except for 2.5 mg/kg Cd contamination for 4 months on Mangium, whereas Jabon had TF  $> 1$  on 2.5 mg/kg Cd contamination for 5

months and 5 mg/kg Cd contamination for 3 and 5 months. It can be concluded that Mangium was the only plant which accumulate Zn in the organ. Meanwhile, plant species with the best performance concerning Ni accumulation in the organ was Trembesi followed by Mangium. Phytoremediator performance, in term of the highest Cd accumulation in plant organs was found in Jabon, and then followed by Trembesi and Mangium.

The highest Zn distribution on Mangium, which was caused by contamination of 800 mg/kg Zn for 3 and 5 months was found in root > stem > leaf, whereas contamination of Zn for 4 months was in stem > leaf > root. Meanwhile the highest Ni distribution on Mangium and Trembesi was in root > stem > leaf for whole treatments. Similar to Ni contamination, Mangium and Trembesi which were contaminated by Cd, had the highest Cd distribution in root > stem > leaf. Jabon had the highest Cd distribution in root > stem > leaf for 3 and 4 months Cd contamination and on Cd contamination for 5 months, the highest Cd distribution was found in stem > root > leaf.

Contamination of Zn, Ni, and Cd increased total load of those metals in organ of Mangium, Jabon and Trembesi. The highest load of total Ni in plant was found in Trembesi, whereas total load of Cd in plant was found in Jabon, then followed by Trembesi and Mangium.

Efficiency in phytoremediation is determined by total removal of metal by plants. Mangium had efficiency less than 0.1% in remediation of Zn contamination for 3 until 5 months. The highest efficiency in remediation of 120 and 240 mg/kg Ni contamination for 3 until 5 months was belong to Trembesi, as well as efficiency in remediation of 2.5 and 5 mg/kg Cd contamination for 3 until 5 months was belonged to Jabon, then followed by Trembesi. However, utilization of Mangium, Jabon and Trembesi to remedy Zn, Ni and Cd contaminated soil in the early stage of their growth until less than 6 months were not efficient.

Zn, Ni and Cd contaminated soil after remediated using Mangium, Jabon and Trembesi had a significant ( $p=95\%$ ) increase on available fractions of Zn, Ni and Cd in the soil. The greatest performance as phytoremediator concerning reduction on available fraction of Zn in soil was belonged to Mangium, whereas Mangium and Trembesi had similar performance as phytoremediators to reduce available fraction of Ni in soil. The best performance as phytoremediators to reduce available fraction of Cd in soil was belong to Jabon > Trembesi > Mangium.



Ni contaminated soil after remediated using Mangium and Trembesi, as well as Cd contaminated soil after remediated using Trembesi and Jabon had non-significant changes on soil pH. Meanwhile Zn and Cd contaminated soil after remediated using Mangium for 5 months had a significant ( $p=95\%$ ) increase on soil pH.

Based on the result, it can be concluded that *Acacia mangium* (Mangium) was the only species performing as a Zn phytoremediator. The best performance as a Ni phytoremediator was shown by *Samanea saman* (Trembesi), and then followed by *Acacia mangium* (Mangium). Meanwhile, the best Cd phytoremediator was belong to *Anthocephalus cadamba* (Jabon) > *Samanea saman* (Trembesi) > *Acacia mangium* (Mangium).

Implementation of the design of post coal mining rehabilitation based on metal phytoremediation has given new information regarding capability of Trembesi and Jabon as a potential phytoremediator of Ni and Cd respectively. Besides that, Mangium plantation in the Zn and Cd contaminated soil has a potential to improve soil pH.

It is recommended that The Indonesian Government should issue a regulation concerning maximum allowable metal concentration in soil. Beside that a design for rehabilitation of post coal mining soil based on metal phytoremediation should be made.

## DAFTAR SINGKATAN

<i>A. cadamba</i>	: <i>Anthocephalus cadamba</i> (Roxb.) Miq. (Jabon)
<i>A. mangium</i>	: <i>Acacia mangium</i> Willd. (Mangium)
<i>S. saman</i>	: <i>Samanea saman</i> (Jacq.) Merr.(Trembesi)
AAS	: <i>Atomic Absorption Spectrophotometer</i>
Al	: Aluminium
AMD	: <i>Acid Mined Drainage</i> / Air Tambang Asam
As	: Arsen
BAF	: <i>Bioaccumulation Factor</i> / Faktor Bioakumulasi
C	: <i>Calcium</i> / Kalsium
CaCl <sub>2</sub>	: Kalsium Klorida
Cd	: <i>Cadmium</i> / Kadmium
Co	: <i>Cobalt</i> / Kobalt
Cr	: <i>Chromium</i> / Krom
Cu	: <i>Cuprum</i> / Perak
DA	: <i>Disposal Area</i>
DAS	: Daerah Aliran Sungai
Fe	: <i>Ferrum</i> / Besi
HCl	: Asam Klorida
Hg	: Raksa
HNO <sub>3</sub>	: Asam Nitrat
INP	: Indeks Nilai Penting
K	: Kalium
KBNK	: Kawasan Budidaya Non Kehutanan
KP	: Karya Pertambangan
KTK	: Kapasitas Tukar Kation
LOI	: <i>Loss of Ignition</i>
Mg	: Magnesium
Mn	: Mangan

N	: Nitrogen
Na	: Natrium
Ni	: <i>Nickel</i> / Nikel
OB	: <i>Overburden-filled soil</i> /Lahan bekas Timbunan
P	: <i>Phospor</i> / Fosfor
PAD	: Pendapatan Asli Daerah
Pb	: <i>Plumbum</i> / Timbal
PKP2B2	: Perjanjian Kerjasama Pengusahaan Pertambangan Batubara
RE	: <i>Removal Efficiency</i>
RTRWP	: Rencana Tata Ruang Wilayah Provinsi
SDR	: <i>Summed Dominance Ratio</i>
Se	: Selenium
TF	: <i>Translocation Factor</i>
Zn	: <i>Zinc</i> / Seng

## GLOSARIUM

AAS adalah instrument yang digunakan untuk mengukur kadar logam pada suatu produk dalam skala ppm (part per million) yang dilengkapi dengan jenis lampu logam yang bervariasi sesuai dengan jenis logam yang diuji.

Bahan organik adalah fraksi organik pada tanah yang berasal dari sisa-sisa hewan dan tanaman yang tidak membusuk, disebut juga sebagai humus

Bobot isi tanah adalah berat kering tanah per unit volume tanah

Diversitas tumbuhan adalah keragaman jenis tumbuhan

Dominansi adalah tingkat penguasaan jenis tumbuhan tertentu terhadap suatu komunitas tumbuhan

Efisiensi fitoremediasi adalah persentase kemampuan tanaman dalam mengurangi logam pada jangka waktu tertentu.

Faktor Bioakumulasi (BAF) adalah Faktor yang digunakan untuk menyatakan kemampuan tanaman dalam mengakumulasi kontaminan pada organ tubuh dari media tanam

Faktor Translokasi (TF) adalah faktor yang digunakan untuk menyatakan kemampuan tanaman untuk menyerap kontaminan melalui akar dan kemudian mentranslokasikannya dari akar ke organ bagian atas tanaman

Frekuensi adalah besarnya intensitas diketemukannya suatu spesies organisme dalam pengamatan keberadaan organisme pada komunitas atau ekosistem

Indeks Dominansi adalah parameter yang digunakan untuk menyatakan tingkat terpusatnya dominansi spesies dalam suatu komunitas

Indeks Keragaman adalah ciri tingkatan komunitas berdasarkan organisasi biologi untuk menyatakan struktur dan stabilitas komunitas

Indeks Nilai Penting adalah parameter kuantitatif yang dapat dipakai untuk menyatakan tingkat dominansi (tingkat penguasaan) spesies-spesies dalam suatu komunitas tumbuhan

Kapasitas Tukar Kation (KTK) adalah sebuah pengukuran terhadap kemampuan tanah untuk menahan kation

Kejenuhan basa adalah jumlah kation dasar yang menempati lokasi pertukaran kation, dibagi oleh total KTK

Kerapatan vegetasi adalah jumlah individu perunit luas atau perunit volume

Kesesuaian tanaman untuk fitoremediasi adalah kemampuan tanaman untuk bertahan hidup pada lahan terkontaminasi dan memiliki kemampuan menyerap logam untuk digunakan sebagai remediator

Kinerja fitoremediasi adalah evaluasi terhadap kemampuan tanaman dalam bertahan hidup serta dalam mengakumulasi kontaminan di dalam organ tubuhnya yang ditentukan berdasarkan kandungan logam, muatan logam dan efisiensi remediasi

Kinerja tanaman dalam fitoremediasi adalah evaluasi terhadap kemampuan tanaman dalam menyerap logam berdasarkan kandungan logam di dalam tanaman dan sisa logam di dalam tanah serta kemampuan tanaman untuk tumbuh dengan baik

Luas penutupan (*coverage*) adalah proporsi antara luas tempat yang ditutupi oleh spesies tumbuhan dengan luas total habitat

Permeabilitas tanah adalah sifat tanah untuk mengalirkan air dan udara

pH adalah parameter yang menyatakan tingkat kemasaman tanah

Porositas tanah adalah fraksi pada jumlah volume tanah yang diambil melalui ruang pori yang menyatakan kuantifikasi jumlah ketersediaan ruang untuk cairan di dalam tubuh tanah

SDR adalah perbandingan antara INP dengan jumlah parameter penyusun INP

Tanah kontrol adalah tanah yang tidak digunakan sebagai lokasi pertambangan batubara dan tidak terkontaminasi logam atau tanah yang tidak diberi perlakuan pemberian logam buatan

Tanah Overburden atau timbunan adalah lapisan tanah dan bebatuan yang menutupi lapisan batubara di mana merupakan tanah pengisi (*back-filling soil*) lubang bekas galian batubara setelah batubara di ambil

Toksisitas adalah tingkat di mana suatu senyawa beracun dapat membahayakan makhluk hidup

Unsur makro adalah unsur atau senyawa yang diperlukan dalam jumlah besar dan penting untuk pertumbuhan tanaman

Unsur mikro adalah unsur atau senyawa kimia yang diperlukan dalam jumlah kecil pertumbuhan dan perkembangan normal pada makhluk hidup

## DAFTAR ISI

UCAPAN TERIMAKASIH .....	I
ABSTRAK .....	V
ABSTRACT .....	VI
RINGKASAN .....	VII
SUMMARY .....	XV
DAFTAR SINGKATAN .....	XXI
GLOSARIUM .....	XXIII
DAFTAR ISI .....	XXV
DAFTAR TABEL .....	XXVIII
DAFTAR GAMBAR .....	XXX
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1. LATAR BELAKANG .....	1
1.2. PERTANYAAN PENELITIAN .....	6
1.3. ORISINALITAS .....	7
1.4. TUJUAN PENELITIAN .....	13
1.4.1. Tujuan Mayor .....	13
1.4.2. Tujuan Minor .....	13
1.5. MANFAAT PENELITIAN .....	13
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>15</b>
2.1. FITOREMEDIASI .....	15
2.1.1. Definisi Fitoremediasi .....	15
2.1.2. Keunggulan dan kelemahan Metode Fitoremediasi .....	15
2.1.3. Desain Fitoremediasi .....	17
2.2. TOKSISITAS LOGAM PADA TUMBUHAN DAN HEWAN .....	28
2.3. REGULASI DAN BAKU MUTU LOGAM DI DALAM TANAH .....	30
2.4. DESKRIPSI LOGAM DAN TANAMAN .....	32
2.4.1. Deskripsi Seng (Zn), Nikel (Ni) dan Kadmium (Cd) .....	32
2.4.2. Deskripsi <i>Acacia mangium</i> (Mangium), <i>Anthocephalus cadamba</i> (Jabon) dan <i>Samanea saman</i> (Trembesi) .....	36

2.5. PERTAMBANGAN BATUBARA .....	42
2.6. KANDUNGAN BATUBARA .....	45
2.7. ASPEK LINGKUNGAN PENAMBANGAN BATUBARA .....	46
2.8. KASUS-KASUS PENCEMARAN AKIBAT PERTAMBANGAN BATUBARA (DI DUNIA DAN DI INDONESIA).....	49
2.9. KEBIJAKAN REKLAMASI LAHAN BEKAS PERTAMBANGAN BATUBARA .....	52
2.9.1. Kewajiban pasca Penambangan .....	53
2.9.2. Kebijakan tentang Reklamasi dan Revegetasi pada Lahan Bekas Tambang Batubara .....	54
2.10. GAMBARAN UMUM LOKASI PERTAMBANGAN BATUBARA CV. TUJUH TUJUH .....	56
2.10.1. Profil Perusahaan CV. TujuhTujuh .....	56
2.10.2. Kondisi Biofisik Lokasi Pertambangan .....	57
<b>BAB III KERANGKA TEORI, KERANGKA KONSEP DAN HIPOTESIS .....</b>	<b>59</b>
3.1. KERANGKA TEORI .....	59
3.2. KERANGKA KONSEP .....	61
3.3. HIPOTESIS .....	63
3.3.1. Hipotesis Mayor .....	63
3.3.2. Hipotesis Minor .....	63
<b>BAB IV METODE PENELITIAN .....</b>	<b>65</b>
4.1. TEMPAT DAN WAKTU PENELITIAN .....	65
4.2. DESAIN PENELITIAN .....	68
4.3. POPULASI DAN SAMPEL .....	68
4.4. VARIABEL PENELITIAN .....	70
4.5. MATERI PENELITIAN .....	71
4.6. TEKNIK PENGUMPULAN DATA .....	71
4.6.1. Penelitian Pendahuluan .....	72
4.6.2. Penelitian Utama .....	79
4.7. PENGOLAHAN DAN ANALISIS DATA .....	85
<b>BAB V HASIL PENELITIAN DAN BAHASAN .....</b>	<b>87</b>
5.1. HASIL PENELITIAN .....	87
5.1.1. Gambaran Umum Lokasi Penelitian .....	87

5.1.2. Kandungan Logam, Sifat Fisik dan Kimia Tanah pada Lahan Bekas Tambang Batubara di Kota Samarinda .....	88
5.1.3. Analisis Vegetasi pada Lahan Bekas Tambang Batubara .....	94
5.1.4. Kesesuaian Jenis Vegetasi Kehutanan yang Ditemukan pada Lahan Bekas Tambang Batubara dalam Mengakumulasi Logam .....	96
5.1.5. Kinerja Tanaman Kehutanan sebagai Fitoremediator Logam .....	100
5.2. BAHASAN .....	238
5.2.1. Kandungan Logam, Sifat Fisik dan Kimia Tanah pada Lahan Bekas Tambang Batubara di Kota Samarinda .....	238
5.2.2. Analisis Vegetasi pada Lahan Bekas Tambang Batubara .....	250
5.2.3. Kesesuaian Jenis Vegetasi Kehutanan yang Ditemukan pada Lahan Bekas Tambang Batubara dalam Mengakumulasi Logam .....	257
5.2.4. Kinerja Tanaman Kehutanan sebagai Fitoremediator Logam .....	261
5.2.5. Mekanisme Fitoremediasi Seng (Zn), Nikel (Ni) dan Kadmium (Cd) pada Lahan Bekas Tambang Batubara menggunakan Vegetasi Jenis Kehutanan .....	329
5.2.6. Aplikasi Pemilihan Jenis untuk Rehabilitasi Lahan Bekas Tambang Batubara .....	337
5.2.7. Keterbatasan Penelitian Kesesuaian dan Kinerja Tanaman Kehutanan sebagai Fitoremediator Logam pada Lahan Bekas Tambang Batubara .....	343
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN .....	345
6.1. KESIMPULAN .....	345
6.2. SARAN .....	346
DAFTAR PUSTAKA .....	349



## DAFTAR TABEL

Tabel 1.	Keunggulan dan Kelemahan Metode Fitoremediasi .....	16
Tabel 2.	Sifat Kimia Tanah untuk Tujuan Pertanian .....	19
Tabel 3.	Toksisitas Logam pada Tumbuhan dan Hewan .....	29
Tabel 4.	Baku Mutu Batas Logam yang Diperbolehkan di Dalam Tanah .....	30
Tabel 5.	Standar Baku Mutu Logam pada Tanah di Jepang .....	30
Tabel 6.	Batas yang Diperbolehkan bagi Beberapa Jenis Logam yang Berada di Dalam Tanah (ppm) di Beberapa Negara .....	30
Tabel 7.	Konsentrasi Logam Maksimum yang Diperbolehkan pada Tanah Pertanian (ppm) .....	31
Tabel 8.	Kisaran Nilai Konsentrasi Unsur Mikro pada Jaringan Daun Dewasa .....	31
Tabel 9.	Kisaran Konsentrasi untuk Logam yang Ditemukan pada Jaringan Tanaman Normal .....	31
Tabel 10.	Matriks Definisi Operasional Variabel .....	70
Tabel 11.	Teknik Pengumpulan Data Primer .....	74
Tabel 12.	Perbandingan Logam yang Ditemukan di Lahan Bekas Tambang Batubara dengan Standar Batas Logam yang Diperbolehkan .....	91
Tabel 13.	Sifat Fisik Tanah Pembanding (Bukan Bekas Tambang) dan Tanah pada Lahan Bekas Tambang Batubara .....	92
Tabel 14.	Sifat Kimia Tanah Pembanding (Bukan Bekas Tambang) dan Tanah pada Lahan Bekas Tambang Batubara .....	93
Tabel 15.	Analisis Vegetasi pada Lahan Bekas Tambang Batubara .....	95
Tabel 16.	Persamaan Estimasi Pertumbuhan <i>Acacia mangium</i> (Mangium), <i>Anthocephalus cadamba</i> (Jabon) dan <i>Samanea saman</i> (Trembesi) ...	102
Tabel 17.	Ilustasi Keseimbangan Aliran Logam pada Percobaan Laboratorium .....	336
Tabel 18.	Matriks Rekomendasi Jenis Vegetasi Kehutanan sebagai Fitoremediator Seng (Zn), Nikel (Ni) dan Kadmium (Cd) dan Tanaman Rehabilitasi pada Lahan Bekas Tambang Batubara .....	341
Tabel 19.	Penelitian Terkait dengan Fitoremediasi Logam .....	375
Tabel 20.	Pertumbuhan Mangium yang Terpapar Zn, Ni dan Cd mulai dari Minggu ke-0 hingga Minggu ke-20 .....	382

Tabel 21. Pertumbuhan Trembesi yang Terpapar Zn, Ni dan Cd mulai dari Minggu ke-0 hingga Minggu ke-20 .....	384
Tabel 22. Pertumbuhan Jabon yang Terpapar Zn, Ni dan Cd mulai dari Minggu ke-0 hingga Minggu ke-20 .....	386
Tabel 23. Rata-Rata Curah Hujan, Penyinaran Matahari dan Hari Hujan Kota Samarinda 2013 .....	388
Tabel 24. Rata-Rata Suhu Udara dan Kelembaban Kota Samarinda 2013.....	388

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Penyerapan Polutan pada Tanaman dalam Proses Fitoremediasi...	20
Gambar 2.	Pohon Mangium berusia 2 Tahun yang Ditanam dengan Jarak 3x3 m .....	36
Gambar 3.	Jabon yang Ditanam untuk Rehabilitasi Lahan Bekas Tambang Batubara .....	39
Gambar 4.	Jabon Berusia 4 Tahun .....	40
Gambar 5.	Trembesi yang Ditanam dengan Jarak 4x4 m Digunakan sebagai Tanaman Revegetasi dalam Reklamasi Tambang Batubara .....	41
Gambar 6.	Kerangka Teori Penelitian .....	59
Gambar 7.	Kerangka Konsep Penelitian .....	62
Gambar 8.	Peta Lokasi Penelitian .....	67
Gambar 9.	Tahapan Penelitian Fitoremediasi Logam menggunakan Tanaman Kehutanan pada Lahan Bekas Tambang Batubara .....	73
Gambar 10.	Bagan Sampling Plot untuk Analisis Dominansi dan Diversitas Pada Lahan Reklamasi .....	77
Gambar 11.	Bagan Tahap Kinerja Fitoremediasi .....	79
Gambar 12.	Bagan Perlakuan terhadap Tanah Mangium, Jabon dan Trembesi.....	82
Gambar 13.	Kandungan Logam di Dalam Tanah pada Lahan Bekas Tambang Batubara .....	90
Gambar 14.	Kandungan Seng (Zn), Nikel (Ni) dan Kadmium (Cd) pada <i>Acacia mangium</i> (Manigum), <i>Anthocephalus cadamba</i> (Jabon), dan <i>Samanea saman</i> (Trembesi) yang Tumbuh pada Lahan Bekas Tambang Batubara .....	98
Gambar 15.	Faktor Bioakumulasi (BAF) dan Faktor Translokasi (TF) pada <i>A. mangium</i> (Manigum), <i>A. cadamba</i> (Jabon), dan <i>S. saman</i> (Trembesi) yang Tumbuh pada Lahan Bekas Tambang Batubara .....	100
Gambar 16.	Kurva Pertumbuhan Tinggi <i>Acacia mangium</i> (Mangium) Terpapar Seng (Zn) .....	103
Gambar 17.	Kurva Pertumbuhan Tinggi <i>Acacia mangium</i> (Mangium) dan <i>Samanea saman</i> (Trembesi) yang Terpapar Nikel (Ni) .....	105
Gambar 18.	Kurva Pertumbuhan Tinggi <i>Acacia mangium</i> (Manigum),	

	<i>Anthocephalus cadamba</i> (Jabon), dan <i>Samanea saman</i> (Trembesi) yang Terpapar Kadmium (Cd) .....	107
Gambar 19.	Biomasa Daun, Batang dan Akar <i>Acacia mangium</i> (Mangium) Terpapar Seng (Zn) .....	110
Gambar 20.	Biomasa Daun, Batang, dan Akar <i>Acacia mangium</i> (Mangium) Terpapar Nikel (Ni) .....	112
Gambar 21.	Biomasa Daun, Batang, dan Akar <i>Samanea saman</i> (Trembesi) Terpapar Nikel (Ni) .....	114
Gambar 22.	Biomasa Daun, Batang, dan Akar <i>Acacia mangium</i> (Mangium) Terpapar Kadmium (Cd) .....	117
Gambar 23.	Biomasa Daun, Batang, dan Akar <i>Anthocephalus cadamba</i> (Jabon) Terpapar Kadmium (Cd) .....	120
Gambar 24.	Biomasa Daun, Batang, dan Akar <i>Samanea saman</i> (Trembesi) Terpapar Kadmium (Cd) .....	122
Gambar 25.	Kandungan Seng (Zn) di Dalam Organ <i>Acacia mangium</i> (Mangium) .....	125
Gambar 26.	Kandungan Nikel (Ni) di Dalam Organ <i>Acacia mangium</i> (Mangium) .....	129
Gambar 27.	Kandungan Nikel (Ni) di Dalam Organ <i>Samanea saman</i> (Trembesi) .....	133
Gambar 28.	Kandungan Kadmium (Cd) di Dalam Organ <i>Acacia mangium</i> (Mangium) .....	138
Gambar 29.	Kandungan Kadmium (Cd) di Dalam Organ <i>Anthocephalus Cadamba</i> (Jabon) .....	144
Gambar 30.	Kandungan Kadmium (Cd) di Dalam Organ <i>Samanea saman</i> (Trembesi) .....	149
Gambar 31.	Sisa Seng (Zn) di Tanah setelah Diremediasi <i>Acacia mangium</i> (Mangium).....	153
Gambar 32.	Sisa Nikel (Ni) di Tanah setelah Diremediasi <i>Acacia mangium</i> (Mangium) dan <i>Samanea saman</i> (Trembesi) .....	154
Gambar 33.	Sisa Kadmium (Cd) di Tanah setelah Diremediasi <i>Acacia mangium</i> (Manigum), <i>Anthocephalus cadamba</i> (Jabon), dan <i>Samanea saman</i> (Trembesi).....	158
Gambar 34.	Faktor Bioakumulasi (BAF) Seng (Zn) pada <i>Acacia mangium</i> (Mangium) .....	163
Gambar 35.	Faktor Translokasi (TF) Seng (Zn) di Dalam <i>Acacia mangium</i> (Mangium) .....	164

Gambar 36. Distribusi Seng (Zn) di Dalam Organ <i>Acacia mangium</i> (Mangium).....	165
Gambar 37. Faktor Bioakumulasi (BAF) Nikel pada Daun dan Batang serta Akar <i>Acacia mangium</i> (Mangium) .....	167
Gambar 38. Faktor Translokasi (TF) Nikel (Ni) di dalam <i>Acacia mangium</i> (Mangium) .....	168
Gambar 39. Distribusi Nikel (Ni) di Dalam Organ <i>Acacia mangium</i> (Mangium) .....	169
Gambar 40. Faktor Bioakumulasi (BAF) Ni pada Daun dan Batang serta Akar <i>Samanea saman</i> (Trembesi) .....	173
Gambar 41. Faktor Translokasi (TF) Nikel (Ni) di dalam <i>Samanea saman</i> (Trembesi) .....	174
Gambar 42. Distribusi Nikel (Ni) di Dalam Organ <i>Samanea saman</i> (Trembesi) ...	176
Gambar 43. Faktor Bioakumulasi (BAF) Kadmium pada Daun dan Batang serta Akar <i>Acacia mangium</i> (Mangium) .....	179
Gambar 44. Faktor Translokasi (TF) Kadmium (Cd) di dalam <i>Acacia mangium</i> (Mangium) .....	181
Gambar 45. Distribusi Kadmium (Cd) di Dalam Organ <i>Acacia mangium</i> (Mangium).....	183
Gambar 46. Faktor Bioakumulasi (BAF) Kadmium (Cd) pada Daun dan Batang serta Akar <i>Anthocephalus cadamba</i> (Jabon).....	186
Gambar 47. Faktor Translokasi (TF) Kadmium (Cd) di dalam <i>Anthocephalus cadamba</i> (Jabon) .....	187
Gambar 48. Distribusi Kadmium (Cd) di Dalam Organ <i>Anthocephalus cadamba</i> (Jabon) .....	189
Gambar 49. Faktor Bioakumulasi (BAF) Kadmium pada Daun dan Batang, serta Akar <i>Samanea saman</i> (Trembesi) .....	192
Gambar 50. Faktor Translokasi (TF) Kadmium (Cd) di dalam <i>Samanea saman</i> (Trembesi).. .....	194
Gambar 51. Distribusi Kadmium (Cd) di Dalam Organ <i>Samanea saman</i> (Trembesi)..	196
Gambar 52. Muatan Total Seng (Zn) di dalam <i>Acacia mangium</i> (Mangium) .....	200
Gambar 53. Muatan Total Nikel di Dalam <i>Acacia mangium</i> (Mangium) dan <i>Samanea saman</i> (Trembesi) .....	202
Gambar 54. Muatan Total Kadmium (Cd) di Dalam <i>Acacia mangium</i> (Mangium), <i>Anthocephalus cadamba</i> (Jabon), dan <i>Samanea saman</i> (Trembesi) .....	206
Gambar 55. Efisiensi Fitoremediasi Seng (Zn) menggunakan <i>Acacia mangium</i> (Mangium) .....	210
Gambar 56. Efisiensi Fitoremediasi Nikel menggunakan <i>Acacia mangium</i>	

(Mangium)	211
dan <i>Samanea saman</i> (Trembesi) .....	
Gambar 57. Efisiensi Fitoremediasi Kadmium (Cd) menggunakan <i>Acacia mangium</i> (Mangium), <i>Anthcephalus. cadamba</i> (Jabon) dan <i>Samanea saman</i> (Trembesi) .....	214
Gambar 58. Ketersediaan Fraksi Seng (Zn) di Dalam Tanah yang Diremediasi <i>Acacia mangium</i> (Mangium).....	219
Gambar 59. Ketersediaan fraksi Nikel setelah Diremediasi Menggunakan <i>Acacia mangium</i> (Mangium) dan <i>Samanea saman</i> (Trembesi).....	221
Gambar 60. Ketersediaan Fraksi Kadmium (Cd) di Dalam Tanah yang Diremediasi Menggunakan <i>Acacia mangium</i> (Mangium), <i>Anthocephalus cadamba</i> (Jabon) dan <i>Samanea saman</i> (Trembesi) .....	224
Gambar 61. pH pada Tanah yang terpapar Seng (Zn) setelah Diremediasi oleh <i>Acacia mangium</i> (Mangium).....	230
Gambar 62. pH pada Tanah yang Terpapar Nikel setelah Diremediasi oleh <i>Acacia mangium</i> (Mangium) dan <i>Samanea saman</i> (Trembesi).....	231
Gambar 63. pH pada Tanah yang Terpapar Kadmium (Cd) setelah Diremediasi oleh <i>Acacia mangium</i> (Mangium), <i>Anthocephalus cadamba</i> (Jabon) dan <i>Samanea saman</i> (Trembesi) .....	234
Gambar 64. Mekanisme fitoremediasi Logam pada Lahan Bekas Tambang Batubara Menggunakan Tanaman .....	330
Gambar 65. Diagram Aplikasi Desain Fitoremediasi Logam di lapangan untuk Rehabilitasi Lahan Bekas Tambang Batubara .....	339