

**PENGELOLAAN AIR ASAM TAMBANG PADA SISTEM LAHAN
BASAH BUATAN (*CONSTRUCTED WETLAND*) DENGAN
MENGUNAKAN TANAMAN ECENG GONDOK (*Eichhornia crassipes*)
DAN PENAMBAHAN BAHAN ORGANIK**

SKRIPSI

Disusun Oleh:

Fitri Arum Sekarjannah

134150222



**JURUSAN AGROTEKNOLOGI
FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN"
YOGYAKARTA
2019**

**PENGELOLAAN AIR ASAM TAMBANG PADA SISTEM LAHAN
BASAH BUATAN (*CONSTRUCTED WETLAND*) DENGAN
MENGUNAKAN TANAMAN ECENG GONDOK (*Eichhornia crassipes*)
DAN PENAMBAHAN BAHAN ORGANIK**

SKRIPSI

Skripsi disusun sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar Sarjana Pertanian dari
Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta

Disusun Oleh:

Fitri Arum Sekarjannah

134150222



**JURUSAN AGROTEKNOLOGI
FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN"
YOGYAKARTA
2019**

LEMBAR PENGESAHAN

Judul Penelitian : Pengelolaan Air Asam Tambang pada Sistem Lahan Basah Buatan (*Constructed Wetland*) dengan Menggunakan Tanaman Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes*) dan Penambahan Bahan Organik

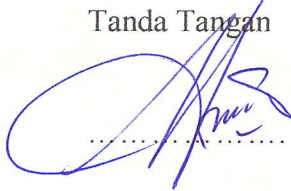
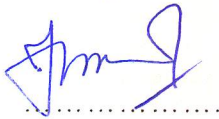
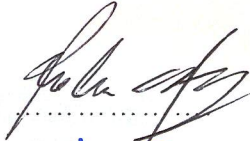
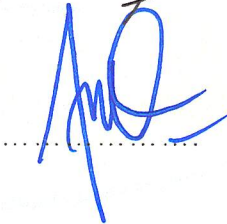
Nama Mahasiswa : Fitri Arum Sekarjannah

Nomor Mahasiswa : 134150222

Program Studi : Agroteknologi

Tanggal Ujian : 4 Maret 2019

Menyetujui,

	Tanda Tangan	Tanggal
Pembimbing I Dr. Ir. S. Setyo Wardoyo, MS.		15/3 19
Pembimbing II Dr. Ir. Yanisworo WR, M.Si.		12/3 19
Penelaah I Dr. Ir. Miseri Roeslan Afany, MP.		12/3 19
Penelaah II R. Agus Widodo, SP, MP.		12/3 19

Fakultas Pertanian UPN "Veteran" Yogyakarta

Dekan

Partoyo, SP., MP., Ph.D.

Tanggal:

Pengelolaan Air Asam Tambang pada Sistem Lahan Basah Buatan (*Constructed Wetland*) dengan Menggunakan Tanaman Eceng Gondok (*Eichhornia Crassipes*) dan Penambahan Bahan Organik

Oleh: Fitri Arum Sekarjannah

Dibimbing oleh: S. Setyo Wardoyo dan Yanisworo WR

ABSTRAK

Pertambangan batubara adalah kegiatan untuk mengeksploitasi suatu lahan untuk mendapatkan batubara yang tersimpan di bawah permukaan tanah. Pertambangan dapat menimbulkan dampak positif dan dampak negatif. Dampak negatif ini secara otomatis akan mengganggu ekosistem di atasnya, termasuk tata air. Permasalahan lingkungan dalam aktivitas pertambangan batubara umumnya terkait dengan Air Asam Tambang (AAT). Tujuan penelitian ini adalah mengetahui kombinasi bahan organik dan waktu inkubasi terbaik dalam meremediasi air asam tambang pada lahan basah buatan dengan tanaman eceng gondok. Penelitian ini dilakukan di areal penambangan batubara di PT. Berau Coal di Tanjungredeb, Berau, Kalimantan Timur. Kegiatan ini dilakukan pada bulan Juli sampai dengan September 2018. Penelitian ini menggunakan Rancangan Petak Terbagi (*Split Plot*). Petak Utama (*Main Plot*) adalah perlakuan kombinasi bahan organik yang terdiri dari 4 aras yaitu: A0 sebagai kontrol (tanpa bahan organik), A1 dengan kombinasi kompos+serbuk kayu (1:2), A2 dengan kombinasi kompos+serbuk kayu (1:1), A3 kombinasi kompos+serbuk kayu (2:1). Anak petak (*Sub Plot*) yaitu perlakuan waktu inkubasi yang terdiri atas 2 aras yakni selama 15 hari dan 33 hari. Analisis data menggunakan analisis varian (ANOVA) pada taraf 5% yang dilanjutkan dengan uji *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) dengan taraf 5% bila terdapat beda nyata. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan bahan organik memberikan pengaruh nyata terhadap kenaikan pH dan penurunan konsentrasi Mn dalam air, namun berpengaruh tidak nyata terhadap penurunan konsentrasi Fe dalam air. Kombinasi bahan organik terbaik dalam remediasi air asam tambang pada penelitian ini adalah dengan kompos+serbuk kayu (2:1) selama inkubasi 33 hari.

Kata kunci : Air asam tambang (AAT), Remediasi, Lahan basah buatan, Bahan organik, Eceng gondok.

Management of Mine Acid Drainage in a Constructed Wetland Using Hyacinth Plants (*Eichhornia crassipes*) and Addition of Organic Materials

By: Fitri Arum Sekarjannah

Supervised by: S. Setyo Wardoyo and Yanisworo WR

ABSTRACT

Coal mining is an activity to exploit a land to get coal that stored underground. Mining can have a positive and negative impact. This negative impact will automatically disrupt the ecosystem above it, including the water system. Environmental problems in coal mining activities are generally associated with Acid Mine Drainage (AMD). The purpose of this study was to find out the best combination of organic matter and incubation time in remediating acid mine drainage on wetlands with water hyacinth plants. This research was conducted in the coal mining area at PT. Berau Coal in Tanjungredeb, Berau, East Kalimantan. This activity was conducted from July to September 2018. This study uses Split Plot Design. The main plot is the treatment of a combination of organic matter which consists of 4 levels: A0 as a control (without organic matter), A1 with a combination of compost+sawdust (1:2), A2 with a combination of compost+sawdust (1:1), A3 with a combination of compost+sawdust (2:1). The sub plot is treatment incubation time consisting of 2 levels, namely for 15 days and 33 days. Data analysis used variance analysis (ANOVA) at the 5% level followed by the Duncan Multiple Range Test (DMRT) test with a level of 5% if there were significant differences. The results showed that the addition of organic matter had a significant effect on the increase in pH and a decrease in the concentration of Mn in water, but it did not significantly affect the decrease in Fe concentration in water. The best combination of organic matter in acid mine remediation in this study was compost+sawdust (2:1) during the incubation time of 33 days.

Keywords : Acid Mine Drainage, Remediation, Wetlands, Organic Matter, Hyacinth Plants

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga Penulis dapat menyelesaikan laporan penelitian tugas akhir tepat pada waktunya.

Laporan penelitian tugas akhir ini ditulis sebagai salah satu syarat pelaksanaan penelitian tugas akhir di PT. Berau Coal Kaliman Timur dan sebagai salah satu syarat dalam kurikulum Fakultas Pertanian Program Studi Agroteknologi. Penelitian ini bertujuan untuk menambah wawasan atau pengetahuan penulis pada khususnya dan pada pembaca pada umumnya.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ir. Ellen Rosyelina Sasmita, MP, selaku Ketua Jurusan Agroteknologi Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta.
2. Dr. Ir. S. Setyo Wardoyo, MS., selaku dosen pembimbing I yang telah membantu dalam penyusunan laporan penelitian tugas akhir ini.
3. Dr. Ir. Yanisworo WR., M.Si., selaku dosen pembimbing II yang telah membantu dalam penyusunan laporan penelitian tugas akhir ini.
4. Kepala PT Berau Coal Kalimantan Timur, yang telah memberikan ijin dalam kegiatan penelitian tugas akhir.
5. Yudhi Kristian, selaku Superintendent Environment PT Berau Coal Site Samarata sekaligus pembimbing yang telah membantu dalam penyusunan laporan penelitian tugas akhir ini.
6. Karyawan PT Berau Coal Site Samarata yang telah membantu pelaksanaan penelitian tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun guna memperbaiki laporan ini ke depannya.

Yogyakarta, Januari 2019

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT	iv
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR LAMPIRAN	x
BAB I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	3
C. Tujuan Penelitian	4
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	5
A. Pertambangan.....	5
B. Air Asam Tambang (AAT).....	7
C. Penanganan Air Asam Tambang.....	11
D. Eceng Gondok.....	18
BAB III. METODE PENELITIAN	23
A. Waktu dan Tempat Penelitian.....	23
B. Alat dan Bahan.....	23
C. Tata Laksana Penelitian.....	24
D. Parameter Penelitian.....	28
E. Analisis Data.....	31
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	32
A. Karakteristik Air Asam Tambang	32
B. Pengaruh Komposisi Bahan Organik terhadap pH	33
C. Pengaruh Lahan Basah Buatan terhadap Fe dan Mn	37
D. Akumulasi Fe dan Mn dalam Sedimen	43

E. Akumulasi Fe dan Mn dalam Eceng Gondok.....	49
F. Nilai pH, Kadar Fe dan Kadar Mn dalam Air.....	57
G. Persebaran Fe dan Mn pada Air, Sedimen, dan Eceng Gondok	59
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	62
A. Kesimpulan.....	62
B. Saran	62
DAFTAR PUSTAKA	64
LAMPIRAN	69

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Layout percobaan	27
Tabel 2. Karakteristik air asam tambang <i>sediment pond</i> WMP 36 ST.....	32
Tabel 3. Rerata pH air media <i>wetland</i>	33
Tabel 4. Rerata konsentrasi Fe dalam air media <i>wetland</i> (mg/l).....	37
Tabel 5. Rerata konsentrasi Mn dalam air media <i>wetland</i> (mg/l)	39
Tabel 6. Hasil analisis pendahuluan bahan organik.....	44
Tabel 7. Rerata kadar Fe dalam sedimen (ppm).....	44
Tabel 8. Rerata kadar Mn dalam sedimen (ppm)	46
Tabel 9. Rerata kadar Fe dalam akar eceng gondok (ppm).....	49
Tabel 10. Rerata kadar Mn dalam akar eceng gondok (ppm)	51
Tabel 11. Hasil perhitungan serapan Fe dan Mn dalam akar eceng gondok....	55
Tabel 12. Parameter pH, kadar Fe, dan kadar Mn di air pada perlakuan T1 ...	57
Tabel 13. Parameter pH, kadar Fe, dan kadar Mn di air pada perlakuan T2 ...	57
Tabel 14. Kadar Fe pada air, sedimen, dan tanaman di perlakuan T1	59
Tabel 15. Kadar Fe pada air, sedimen, dan tanaman di perlakuan T2.....	59
Tabel 16. Kadar Mn pada air, sedimen, dan tanaman di perlakuan T1	59
Tabel 17. Kadar Mn pada air, sedimen, dan tanaman di perlakuan T2	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Desain lahan Basah Buatan	26
Gambar 2. Hubungan antara perlakuan terhadap pH air media <i>wetland</i>	34
Gambar 3. Regresi antara perlakuan terhadap pH air media <i>wetland</i>	36
Gambar 4. Hubungan antara perlakuan terhadap konsentrasi Fe dalam air.....	38
Gambar 5. Hubungan antara perlakuan terhadap konsentrasi Mn dalam air ...	40
Gambar 6. Regresi antara perlakuan terhadap konsentrasi Mn dalam air	42
Gambar 7. Hubungan antara perlakuan terhadap kadar Fe dalam sedimen.....	44
Gambar 8. Hubungan antara perlakuan terhadap kadar Mn dalam sedimen ...	47
Gambar 9. Kondisi lumpur dalam kolam pengendapan WMP 36.....	46
Gambar 10. Hubungan antara perlakuan terhadap kadar Fe dalam akar	50
Gambar 11. Kondisi tanaman pada perlakuan A0	50
Gambar 12. Kondisi tanaman pada perlakuan A1, A2, A3	51
Gambar 13. Hubungan antara perlakuan terhadap kadar Mn dalam akar	53
Gambar 14. Regresi antara perlakuan terhadap kadar Mn dalam akar	54

DAFTAR LAMPIRAN

Gambar 1. Pembuatan kotak <i>wetland</i>	69
Gambar 2. Pengambilan serbuk kayu	69
Gambar 3. Pengambilan eceng gondok.....	69
Gambar 4. Pengambilan air asam	69
Gambar 5. Aklimatisasi tanaman.....	70
Gambar 6. Pemilihan tanaman	70
Gambar 7. Pengisian bak <i>wetland</i>	70
Gambar 8. Lahan basah buatan.....	70
Gambar 9. Pengukuran pH	71
Gambar 10. Pengambilan lumpur	71
Gambar 11. Analisis air asam.....	71
Gambar 12. Pengeringan tanaman	71
Perhitungan Data dengan Aplikasi SAS	72
Perhitungan Data dengan Uji Lanjut DMRT	86

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Indonesia merupakan negara yang kaya akan bahan tambang, salah satunya batubara. Pertambangan batubara adalah kegiatan untuk mengeksploitasi suatu lahan untuk mendapatkan batubara yang tersimpan di bawah permukaan tanah. Perusahaan tambang batubara di Indonesia banyak jumlahnya, salah satu perusahaan tambang yang telah dikenal yakni PT. Berau Coal di Berau Kalimantan Timur. Pertambangan batubara umumnya dilakukan dengan cara tambang terbuka (*open pit minning*) sehingga akan berdampak terhadap perubahan bentang alam, sifat fisik, kimia, dan biologis tanah, serta secara umum menimbulkan kerusakan pada permukaan bumi. Dampak ini secara otomatis akan mengganggu ekosistem di atasnya, termasuk tata air.

Permasalahan lingkungan akibat aktivitas pertambangan batubara umumnya terkait dengan Air Asam Tambang (AAT) atau *Acid Mine Drainage* (AMD). Air tersebut terbentuk sebagai hasil oksidasi mineral sulfida tertentu yang terkandung dalam batuan oleh oksigen di udara pada lingkungan berair. Mineral sulfida yang banyak dijumpai pada pertambangan batubara, yaitu mineral pirit (FeS_2). Nilai keasaman air asam tambang mencapai 50-15.000 mg/l, kandungan besi (Fe) yang tinggi (>100 mg/l), serta pH rendah sekitar 1,5-4 (Nasir, 2014). Dalam pertambangan, banyak logam berat yang dihasilkan dan tentunya berbahaya bagi lingkungan. Logam berat tersebut

terdapat dalam air asam tambang, sehingga hal ini akan mengakibatkan rusaknya lingkungan sekitar, jika air asam tambang langsung dibuang tanpa pengelolaan terlebih dahulu. Air yang keluar ke badan sungai harus memenuhi baku mutu lingkungan berdasarkan Peraturan Daerah Provinsi Kalimantan Timur Nomor 2 Tahun 2011 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air, yaitu pH 6-9, TSS 300 mg/l, kadar Fe 7 mg/l, dan kadar Mn 4 mg/l.

Teknologi pengelolaan air asam tambang yang sering digunakan adalah pengelolaan secara aktif yakni dengan penambahan kapur. Namun, hal ini menjadi kendala bagi perusahaan karena biaya yang diperlukan cukup mahal. Teknologi lain untuk penanganan air asam tambang adalah pengelolaan air asam tambang secara pasif, yaitu sistem *constructed wetland* atau lahan basah. Pada sistem lahan basah ini, hanya membutuhkan biaya yang relatif rendah serta tidak membutuhkan banyak perawatan, namun kendalanya adalah waktu remediasi yang tergolong cukup lama bila dibandingkan dengan pengelolaan secara aktif. Pada sistem *wetland* anaerobik, komposisi matrik yang digunakan seperti bahan organik yang ditambahkan lumpur aktif dapat menstimulasi pertumbuhan bakteri pereduksi sulfat untuk menaikkan alkalinitas yang dapat meningkatkan pH AAT (Chang *et al*, 2000).

Salah satu tanaman air yang telah diteliti efektif untuk meremediasi air asam tambang yaitu tanaman eceng gondok. Eceng gondok mampu menyerap logam berat yang dihasilkan oleh air asam tambang seperti besi (Fe) dan mangan (Mn). Madaniyah (2016) menyebutkan bahwa perlakuan dengan

pemberian tanaman eceng gondok pada kolam lahan basah memberikan pengaruh terhadap penurunan kadar Fe dan Mn terlarut dalam kolam lahan basah.

Remediasi air asam tambang juga dapat dilakukan dengan cara penambahan bahan organik. Menurut penelitian Riwandi dan Munawar (2007), bahan organik dapat digunakan untuk meremediasi air asam tambang. Hal ini disebabkan karena pemberian bahan organik dapat menaikkan pH air asam tambang serta menurunkan logam berat terlarut. Remediasi air asam tambang dengan kulit kayu, kompos, dan serbuk gergaji memberikan hasil yang terbaik dalam meremediasi air asam tambang.

Telah banyak penelitian yang menyebutkan bahwa tanaman eceng gondok dan bahan organik dapat digunakan untuk meremediasi air asam tambang. Pada penelitian ini dilakukan kombinasi beberapa bahan organik sebagai bahan dasar lahan basah buatan yang akan ditanami tanaman eceng gondok. Hal ini dimaksudkan agar proses penetralan air asam tambang dapat berlangsung dengan cepat dan efektif.

B. Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh sistem lahan basah buatan terhadap pH dan kelarutan logam berat dalam air asam tambang?
2. Bagaimana pengaruh bahan organik terhadap remediasi air asam tambang?
3. Bagaimana kombinasi bahan organik dan waktu inkubasi terbaik pada media lahan basah buatan untuk meremediasi air asam tambang?

4. Bagaimana pengaruh tanaman eceng gondok terhadap serapan Fe dan Mn pada air asam tambang?

C. Tujuan Penelitian

1. Mengetahui pengaruh sistem lahan basah buatan terhadap pH dan kelarutan logam berat dalam air asam tambang.
2. Mengetahui pengaruh bahan organik terhadap remediasi air asam tambang.
3. Mengetahui kombinasi bahan organik dan waktu inkubasi terbaik pada media lahan basah buatan untuk meremediasi air asam tambang.
4. Mengetahui pengaruh tanaman eceng gondok terhadap serapan Fe dan Mn pada air asam tambang.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Pertambangan

Pertambangan adalah sebagian atau seluruh tahapan kegiatan dalam rangka penelitian, pengelolaan dan pengusahaan mineral atau batubara yang meliputi penyelidikan umum, eksplorasi dan studi kelayakan, kontruksi, penambangan, pengolahan dan pemurnian, pengangkutan dan penjualan, serta kegiatan pasca tambang. Sektor pertambangan merupakan sektor yang strategis, selain itu bagi daerah yang kaya sumber daya alamnya, pertambangan merupakan tulang punggung bagi pendapatan daerah tersebut (Djajadiningrat, 2007).

Penambangan menyebabkan perubahan bentang lahan dan kualitas tanah hasil penimbunan setelah penambangan. Struktur tanah penutup rusak sebagaimana sebelumnya, juga tanah lapisan atas bercampur ataupun terbenam di lapisan dalam. Demikian juga populasi hayati tanah yang ada di tanah lapisan atas menjadi terbenam, sehingga mati dan tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Daya dukung tanah lapisan atas pasca penambangan untuk pertumbuhan tanaman menjadi rendah (Subowo, 2011).

Dampak penting yang mungkin timbul pada penambangan batubara pada tahap pra penambangan adalah terbukanya lahan akibat pembukaan lahan (*land clearing*). Hal ini akan menimbulkan dampak lanjutan seperti berkurangnya daya tahan lahan terhadap erosi, perubahan karakteristik

infiltrasi air tanah, perubahan bentuk bentang lahan dan tata guna lahan, serta penurunan kualitas akibat dari erosi. Pada tahap penambangan dampak penting yang muncul adalah terjadinya perubahan bentang alam akibat pengupasan atau penggalian tanah pucuk, tanah penutup dan batubara. Kemungkinan terjadinya air asam tambang jika air limpasan bereaksi dengan lapisan tanah penutup yang berpotensi membentuk asam. Selain itu, juga terjadinya longsor pada penimbunan tanah penutup baik di luar areal tambang maupun bekas tambang. Penambangan batubara atau penambangan bahan galian dari perut bumi seharusnya tidak merusak lingkungan daerah yang ditambang, maka perlu dilakukan proses rehabilitasi (Rustam, 2003). Rehabilitasi lokasi penambangan dilakukan sebagai bagian dari program pengakhiran tambang yang mengacu pada penataan lingkungan hidup yang berkelanjutan. Salah satu kegiatan pengakhiran tambang, yaitu reklamasi, yang merupakan upaya penataan kembali daerah bekas tambang agar bisa menjadi daerah bermanfaat dan berdayaguna.

Teknik rehabilitasi meliputi *regarding*, *reconturing*, penanaman kembali permukaan tanah yang tergradasi, penampungan dan pengelolaan air asam tambang (AAT) dengan menggunakan penghalang fisik maupun tumbuhan untuk mencegah erosi atau terbentuknya AAT (Arif, 2007).

B. Air Asam Tambang (AAT)

Air asam tambang (AAT) adalah air yang telah dipengaruhi oleh oksidasi alamiah mineral sulfida yang terkandung dalam batubara yang ditambang. AAT merupakan air dengan pH yang rendah dan kelarutan logam yang tinggi sebagai akibat dari adanya reaksi oksidasi antara mineral sulfida yang tersingkap karena kegiatan penggalian dengan oksigen dan air yang dikatalis oleh bakteri pengoksida besi dan sulfur, seperti *Thiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans* dan *Thiobacillus thiooxidans* (Gunawan *et al.*, 2014). Oksidasi pirit (FeS_2) akan membentuk ion ferro (Fe^{2+}), sulfat, dan beberapa proton pembentuk keasaman, sehingga kondisi lingkungan menjadi asam. Reaksi oksidasi mineral sulfida dalam hal ini pirit, dibagi menjadi 3 reaksi utama yakni (i) reaksi spontan yang terjadi saat mineral pirit tersingkap ke permukaan tanah, (ii) reaksi dipercepat dengan adanya ion Fe^{3+} , dan (iii) reaksi biologi yang mengikutsertakan aktivitas oksidasi bakteri pengoksida besi dan sulfur (Lizama dan Suzuki, 1989).

Air asam tambang umumnya memiliki tingkat keasaman tinggi yang mengakibatkan kandungan logam terlarut tinggi pula. Logam akan tetap terlarut sampai pH meningkat sampai pada suatu tingkat logam tersebut mengalami presipitasi. AAT umumnya diasosiasikan dengan kandungan sulfat, logam berat (Fe, Cu, Pb, Zn, Cd, Co, Cr, Ni, Hg), metalloid (As, Sb), dan unsur lain seperti Al, Mn, Si, Ca, Na, Mg yang tinggi. AAT biasanya dicirikan oleh kandungan sulfat yang tinggi (>1000 mg/l), kandungan besi (Fe) dan aluminium (Al) yang tinggi (>100 mg/l) (Lottermoser, 2010).

Reaksi pembentukan AAT menurut Stum dan Morgan (1981) dapat ditulis sebagai berikut :



Pada reaksi (1) pirit (FeS_2) dioksidasi membentuk besi ferro (Fe^{2+}), sulfat (SO_4^{2-}) dan beberapa proton penyebab kemasaman (H^+), sehingga lingkungan menjadi lebih masam. Pada pH air yang cukup masam, bakteri pengoksidasi besi dan sulfat dapat mempercepat proses oksidasi dan dapat tumbuh dengan pesat. Bakteri pengoksidasi besi seperti *Thiobacillus ferrooxidans* mempercepat proses oksidasi pirit melalui dua mekanisme, yaitu oksidasi langsung melalui persamaan reaksi (1) dan secara tidak langsung, dimana terlebih dahulu Fe^{2+} dioksidasi menjadi Fe^{3+} (reaksi 2) yang akan mengoksidasi pirit secara abiotik (reaksi 3). Selanjutnya, reaksi (4) akan berlangsung jika pH air mencapai $>2,8$. Dalam reaksi ini, Fe^{3+} akan dihidrolisis dan membentuk endapan besi hidroksida (Fe(OH)_3) yang disebut 'yellow boy' (Watzlaf *et al*, 2004).

Beberapa mineral sulfida yang diketahui pembangkit asam dengan ion ferri sebagai pengoksidasi adalah falerit (ZnS), galena (PbS), kalkopirit (CuFeS_2), kovelit (CuS), cinnabar (HgS), millerit (NiS), pentlandit ($(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$) dan greenockit (CdS). Sedangkan mineral sulfida yang diketahui pembangkit asam dengan oksigen sebagai pengoksidasi adalah pirit dan

markasit (FeS_2), pirotit (Fe_xS_x), bornit (Cu_5FeS_4), arsenopirit (FeAsS), enargit atau famatinit ($\text{Cu}_3\text{AsS}_4/\text{Cu}_2\text{SbS}_4$), tennantit atau tetrahidrit ($(\text{Cu,Fe,Zn})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}/(\text{Cu,Fe,Zn})_{12}\text{Asb}_4\text{S}_{13}$), realgar (AsS), orpiment (As_2S_3) dan stibnit (Sb_2S_3) (Gautama, 2014).

Menurut Skousen dan Ziemkiewicz (1996) air tambang dapat dikelompokkan ke dalam 5 tipe yaitu:

1. **Air Tambang Tipe 1** adalah air tambang yang tidak atau sedikit mengandung alkalinitas ($\text{pH} < 4,5$) dan mengandung Fe, Al, Mn, dan logam lainnya, asam (H^+) dengan konsentrasi yang tinggi. Air tambang tipe ini disebut air asam tambang (*acid mine drainage*, AMD). Air asam tambang (AMD) mungkin juga merujuk pada air yang mempunyai $\text{pH} < 6$ dan mengandung keasaman bersih (*net acidity*), yaitu keasamannya lebih besar daripada alkalinitasnya.
2. **Air Tambang Tipe 2** adalah air tambang yang mempunyai kandungan zat padat terlarut yang tinggi, yakni mengandung besi ferro dan Mn yang tinggi, sedikit atau tanpa mengandung oksigen, dan $\text{pH} > 6$. Pada kondisi teroksidasi, pH air tipe ini dapat turun secara tajam sehingga berubah menjadi air tipe 1.
3. **Air Tambang Tipe 3** adalah air tambang yang mengandung zat padat terlarut dengan konsentrasi sedang sampai tinggi, mengandung besi ferro dan Mn dengan konsentarsi rendah sampai sedang, tanpa atau sedikit mengandung oksigen, $\text{pH} > 6$, dan alkalinitas lebih besar dari keasaman (*acidity*). Umumnya disebut juga dengan air tambang alkali (*alkaline mine*

drainage). Pada kondisi teroksidasi, asam yang terbentuk dari hidrolisa logam dan reaksi pengendapan akan dinetralkan oleh senyawa alkali yang sudah terdapat di dalam air.

4. **Air Tambang Tipe 4** adalah air asam tambang tipe 1 yang dinetralkan hingga pH-nya > 6 dan mengandung partikel tersuspensi dengan konsentrasi yang tinggi. Pengendapan hidroksida logam di dalam air belum terjadi. Dengan waktu tinggal yang cukup di dalam kolam, maka partikel tersuspensi akan mengendap.
5. **Air Tambang Tipe 5** adalah air asam tambang yang telah dinetralkan sehingga pH-nya > 6 dan mengandung zat padat terlarut dengan konsentrasi yang tinggi. Setelah hampir seluruh hidroksida logam diendapkan di dalam kolam pengendap, kation utama yang masih tertinggal di dalam air dengan konsentrasi yang tinggi umumnya adalah kalsium (Ca) dan magnesium (Mg) terlarut. Anion terlarut seperti bikarbonat dan sulfat masih tertinggal di dalam air. Jika pada proses netralisasi mengalami kekurangan alkalinitas, air tambang tipe 5 ini tidak akan terbentuk.

Air asam tambang dapat terjadi pada kegiatan penambangan baik itu tambang terbuka maupun tambang dalam, karena unsur sulfur yang terdapat di dalam batuan teroksidasi secara alamiah didukung juga dengan curah hujan yang tinggi semakin mempercepat perubahan oksida sulfur menjadi asam. Sumber-sumber air asam tambang berasal dari kegiatan sebagai berikut:

1. Pembuatan jalan tambang, pembukaan tanah penutup (*over burden*).

2. Operasi penambangan baik tambang bawah tanah maupun tambang terbuka.
3. Lokasi penimbunan tanah penutup (*waste dump*).
4. Lokasi *stockpile* bijih atau batubara.
5. Lokasi pembuangan *tailing* (Asyani, 2015).

Pencegahan pembentukan air asam tambang dapat dilakukan dengan meminimalisir infiltrasi oksigen ke dalam mineral sulfida, mengurangi infiltrasi air, mengisolasi batuan buangan sehingga mineral sulfida tidak terpapar udara, mengontrol pH dengan melakukan penambahan bahan yang bersifat alkali seperti kapur hidrat, batu gamping, dan pelakuan bakterisida untuk mencegah terjadinya oksidasi besi oleh bakteri. Sedangkan penanggulangan AAT yang sudah terjadi, dapat dilakukan dengan proses penetralan pada kolam pengendap dengan menggunakan bahan yang bersifat alkalin sehingga air hasil penetralan pH nya bersifat netral (Hakim, 2009).

C. Penanganan Air Asam Tambang

Secara umum ada dua metoda yang dapat digunakan untuk pengolahan air asam tambang, yaitu teknologi pengolahan aktif dan teknologi pengolahan pasif. Pada teknologi pengolahan aktif, proses-proses yang digunakan adalah netralisasi, aerasi dan pengendapan. Netralisasi adalah proses penambahan bahan kimia untuk menetralkan pH air asam tambang agar proses penghilangan besi di air dapat berjalan dengan baik. Proses aerasi adalah penambahan oksigen dalam air asam tambang agar besi yang terdapat di

dalam air asam tambang bereaksi dengan oksigen dimana selanjutnya Fe akan dipisahkan melalui proses pengendapan.

Sementara itu, pada teknologi pengolahan secara pasif, air diolah tanpa membutuhkan bahan kimia dan hanya menggunakan proses kimia dan biologi yang terjadi di alam. Beberapa teknologi pengolahan pasif untuk air asam tambang yang dapat digunakan adalah rawa alamiah (*natural wetland*), rawa buatan (*constructed wetland*), saluran anoksik batu kapur (*anoxic limestone drain, ALD*), Sistem aliran vertikal (*vertical flow system*), dan saluran terbuka batu kapur (*open limestone channe, OLC*) (Said, 2014).

Teknik pengolahan pasif yang banyak digunakan dalam pengolahan AAT adalah lahan basah buatan (*constructed wetland*). Rawa buatan adalah suatu sistem yang dibangun dan dirancang menyerupai rawa alami untuk keperluan air tercemar. Proses pengolahan air tercemar pada rawa buatan merupakan suatu proses ilmiah yang melibatkan tumbuhan air, sedimen, dan mikroorganisme, dengan matahari sebagai sumber energi (Vymazal, 2008).

Rawa buatan (*constructed wetland*) dapat meliputi lahan basah aerob dan lahan basah anaerob. Rawa buatan aerobik merupakan rawa yang ditanami dengan *Typha* sp. atau jenis tanaman lain pada kedalaman kurang dari 30 cm, sedangkan pada rawa buatan anaerobik, tanaman-tanaman tersebut ditanam pada kedalaman lebih dari 30 cm. Selain itu, pada rawa buatan aerobik sedimen (substrat) terdiri dari tanah dan liat, sementara pada rawa anaerobik substrat terdiri dari campuran tanah dan berbagai macam bahan organik

seperti gambut, kompos, serbuk gergaji, kotoran ternak, jerami, dan sebagainya yang dicampur dengan batu gamping (Skousen *et al.*, 1998).

Sistem lahan basah anaerobik menggunakan komposisi reaktif material berupa kompos, seresah daun, dan serbuk gergaji, yang ditambahkan lumpur aktif yang akan menstimulasi pertumbuhan bakteri pereduksi sulfat untuk meningkatkan alkalinitas dan menyisihkan logam dalam bentuk endapan sulfida (Sandrawati, 2012).

Munawar (2007) menjelaskan tumbuhan air pada lahan basah mempunyai beberapa fungsi atau manfaat penting, seperti:

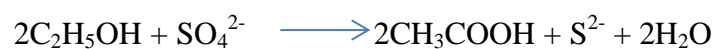
1. Konsolidasi substrat oleh akar tanaman dengan cara memegang substrat bersama-sama dan meningkatkan waktu tinggal air dalam *wetland*.
2. Stimulasi proses jasad renik melalui penyediaan tapak (*site*) oleh tanaman untuk menempelnya mikroorganisme, mengeluarkan oksigen dari akarnya, menyediakan sumber bahan organik untuk mikroorganisme heterotrof.
3. Tanaman memasok pakan dan perlindungan bagi satwa liar, sehingga dapat membentuk habitat satwa liar.
4. Lahan basah dengan tanamannya lebih enak dipandang mata (estetika).
5. Akumulasi logam.

Novotny dan Olem (1994) menguraikan proses-proses yang terjadi di dalam rawa buatan secara lengkap yang meliputi proses fisik, fisika-kimia, dan biokimia. Proses-proses fisik terdiri dari sedimentasi, filtrasi padatan tersuspensi oleh sedimen dan tumbuhan air, serta pemanasan dan volatilisasi. Proses fisika-kimia terdiri dari proses adsorpsi bahan pencemar oleh

tumbuhan air, sedimen, dan substrat organik. Proses biokimia terdiri dari proses penguraian zat tercemar oleh bakteri yang menempel pada permukaan substrat atau sedimen, perakaran tumbuhan, dan seresah (bahan organik).

Hal penting dalam proses remediasi air asam tambang yaitu peningkatan pH dan pengurangan logam berat. Pada kondisi tergenang, kenaikan nilai pH dapat disebabkan oleh beberapa faktor, yaitu: (i) adanya pelepasan ion-ion hidroksil yang akan mengikat ion H^+ , dengan demikian ion kemasaman akan berkurang; dan (ii) pemberian bahan organik yang mempunyai peran sebagai kapasitas penyangga (*buffering capacity*) sehingga dapat meningkatkan atau menurunkan pH lingkungannya (Stevenson, 1982). Peningkatan pH juga disumbangkan dari kandungan alkalinitas dari bahan organik yang digunakan. Pada sistem *wetland* anaerobik, komposisi matrik yang digunakan seperti bahan organik yang ditambahkan lumpur aktif dapat menstimulasi pertumbuhan bakteri pereduksi sulfat untuk menaikkan alkalinitas yang dapat meningkatkan pH AAT (Chang *et al*, 2000).

Bakteri pereduksi sulfat dicirikan oleh respirasi anaerobik dengan menggunakan sulfat sebagai pusat penerima elektron. Bakteri pereduksi sulfat biasanya mengandalkan senyawa karbon sederhana sebagai asam organik untuk menyediakan donor elektron pada reduksi sulfat, walaupun sebagian dapat menggunakan hydrogen (Logan *et al*, 2005). Greben *et al* (2005), menggambarkan bahwa reduksi sulfat dapat terjadi melalui proses berikut:



Reduksi sulfat merupakan penyebab utama dalam netralisasi pH dan pengurangan sulfat dan logam beracun (Machemer dan Wilderman *dalam* Sandrawati, 2012).

Peranan bahan organik adalah sebagai penghasil alkalinitas (bikarbonat), di mana asetat sebagai donor elektron.



Reduksi satu molekul sulfat menghasilkan dua molekul alkalinitas. Satu mol sulfida akan dihasilkan dari satu mol sulfat pada proses reduksi sulfat, sulfida ini akan mengendapkan logam berat dengan membentuk logam sulfida dengan kelarutan rendah.



Dalam proses penurunan logam berat, terdapat 4 kemungkinan yang menyebabkan terjadinya penurunan konsentrasi logam Fe terlarut pada wetland yaitu:

1. Interaksi antara sulfida (S^{2-}) yang dihasilkan pada proses reduksi sulfat dengan logam bervalensi 2 (seperti Fe^{2+} dan Mn^{2+}) membentuk logam sulfida yang mengendap.
2. Proses absorpsi logam oleh jaringan tanaman.
3. Proses adsorpsi logam oleh bahan organik.
4. Proses biopsorpsi logam oleh mikroorganisme yang terdapat pada lingkungan lahan basah (Madaniyah, 2016).

Menurut penelitian Riwandi dan Munawar (2007), bahan organik dapat digunakan untuk meremediasi air asam tambang. Remediasi air asam tambang

dengan kulit kayu, kompos kulit kayu, dan serbuk gergaji memberikan hasil yang terbaik dalam meremediasi air asam tambang. pH air asam tambang secara keseluruhan meningkat pH dengan limbah organik. Pada kadar Fe terlarut, terbukti bahwa bahan organik berupa kompos, kulit kayu, abu batubara, dan serbuk gergaji dapat menurunkan kadar Fe terlarut menjadi ± 2 mg/l.

Serbuk gergaji kayu mengandung senyawa-senyawa kimia seperti hemiselulosa, selulosa, lignin, dan zat ekstraktif. Selulosa dan lignin memiliki gugus fungsi yang dapat melakukan pengikatan dengan ion logam. Gugus fungsi tersebut adalah gugus karboksil dan hidroksil (Herwanto dan Santoso, 2006). Gugus-gugus polar ini diduga dapat berinteraksi dengan logam berat. Selulosa merupakan senyawa organik yang terdapat pada dinding sel bersama lignin yang berperan dalam mengokohkan struktur tumbuhan. Dilihat dari strukturnya, selulosa dan lignin mempunyai potensi yang cukup besar untuk dijadikan sebagai penyerap karena gugus -OH yang terikat dapat berinteraksi dengan komponen adsorbat. Adanya gugus -OH pada selulosa menyebabkan terjadinya sifat polar pada adsorben tersebut, dengan demikian selulosa dan lignin lebih kuat menyerap zat yang bersifat polar dari pada zat yang kurang polar. Mekanisme serapan yang terjadi antara gugus -OH yang terikat pada permukaan dengan ion logam yang bermuatan positif (kation) merupakan mekanisme pertukaran ion (Nurhayati dan Sutrisno, 2011). Adanya gugus-gugus polar ini diduga dapat berinteraksi dengan logam berat sehingga serbuk gergaji kayu meranti mempunyai reaktifitas kimia yang tinggi dan

menyebabkan sifat polielektrolit kation sehingga dapat berperan sebagai adsorben terhadap logam berat terhadap air yang tercemar.

Substansi yang terkandung pada kompos di antaranya yaitu asam humat dan asam fulvat. Kandungan asam humat dan asam fulvat memiliki kemampuan mengadsorpsi logam berat oleh kompos karena gugus fungsi pada kedua substansi tersebut. Hermana dan Nurhayati (2010) menyatakan bahwa substansi humus berupa asam humat dan asam fulvat memiliki kapasitas untuk membentuk kompleks dengan logam melalui pembentukan senyawa kompleks dan khelat. Selain asam humat dan asam fulvat kandungan substansi humus lainnya yaitu humin. Humin merupakan substansi yang ikut berperan dalam pengikatan logam berat karena pada humin juga terkandung gugus fungsi pengikat logam berat. Substansi-substansi humus ini mengandung gugus fungsi di antaranya yaitu: $-\text{COOH}$, $-\text{OH}$, $-\text{COH}$, dan $\text{C}=\text{O}$ (Prasetiyono, 2015). Selama proses pengomposan gugus fungsi ini akan mengalami proses deprotonisasi sehingga ion H^+ akan lepas dari persenyawaannya dan gugus fungsi bermuatan negatif. Muatan negatif pada gugus fungsi ini akan berperan dalam mengikat logam berat di air serta mengikat ion H^+ yang akan menjadikan logam berat di air menjadi semakin rendah dan pH air semakin meningkat. Selain gugus fungsi pada kompos, berkurangnya logam berat di air juga disebabkan kandungan mineral positif pada kompos yang dapat mengalami pertukaran dengan ion logam berat. Adsorpsi logam berat oleh kompos diawali dengan adsorpsi secara fisik, partikel-partikel logam yang mendekati ke permukaan kompos melalui gaya Van der Waals atau melalui

ikatan hydrogen, kemudian diikuti oleh adsorpsi kimia yang terjadi setelah adsorpsi fisika. Pada adsorpsi kimia partikel melekat ke permukaan dengan membentuk ikatan kimia (biasanya ikatan kovalen) (Prasetyono, 2015).

D. Eceng Gondok

Salah satu faktor penentu fungsi lahan basah dalam fitoremediasi AAT adalah pemilihan jenis tanaman. Pemilihan jenis untuk tujuan remediasi logam dalam AAT pada konstruksi lahan basah yaitu tanaman harus adaptif pada kondisi tergenang, toleran terhadap pH rendah dan toksik logam berat (Tuheteru, 2015).

Menurut Dhir (2013) ada 3 kategori utama spesies tanaman air yang dapat menghilangkan kontaminan di perairan yaitu spesies *free-floating*, *submerged* dan *emergent*. Tanaman air yang termasuk spesies *free-floating* adalah tanaman kayu apu, kiambang dan eceng gondok. Tanaman air yang termasuk spesies *submerged* salah satunya adalah *Hydrilla verticillata*, sedangkan tanaman air yang termasuk spesies *emergent* salah satunya adalah *Typha latifolia*.

Taksonomi tanaman eceng gondok, yaitu:

Kingdom : *Plantae*

Divisi : *Magnoliophyta*

Kelas : *Liliopsida*

Ordo : *Commelinales*

Famili : *Pontederiaceae*

Genus : *Eichhornia*

Spesies : *Eichhornia crassipes* Martius

Eceng gondok pertama kali ditemukan secara tidak sengaja oleh seorang ilmuwan bernama Carl Friedrich Philipp von Martius, seorang ahli botani berkebangsaan Jerman pada tahun 1824 ketika sedang melakukan ekspedisi di Sungai Amazon Brazil. Eceng gondok memiliki kecepatan tumbuh yang tinggi sehingga tumbuhan ini dianggap sebagai gulma yang dapat merusak lingkungan perairan. Eceng gondok hidup mengapung di air dan ada pula yang berakar dalam tanah, tingginya sekitar 0,4-0,8 meter, tidak mempunyai batang, berdaun tunggal dan berbentuk oval, ujung dan pangkalnya meruncing, serta pangkal tangkai daun menggelembung. Permukaan daunnya licin dan berwarna hijau, bunganya termasuk bunga majemuk, berbentuk bulir, kelopak berbentuk tabung, biji berbentuk bulat dan berwarna hitam, buahnya kotak beruang tiga dan berwarna hijau, akarnya merupakan akar serabut.

Habitat eceng gondok tumbuh di kolam-kolam dangkal, tanah basah dan rawa, aliran air yang lambat, danau, tempat penampungan air dan sungai. Tumbuhan ini dapat beradaptasi dengan perubahan yang ekstrim dari ketinggian air, arus air, dan perubahan ketersediaan nutrisi, pH, temperatur serta racun dalam air. Kandungan garam dapat menghambat pertumbuhan eceng gondok seperti yang terjadi pada danau-danau di daerah pantai Afrika Barat, dimana eceng gondok akan bertambah sepanjang musim hujan dan berkurang saat kandungan garam naik pada musim kemarau (Suprayitno, 2012).

Perkembangbiakan dapat terjadi secara vegetatif maupun secara generatif. Enceng gondok dapat menggandakan daunnya pada 7-10 hari. Perkembangbiakan secara generatif terjadi melalui bijinya, sebelum terjadinya biji didahului oleh penyerbukan pada bunga. Setelah 20 hari bunganya akan masak, terbebas lalu pecah dan bijinya masuk ke perairan untuk kemudian menjadi tanaman baru. Satu tanaman dapat menghasilkan 5 sampai 6 ribu biji tiap musim (Tjitrosoepomo, 1996). Kemampuan tanaman inilah yang banyak digunakan untuk mengolah air buangan, karena dengan aktivitas tanaman ini mampu mengolah air buangan domestik dengan tingkat efisiensi yang tinggi.

Enceng gondok mempunyai sifat-sifat yang baik antara lain dapat menyerap logam-logam berat, senyawa sulfida, selain itu mengandung protein lebih dari 11,5% dan mengandung selulosa 64,51% lebih besar dari non selulosanya seperti lignin, abu, lemak, dan zat-zat lain (Joedodibroto, 1983). Enceng gondok dapat digunakan untuk menghilangkan polutan, karena fungsinya sebagai tanaman fitoremediasi untuk menghilangkan logam berat seperti cuprum, aurum, cobalt, strontium, timbal, timah, besi. Menurut Kelly (1997) mekanisme kerja fitoremediasi mencakup proses sebagai berikut:

1. Fitoekstraksi merupakan penyerapan polutan oleh tanaman dari air atau tanah dan kemudian diakumulasi atau disimpan di dalam tanaman (daun atau batang), tanaman seperti itu disebut dengan *hiperakumulator*.
2. Rhizofiltrasi adalah pemanfaatan kemampuan akar dalam menyerap, mengendapkan, dan mengakumulasi logam berat. Tetapi biasanya konsep dasar ini berlaku apabila media yang tercemarnya adalah badan perairan.

3. Fitodegradasi adalah proses penyerapan polutan oleh tanaman dan kemudian polutan tersebut mengalami metabolisme didalam tanaman. Metabolisme polutan didalam tanaman melibatkan enzim antara lain *nitroductase*, *laccase*, *dehalogenase* dan *nitrilase*.
4. Fitostabilisasi merupakan proses yang dilakukan oleh tanaman untuk mentransformasi polutan didalam tanah menjadi senyawa yang non toksik tanpa menyerap terlebih dahulu polutan tersebut ke dalam tubuh tanaman.
5. Fitovolatilisasi merupakan proses penyerapan polutan oleh tanaman dan polutan tersebut dirubah menjadi bersifat *volatil* dan kemudian ditranspirasikan oleh tanaman. Polutan yang di lepaskan oleh tanaman keudara bisa sama seperti bentuk senyawa awal polutan, bisa juga menjadi senyawa yang berbeda dari senyawa awal.

Mekanisme kerja dari fitoremediasi tanaman eceng-ecengan bersifat rizofiltrasi dan fitoekstraksi (Putri, 2014). Fitoekstraksi merupakan penyerapan polutan oleh tanaman dari air atau tanah dan kemudian diakumulasi atau disimpan di dalam tanaman (daun atau batang). Tumbuhan seperti itu disebut dengan hiperakumulator. Tumbuhan hiperakumulator adalah tumbuhan yang mempunyai kemampuan untuk mengkonsentrasikan logam di dalam biomasnya dalam kadar yang luar biasa tinggi. Kebanyakan tumbuhan umumnya mengakumulasi logam, misalnya nikel sebesar 10 mg/kg berat kering (setara dengan 0,001 %), tetapi tumbuhan hiperakumulator logam mampu mengakumulasi hingga 11 % berat kering. Batas kadar logam yang terdapat di dalam biomassa agar suatu tumbuhan dapat disebut

hiperakumulator berbeda-beda tergantung pada jenis logamnya. Tanaman air hiperakumulator ini berevolusi melalui struktur dan fisiologisnya, yaitu membentuk jaringan lakuna atau aerenkhima di dalam akar dan batangnya untuk pertukaran materi dari bagian batang ke akar. Perubahan ini terlihat pada tanaman air yang mengapung, dengan membentuk daun yang bulat penuh untuk menjaga agar tidak mudah sobek, tekstur yang kuat dan permukaan atas hidrofobil untuk menjaga agar tidak basah (Irhamni, 2017).

Setelah polutan terakumulasi, tanaman dapat dipanen dan tanaman tersebut tidak boleh dikonsumsi tapi harus dimusnahkan dengan insinerator. Mekanisme ini terjadi ketika akar tumbuhan mengabsorpsi larutan polutan sekitar akar ke dalam akar, yang selanjutnya ditranslokasi ke dalam organ tumbuhan melalui pembuluh xilem. Proses tersebut cocok digunakan untuk dekontaminasi zat-zat anorganik seperti logam-logam berat (Putri, 2014).

Menurut Madaniyah (2016), penyerapan Fe terbesar diserap oleh tanaman eceng gondok dengan persentase penyerapan sebesar 35,5%. Persentase penyerapan tanaman kayu apu dan kiambang masing masing sebesar 20,97% dan 26,99%. Persentase penyerapan Fe oleh eceng gondok lebih besar daripada penyerapan tanaman kayu apu dan kiambang. Lahan basah yang berisi tanaman kayu apu, kiambang dan kontrol memiliki persentase reduksi penurunan kadar Mn berturut turut adalah sebesar 47%, 53% dan 43% dalam waktu 29 hari. Persentase reduksi penurunan kadar Mn tertinggi ditunjukkan oleh kolam lahan basah yang berisi eceng gondok yaitu sebesar 72% dalam waktu 29 hari.

BAB III

METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan di *Site* Samarata PT. Berau Coal, Tanjung Redeb, Berau, Kalimantan Timur. Analisis sampel penelitian berupa air asam tambang dilakukan di Laboratorium PT. Berau Coal *Site* Lati, sedangkan sampel sedimen dan tanaman dilakukan di Laboratorium Sucofindo Cibitung yang bekerjasama dengan PT. Berau Coal. Penelitian dilaksanakan pada bulan Juli sampai dengan September 2018.

B. Alat dan Bahan

1. Air Asam Tambang

Sumber air asam tambang diperoleh dari *Water Monitoring Point* (WMP) 36 Pit C2C *Site* Samarata PT. Berau Coal. Air asam tambang yang diambil adalah air asam pada kolam pengendapan yang sumbernya dari area disposal C2C. Pengambilan AAT menggunakan pompa dari unit *Hydroseeding*.

2. Lumpur

Lumpur yang digunakan pada penelitian ini adalah lumpur endapan di kolam pengendapan *Water Monitoring Point* (WMP) 36 yang tergolong sangat asam. Lumpur ini digunakan sebagai bahan dasar lahan basah

buatan, yang di dalamnya diharapkan terdapat bakteri pereduksi sulfat yang mampu membantu proses bioremediasi air asam tambang.

3. Tanaman Eceng Gondok

Tanaman yang digunakan pada penelitian ini adalah eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) yang dapat tumbuh cepat di lahan basah serta memiliki akar serabut yang mampu menjerap bahan-bahan berbahaya yang terdapat di dalam air asam tambang. Eceng gondok yang digunakan merupakan eceng gondok yang tumbuh liar di Sungai Segah, Berau, Kalimantan Timur.

4. Bahan Organik

Bahan organik yang digunakan yaitu kompos kotoran sapi dan serbuk kayu. Kompos kotoran sapi diperoleh dari PT. Berau Coal Site Samarata yang mengembangkan proyek pembuatan kompos, sedangkan serbuk kayu diperoleh dari hasil gergaji kayu bengkirai.

C. Tata Laksana Penelitian

1. Analisis Pendahuluan

Air asam tambang yang digunakan sebelumnya dilakukan analisis pendahuluan, yaitu pengukuran pH, kadar besi (Fe), dan kadar mangan (Mn). Pada tanaman eceng gondok dilakukan analisis kadar besi (Fe) dan kadar mangan (Mn). Pada bahan organik masing-masing dilakukan analisis rasio C-N, kadar besi (Fe) dan kadar mangan (Mn).

2. Aklimatisasi Tanaman Air

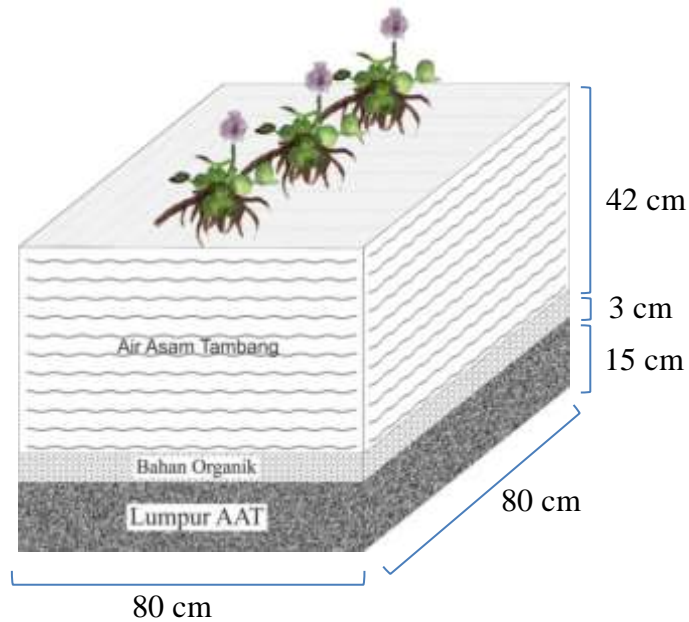
Sebelum tanaman eceng gondok ditanam di lahan basah buatan, tanaman eceng gondok diaklimatisasi, yaitu dengan ditanam pada air asam tambang yang pH nya mendekati pH di lahan basah buatan. Tempat aklimatisasi yang digunakan yaitu pada *Water Monitoring Point* (WMP) 12 dengan pH 4 selama 7 hari. Hal ini dilakukan untuk melihat daya hidup eceng gondok pada pH asam.

3. Percobaan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan sistem statis, yaitu air asam tambang yang ditampung di dalam bak tidak dialirkan, namun hanya diremediasi dengan bahan yang ada di dalam bak penampungan tersebut. Bak lahan basah buatan dibuat dengan ukuran 80x80x60 cm³ (Gambar 1), sehingga kapasitas volume AAT yang tertampung adalah sebesar 270 liter/bak, dengan tinggi permukaan air ± 42 cm. Jenis kolam lahan basah yang digunakan adalah *anaerobic wetland*.

Lumpur yang masih berpotensi membentuk asam (*Potensial Acid Forming* (PAF)) dimasukkan ke dalam kolam hingga mencapai ketinggian 15 cm. Komponen selanjutnya adalah bahan organik yang merupakan kombinasi dari kompos kotoran sapi dan serbuk kayu, dimasukkan hingga mencapai ketinggian 3 cm. AAT dimasukkan dalam kolam percobaan dengan ketinggian muka air ± 42 cm, kemudian dimasukkan tanaman uji berupa eceng gondok sebanyak 15 rumpun. Tanaman yang digunakan

untuk perlakuan dipilih yang mempunyai ukuran yang relatif sama yaitu dengan berat 30 gram.



Gambar 1. Desain lahan basah buatan

Penelitian ini menggunakan Rancangan Petak Terbagi (*Split Plot*).

Faktor utama sebagai *main plot* adalah perlakuan kombinasi bahan organik yang terdiri dari 4 aras yaitu:

A0 = Lumpur AAT tanpa penambahan bahan organik (kontrol)

A1 = Lumpur AAT dan bahan organik kompos + serbuk kayu (1:2)

A2 = Lumpur AAT dan bahan organik kompos + serbuk kayu (1:1)

A3 = Lumpur AAT dan bahan organik kompos + serbuk kayu (2:1)

Faktor yang lain sebagai Anak Petak (*Sub Plot*) adalah perlakuan waktu inkubasi yang terdiri atas 2 aras, yaitu:

T1 = waktu 15 hari

T2 = waktu 33 hari

Tabel 1. Layout percobaan

¹ A3.1	⁵ A3.2	⁹ A3.3
² A2.2	⁶ A2.3	¹⁰ A0.3
³ A1.3	⁷ A2.1	¹¹ A0.2
⁴ A1.1	⁸ A1.2	¹² A0.1

4. Pengamatan dan Analisis Sampel

a. Sampel Air

Pengambilan sampel air dilakukan setiap hari untuk pengukuran pH. Sedangkan untuk Fe, dan Mn dilakukan 2 kali, yaitu pada hari ke-15 setelah perlakuan (HSP) dan 33 HSP.

b. Sampel Sedimen

Pengambilan sampel sedimen (campuran lumpur dan bahan organik) dilakukan pada hari 15 HSP dan 33 HSP untuk dilakukan pengukuran kadar Fe dan Mn. Teknik pengambilan sampel yang dilakukan adalah *Sample Random and CompoSite*. Sampel sedimen diambil di 5 titik yaitu di bagian tengah dan 4 titik pojok bak. Pengambilan sampel sedimen dilakukan dengan cara mengaduk lumpur dan bahan organik di kelima titik tersebut, kemudian diambil dan dikompositkan.

c. Sampel Tanaman

Pengambilan sampel tanaman eceng gondok dilakukan pada hari 15 HSP dan 33 HSP untuk dilakukan pengukuran kadar Fe dan Mn. Teknik pengambilan sampel yang dilakukan adalah *Sample Random and CompoSite*. Sampel tanaman eceng gondok diambil di 3 titik yaitu di bagian tengah, kiri, dan kanan bak.

D. Parameter Penelitian

1. pH air asam tambang

Pengukuran pH air asam tambang menggunakan pH meter.

2. Rasio C-N kompos kotoran sapi

3. Rasio C-N serbuk kayu

4. Kadar mangan (Mn) dalam air

Pengukuran kadar Mn berdasarkan SNI: 6985.5-2009. Pengukuran ion logam Mn terlarut dilakukan dengan metode Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) - nyala, pada kisaran kadar Mn 0,1 mg /L hingga 10 mg/L dengan panjang gelombang 279,5 nm.

5. Kadar mangan (Mn) di tanaman

Contoh tanaman dikeringkan dalam oven, sebelumnya dipotong-potong agar pengeringan lebih cepat dan oven diset pada suhu 70°C. Contoh yang telah kering kemudian digiling dengan grinder mesin yang menggunakan filter dengan kehalusan 0,5 mm. Tanaman diekstrak dengan cara pengabuan basah menggunakan campuran asam pekat HNO₃ dan HClO₄.

Timbang 0,5 g contoh tanaman ke dalam tabung digestion. Ditambahkan 5 ml HNO_3 dan 0,5 ml HClO_4 dan biarkan satu malam. Kemudian dipanaskan dalam digestions blok dengan suhu 100°C selama satu jam, kemudian suhu ditingkatkan menjadi 150°C . Setelah uap kuning habis suhu digestion blok ditingkatkan menjadi 200°C . Destruksi selesai setelah keluar asap putih dan sisa ekstrak kurang lebih 0,5 ml. Tabung diangkat dan didinginkan. Ekstrak diencerkan dengan aquades hingga volume tepat 50 ml dan kocok dengan pengocok tabung hingga homogen. Kadar Mn dalam ekstrak diukur menggunakan spektrofotometer serapan atom (SSA).

6. Kadar mangan (Mn) di sedimen

Analisis kandungan logam Mn dalam sedimen dilakukan dengan memasukkan contoh sedimen ke dalam oven selama 3 jam lalu ditumbuk sampai halus, sebanyak 2 gram sampel dimasukkan ke dalam labu, dididihkan dan ditambahkan dengan HNO_3 untuk didestruksi selama 3 jam kemudian disaring dan filtratnya diencerkan dan diukur dengan AAS.

7. Kadar besi (Fe) dalam air

Pengukuran kadar Fe berdasarkan SNI: 6989.4-2009. Pengukuran ion logam Fe terlarut dilakukan dengan metode Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) – nyala, pada kisaran kadar Fe 0,3 mg/L hingga 10mg/L dengan panjang gelombang 248,3 nm.

8. Kadar besi (Fe) dalam sedimen

Analisis kandungan logam Fe dalam sedimen dilakukan dengan memasukkan contoh sedimen ke dalam oven selama 3 jam lalu ditumbuk

sampai halus, sebanyak 2 gram sampel dimasukkan ke dalam labu, dididihkan dan ditambahkan dengan HNO_3 untuk didestruksi selama 3 jam kemudian disaring dan filtratnya diencerkan dan diukur dengan AAS.

9. Kadar besi (Fe) dalam tanaman

Contoh tanaman dikeringkan dalam oven, sebelumnya dipotong-potong agar pengeringan lebih cepat dan oven diset pada suhu 70°C . Contoh yang telah kering kemudian digiling dengan grinder mesin yang menggunakan filter dengan kehalusan 0,5 mm. Tanaman diekstrak dengan cara pengabuan basah menggunakan campuran asam pekat HNO_3 dan HClO_4 . Timbang 0,5 g contoh tanaman ke dalam tabung digestion. Ditambahkan 5 ml HNO_3 dan 0,5 ml HClO_4 dan biarkan satu malam. Kemudian dipanaskan dalam digestions blok dengan suhu 100°C selama satu jam, kemudian suhu ditingkatkan menjadi 150°C . Setelah uap kuning habis suhu digestion blok ditingkatkan menjadi 200°C . Destruksi selesai setelah keluar asap putih dan sisa ekstrak kurang lebih 0,5 ml. Tabung diangkat dan didinginkan. Ekstrak diencerkan dengan aquades hingga volume tepat 50 ml dan kocok dengan pengocok tabung hingga homogen. Kadar Fe dalam ekstrak diukur menggunakan spektrofotometer serapan atom (SSA).

10. Serapan unsur besi (Fe) dalam tanaman

Serapan unsur logam berat besi (Fe) dapat dihitung dengan cara mengukur terlebih dahulu berat kering akar tanaman dan kadar Fe dalam akar tanaman. Kemudian menghitung dengan rumus:

Serapan unsur Fe = BK x kadar Fe dalam jaringan

11. Serapan unsur mangan (Mn) dalam tanaman

Serapan unsur logam berat mangan (Mn) dapat dihitung dengan cara mengukur terlebih dahulu berat kering akar tanaman dan kadar Mn dalam akar tanaman. Kemudian menghitung dengan rumus:

Serapan unsur Mn = BK x kadar Mn dalam jaringan

E. Analisis Data

Analisis data menggunakan analisis varian (ANOVA) pada taraf 5%. Apabila terdapat beda nyata maka dilanjutkan dengan uji *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) dengan taraf 5%.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Air Asam Tambang

Sumber air asam tambang diperoleh dari *Water Monitoring Point* (WMP) 36 Pit C2C *Site* Sambarata PT. Berau Coal. Air asam tambang yang diambil adalah air asam pada kolam pengendapan yang sumbernya dari area disposal C2C. Pengambilan AAT menggunakan pompa dari unit *hydroseeding*. Sebelum air asam diremediasi dalam bak lahan basah buatan, air asam tambang terlebih dahulu dianalisis, dengan hasil seperti pada tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik air asam tambang *sediment pond* WMP 36 ST

Parameter	Sediment Pond WMP 36	Nilai Maksimum ^{*)}
pH	2,85	6-9
Fe total (mg/l)	6,03	7
Mn total (mg/l)	6,68	4

^{*)} = Baku Mutu Lingkungan Peraturan Daerah Provinsi Kalimantan Timur Nomor 2 Tahun 2011 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air

Hasil analisis pendahuluan air asam tambang *sediment pond* WMP 36 ST dapat dilihat di Tabel 2. Air asam tambang tersebut merupakan air tambang yang tidak atau sedikit mengandung alkalinitas (pH <4,5) dan mengandung Fe, Al, Mn, dan logam lainnya, asam (H⁺) dengan konsentrasi yang tinggi (Skousen, 1996). Tingginya kemasaman air yaitu dengan pH 2,85 menyebabkan konsentrasi logam terlarut yang tinggi. Jika dibandingkan

dengan baku mutu lingkungan Peraturan Daerah Provinsi Kalimantan Timur Nomor 2 Tahun 2011 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air, maka air asam tersebut belum memenuhi baku mutu, karena pH yang terlampau rendah dan kandungan mangan (Mn) yang masih di atas standar. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengolahan air asam tambang sebelum dibuang ke sungai agar air limbah tersebut tidak merusak lingkungan sekitar.

B. Pengaruh Komposisi Bahan Organik terhadap pH

Pada penelitian ini dilakukan analisis pH pada bak *wetland* setiap hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terjadi kenaikan pH secara bertahap dari yang semula 2,85 menjadi 4,15. Lain halnya dengan perlakuan kontrol tanpa bahan organik (A0) menunjukkan hasil pH yang stabil berkisar antara 3,02 – 3,05. Hasil pH pada sampel air media *wetland* dapat dilihat pada tabel 3.

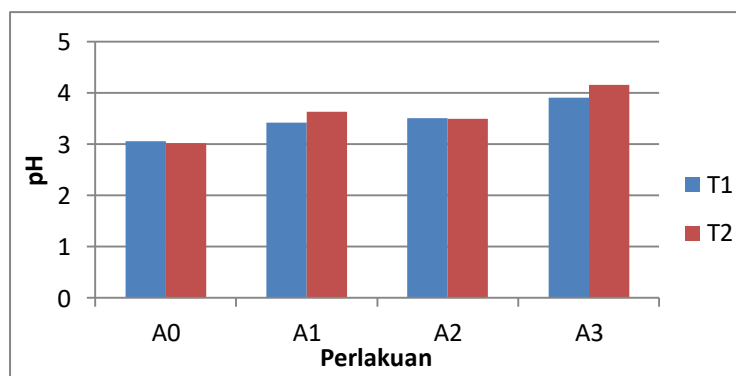
Tabel 3. Rerata pH air media *wetland*

Perlakuan	A0	A1	A2	A3	Rata-rata
T1	3,05c p	3,42b q	3,50b p	3,90a q	3,47k
T2	3,02c p	3,63b p	3,49b p	4,15a p	3,57j
Rata-rata	3,04z	3,53y	3,50y	4,03x	+

Keterangan : Rerata yang diikuti oleh huruf yang sama menunjukkan tidak ada beda nyata berdasarkan uji DMRT taraf 5%. Huruf a-c untuk menunjukkan rerata dalam baris, huruf p-q untuk menunjukkan rerata dalam kolom. Tanda (+) menunjukkan ada interaksi.

Dari tabel 3 menyajikan bahwa adanya interaksi antara kedua faktor yaitu antara perlakuan kombinasi bahan organik dan perlakuan waktu inkubasi. Perlakuan kombinasi bahan organik A0 dan A2 di perlakuan waktu inkubasi baik T1 maupun T2 tidak berbeda nyata, namun perlakuan kombinasi bahan organik A1 dan A3 di perlakuan waktu inkubasi T1 dan T2 berbeda nyata. Sedangkan untuk perlakuan waktu inkubasi T1 di semua perlakuan kombinasi bahan organik baik A0, A1, A2, maupun A3 berbeda nyata, begitu pula untuk waktu inkubasi T2. Pengaruh interaksi optimum pada kombinasi bahan organik A3 yaitu kompos+serbuk kayu (2:1) dan waktu inkubasi T2 (33 hari).

Hal ini menunjukkan bahwa pemberian bahan organik memberikan pengaruh nyata terhadap kenaikan pH air asam tambang. Dari keseluruhan perlakuan dapat dilihat bahwa semakin tinggi kompos yang diberikan semakin tinggi pula kenaikan pH. Pada hari ke-33 menunjukkan hasil yang lebih tinggi dibanding pada hari ke-15, dapat dilihat pada gambar 2. Hal ini berarti semakin lama proses remediasi di lahan basah buatan, maka semakin naik pula pH air tersebut.

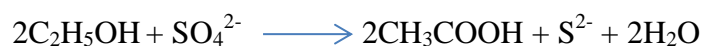


Gambar 2. Hubungan antara perlakuan terhadap pH air media *wetland*

Peningkatan pH dapat disebabkan karena pada kondisi tergenang terjadi proses reduksi dimana ion Fe^{3+} akan direduksi menjadi Fe^{2+} yang melepaskan ion OH^- yang akan mengikat ion H^+ sehingga ion kemasaman berkurang dan pH meningkat (Stevenson, 1982).

Kompos merupakan bahan organik yang telah matang sehingga mengandung banyak asam-asam organik. Asam organik inilah yang digunakan oleh bakteri pereduksi sulfat sebagai donor elektron, sehingga proses reduksi sulfat dapat terjadi lebih cepat dan pH dapat naik dengan lebih baik. Semakin banyak komposisi kompos yang digunakan maka semakin naik pula pH air tersebut.

Bakteri pereduksi sulfat dicirikan oleh respirasi anaerobik dengan menggunakan sulfat sebagai pusat penerima elektron. Reaksi reduksi sulfat adalah sebagai berikut:



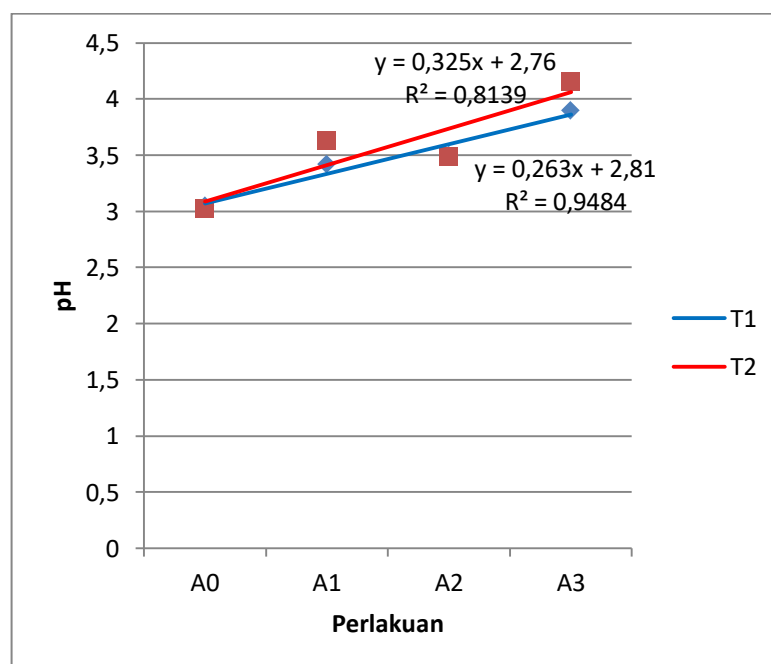
Reduksi sulfat merupakan penyebab utama dalam netralisasi pH dan pengurangan sulfat dan logam beracun. Bakteri pereduksi sulfat menghasilkan 2 mol alkalinitas per satu mol sulfat yang direduksi. Peranan bahan organik adalah sebagai penghasil alkalinitas (bikarbonat), di mana asetat sebagai donor elektron, dan bakteri pereduksi sulfat sebagai pelaku utama proses reduksi sulfat. Reaksi alkalinitas dapat dilihat pada reaksi berikut:



Pada perlakuan A0 menunjukkan hasil yang stabil berkisar antara 3,02 – 3,05. Hal ini disebabkan karena media padat lahan basah buatan yang

digunakan tidak mengandung bahan organik yang dapat menstimulasi pertumbuhan bakteri pereduksi sulfat.

Untuk memperjelas arah garis ada tidaknya interaksi, maka dibuat grafik regresi perlakuan terhadap pH air media *wetland* (Gambar 3).



Gambar 3. Regresi antara perlakuan terhadap pH air media *wetland*

Grafik regresi menjelaskan bahwa adanya interaksi yang tinggi antara kedua perlakuan dibuktikan dengan kedua garis yang berpotongan. Untuk garis T1 didapatkan hasil R^2 sebesar 0,948 yang berarti bahwa 94,8% perlakuan penambahan bahan organik berpengaruh terhadap kenaikan pH di T1, sedangkan 5,2% sisanya disebabkan oleh faktor lain. Nilai 2,81 menunjukkan intersep yang artinya garis tersebut dimulai di angka 2,81. Nilai 0,263 adalah angka koefisien (slope) persamaan tersebut yang artinya nilai ini

menunjukkan besarnya perubahan nilai Y jika nilai X berubah sebesar satu satuan. Begitu pula untuk penjelasan garis T2.

C. Pengaruh Lahan Basah Buatan terhadap Fe dan Mn

Berdasarkan Peraturan Daerah Provinsi Kalimantan Timur Nomor 2 Tahun 2011 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air, kadar maksimal Fe dan Mn masing-masing sebesar 7 mg/l dan 4 mg/l. Hasil konsentrasi Fe dalam air media *wetland* dapat dilihat pada tabel 4.

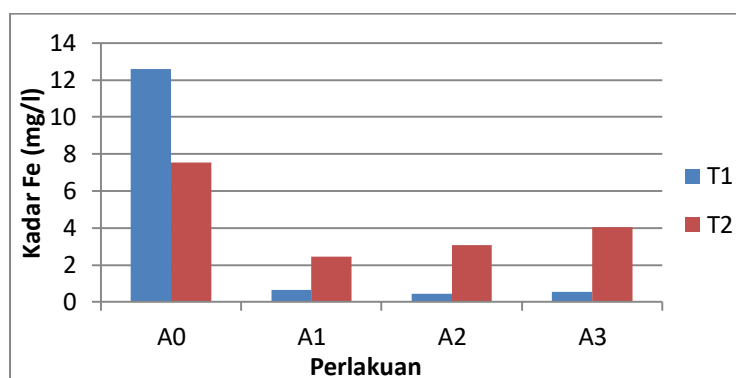
Tabel 4. Rerata konsentrasi Fe dalam air media *wetland* (mg/l)

Perlakuan	A0	A1	A2	A3	Rata-rata
T1	12,58	0,65	0,44	0,56	3,56j
T2	7,53	2,44	3,06	4,03	4,27j
Rata-rata	10,06x	1,55x	1,75x	2,29x	-

Keterangan : Rerata yang diikuti oleh huruf yang sama menunjukkan tidak ada beda nyata berdasarkan uji DMRT taraf 5%. Tanda (-) menunjukkan tidak ada interaksi.

Data pada tabel 4. menunjukkan kandungan Fe terlarut dalam air media lahan basah setelah inkubasi selama 15 dan 33 hari. Hasil dari penelitian yaitu pada semua perlakuan memberikan hasil tidak berbeda nyata. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan dengan penambahan bahan organik berpengaruh tidak nyata terhadap konsentrasi Fe terlarut. Faktor waktu juga memberikan hasil yang tidak berbeda nyata. Hal ini menunjukkan bahwa pada hari ke-33 pun baik tanaman maupun bahan organik belum mengalami kejenuhan dalam menyerap logam berat Fe pada air asam tambang.

Perlakuan dengan penambahan bahan organik memang berpengaruh tidak nyata terhadap penurunan konsentrasi Fe dalam air, namun dapat dilihat pada gambar 4. bahwa perlakuan kontrol (A0) memiliki kadar Fe yang sangat tinggi bila dibandingkan dengan perlakuan yang lain.



Gambar 4. Hubungan antara perlakuan terhadap konsentrasi Fe dalam air

Pada sistem lahan basah buatan (*constructed wetland*) sebenarnya telah mampu menurunkan konsentrasi Fe terlarut pada air asam tambang. Penurunan ketersediaan logam ini juga terjadi secara kimia akibat meningkatnya nilai pH yang terjadi karena adanya penambahan bahan organik dan aktivitas BPS. Hal ini terjadi karena dalam aktivitas mikroorganisme yang berada di lahan basah menghasilkan H_2S yang bersifat reaktif dan segera bereaksi dengan logam-logam membentuk senyawa logam sulfida yang sukar larut (Prianto, 2016). Akibat aktivitas mikroorganisme ini logam akan terpresipitasi sehingga kelarutan logam menjadi rendah dan diharapkan konsentrasinya tidak berbahaya bagi lingkungan. Faktor lain yaitu pada kondisi pH di atas 3 maka ion Fe^{3+} akan menjadi $Fe(OH)_3$ atau besi hidroksida yang mengendap sehingga kelarutannya turun.

Dalam proses penurunan logam berat, terdapat 4 kemungkinan yang menyebabkan terjadinya penurunan konsentrasi logam Fe terlarut pada *wetland* yaitu:

1. Interaksi antara sulfida (S^{2-}) yang dihasilkan pada proses reduksi sulfat dengan logam bervalensi 2 (seperti Fe^{2+}) membentuk logam sulfida yang mengendap.
2. Proses absorpsi logam oleh jaringan tanaman.
3. Proses adsorpsi logam oleh bahan organik.
4. Proses biopsorpsi logam oleh mikroorganisme yang terdapat pada lingkungan lahan basah (Madaniyah, 2016).

Parameter lainnya yang diukur dalam penelitian ini adalah kandungan kadar Mn terlarut. Rerata konsentrasi Mn ditampilkan pada tabel 5.

Tabel 5. Rerata konsentrasi Mn dalam air media *wetland* (mg/l)

Perlakuan	A0	A1	A2	A3	Rata-rata
T1	13,45a q	17,24a p	12,99a p	15,62a p	14,83k
T2	21,65a p	18,92ab p	15,46b p	14,44b p	17,62j
Rata-rata	17,55x	18,08x	14,23y	15,03xy	+

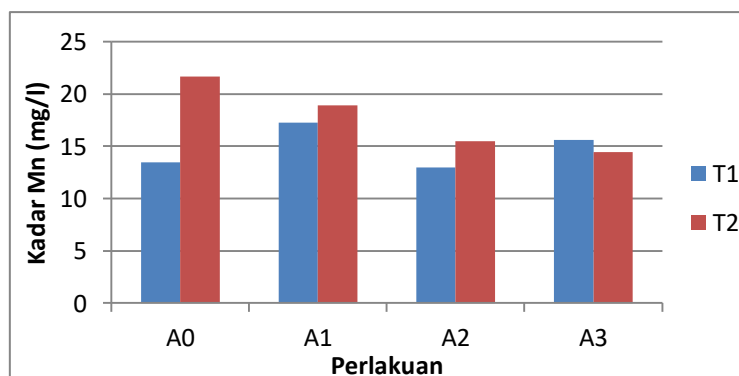
Keterangan : Rerata yang diikuti oleh huruf yang sama menunjukkan tidak ada beda nyata berdasarkan uji DMRT taraf 5%. Huruf a-c untuk menunjukkan rerata dalam baris, huruf p-q untuk menunjukkan rerata dalam kolom. Tanda (+) menunjukkan ada interaksi.

Data pada tabel 5. menunjukkan hasil rerata konsentrasi Mn terlarut setelah inkubasi 15 dan 33 hari. Jika dilihat pada perlakuan T2 atau 33 hari

menunjukkan hasil bahwa semakin tinggi kombinasi kompos yang digunakan maka semakin rendah kelarutan logam Mn.

Adanya interaksi antara kedua faktor tersebut menunjukkan hasil bahwa perlakuan kombinasi bahan organik A1, A2 dan A3 di perlakuan waktu inkubasi baik T1 maupun T2 tidak berbeda nyata, namun perlakuan kombinasi bahan organik A0 di perlakuan waktu inkubasi T1 dan T2 berbeda nyata. Sedangkan untuk perlakuan waktu inkubasi T1 di semua perlakuan kombinasi bahan organik baik A0, A1, A2, maupun A3 tidak berbeda nyata, namun untuk perlakuan waktu inkubasi T2 menunjukkan bahwa A0 berbeda nyata dengan A2 dan A3 namun tidak berbeda nyata dengan A1 dan A1 tidak berbeda nyata dengan A2 dan A3. Pengaruh interaksi optimum pada kombinasi bahan organik A3 yaitu kompos+serbuk kayu (2:1) dan waktu inkubasi T2 (33 hari).

Pada perlakuan T1 didapatkan hasil yang fluktuatif, lain halnya pada perlakuan T2 yang hasilnya stabil mengalami penurunan, seperti dilihat pada gambar 5.

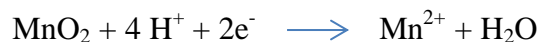


Gambar 5. Hubungan antara perlakuan terhadap konsentrasi Mn dalam air

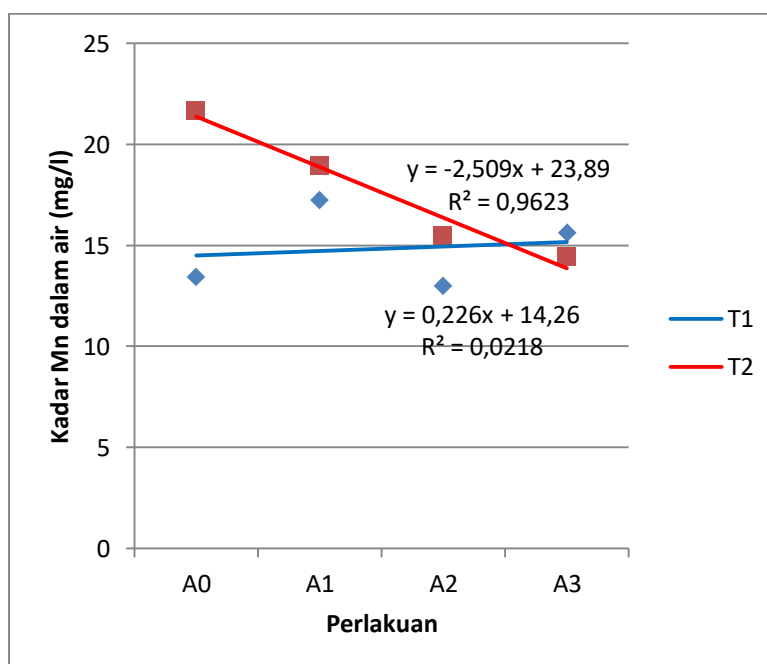
Hal ini disebabkan karena kompos merupakan bahan organik matang yang mengandung humus. Prasetyono (2015) menemukan bahwa kompos dapat digunakan untuk meminimalisasi logam berat karena kandungan humus di dalamnya. Substansi yang terkandung pada kompos di antaranya yaitu asam humat dan asam fulvat. Kandungan asam humat dan asam fulvat memiliki kemampuan mengadsorpsi logam berat oleh kompos karena gugus fungsi pada kedua substansi tersebut. Substansi-substansi humus ini mengandung gugus fungsi karboksil atau gugus fungsi $-\text{COOH}$. Pada kompos yang telah terdekomposisi, gugus fungsi akan mengalami proses deprotonisasi sehingga ion H^+ akan lepas dari persenyawaannya dan gugus fungsi bermuatan negatif. Pola penghilangan logam berat oleh humus yaitu dengan mengadsorpsi ion logam dan juga membentuk senyawa kompleks serta kelat sehingga logam tersebut sulit untuk bebas. Proses khelasi ini dapat disebabkan karena ikatan antar muatan yang disebut dengan kelat elektrostatik. Hal inilah yang terjadi pada pengikatan logam berat Fe dan Mn oleh bahan organik. Nurhayati dan Sutrisno (2011) menyatakan bahwa kompos yang mengandung substansi humus (asam fulvat, asam humat dan humin) mampu mengadsorpsi kompleks logam berat melalui pertukaran kation, pembentukan kelat, dan ikatan elektrostatik.

Jika dibandingkan dengan konsentrasi Mn terlarut sebelum perlakuan, hasil dari penelitian menunjukkan kenaikan konsentrasi Mn terlarut. Hal ini bisa disebabkan karena terjadinya proses reduksi dari MnO_2 yang terdapat pada lumpur menjadi Mn^{2+} . Kelarutan Mn^{2+} menjadi tinggi di dalam air

sehingga ketika dianalisis hasilnya menjadi lebih besar. Karena pada saat kondisi tergenang (reduksi), Mn akan direduksi lebih dahulu dibanding Fe sehingga Mn^{2+} lebih besar daripada Fe^{2+} . Reaksi reduksi mangan oksida terjadi sebagai berikut:



Untuk memperjelas arah garis ada tidaknya interaksi, maka dibuat grafik regresi perlakuan terhadap konsentrasi Mn dalam air (Gambar 6).



Gambar 6. Regresi antara perlakuan terhadap konsentrasi Mn dalam air

Grafik regresi menjelaskan bahwa adanya interaksi yang tinggi antara kedua perlakuan dibuktikan dengan kedua garis yang berpotongan. Untuk garis T2 didapatkan hasil R^2 sebesar 0,96 yang berarti bahwa 96% perlakuan

penambahan bahan organik berpengaruh terhadap penurunan konsentrasi Mn di T2, sedangkan 4% sisanya disebabkan oleh faktor lain. Nilai 23,89 menunjukkan intersep yang artinya garis tersebut dimulai di angka 23,89. Nilai -2,509 adalah angka koefisien (slope) persamaan tersebut yang artinya nilai ini menunjukkan besarnya perubahan penurunan nilai Y jika nilai X berubah sebesar satu satuan. Begitu pula untuk penjelasan garis T1.

D. Akumulasi Fe dan Mn dalam Sedimen

Pada penelitian ini menggunakan kombinasi dari 2 macam bahan organik, yaitu kompos kotoran sapi dan serbuk kayu. Masing-masing bahan organik telah dilakukan analisis pendahuluan yaitu kadar Fe dan Mn yang terkandung di dalamnya serta nisbah C/N (pada tabel 6). Analisa C/N bertujuan untuk mengetahui kematangan bahan organik berdasarkan perbandingan karbon dan nitrogen yang terkandung dalam kompos dan serbuk gergaji. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nisbah C/N biomassa serbuk kayu lebih besar dibandingkan nisbah C/N biomassa kompos. Hal ini disebabkan karena limbah yang berasal dari serbuk gergaji segar memiliki kadar nitrogen yang rendah dan mengakibatkan nisbah C/N masih tinggi, sehingga mikroorganismea akan kekurangan N untuk sintesis protein dan pada akhirnya bahan organik tersebut belum matang (Prianto, 2016).

Tabel 6. Hasil analisis pendahuluan bahan organik

Bahan	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Nisbah C/N
Kompos	0,05	0,04	15,2
Serbuk Kayu	0,99	0,26	238

Perlakuan yang digunakan adalah mencampur lumpur AAT dengan bahan organik. Pada perlakuan A0 tidak menggunakan bahan organik, perlakuan A1 dengan kombinasi bahan organik kompos+serbuk kayu (1:2), perlakuan A2 dengan kompos+serbuk kayu (1:1), dan perlakuan A3 dengan kompos+serbuk kayu (2:1). Nisbah C/N kompos yang rendah menunjukkan bahwa kompos yang digunakan telah matang, lain halnya dengan serbuk kayu yang nisbah C/N sangat tinggi. Dari perlakuan tersebut, terlihat bahwa nisbah C/N yang rendah pada perlakuan A3 dengan kombinasi kompos+serbuk kayu (2:1). Selain itu, kadar Fe dan Mn pada bahan organik juga cukup rendah.

Hasil akumulasi Fe dalam sedimen dapat dilihat pada tabel 7. Kadar Fe tertinggi terdapat pada perlakuan A0 (kontrol).

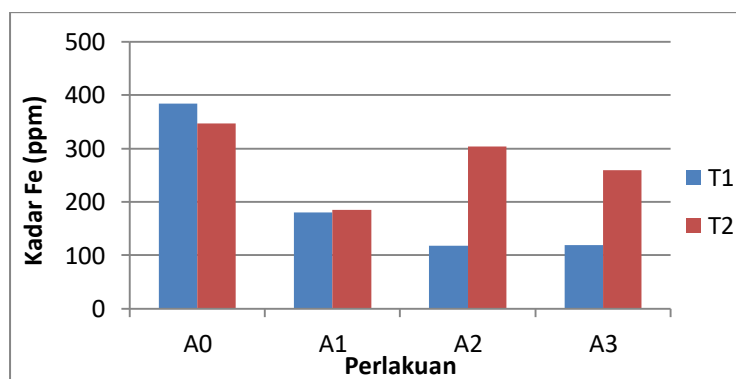
Tabel 7. Rerata kadar Fe dalam sedimen (ppm)

Perlakuan	A0	A1	A2	A3	Rata-rata
T1	383,67	179,67	117,67	119,33	200,08j
T2	347,33	184,67	304	259	273,75j
Rata-rata	365,5x	182,17y	210,83y	189,17y	-

Keterangan : Rerata yang diikuti oleh huruf yang sama menunjukkan tidak ada beda nyata berdasarkan uji DMRT taraf 5%. Tanda (-) menunjukkan tidak ada interaksi.

Pada perlakuan A0 menunjukkan hasil yang berbeda nyata dengan perlakuan yang lainnya. Pada perlakuan A1, A2, dan A3 menunjukkan hasil yang tidak berbeda nyata. Faktor perlakuan yang kedua yaitu waktu inkubasi tidak menunjukkan hasil yang berbeda nyata. Hal ini membuktikan bahwa bahan organik dapat menyerap Fe dalam konsentrasi yang besar.

Perlakuan kontrol (A0) menunjukkan hasil yang paling tinggi dibandingkan dengan perlakuan yang lain. Selain itu, pada perlakuan T2 juga menunjukkan hasil yang lebih tinggi dibandingkan T1, seperti pada gambar 7.



Gambar 7. Hubungan antara perlakuan terhadap kadar Fe dalam sedimen

Perlakuan A0 menunjukkan hasil yang paling tinggi disebabkan karena tidak dicampur bahan organik sehingga sedimen murni dari kolam pengendapan WMP 36 yang bersifat sangat asam dengan kandungan Fe masih sangat tinggi. Hal ini ditunjukkan dengan warna lumpur yang kehitam-

hitaman dengan warna kuning mengkilat (Gambar 9) menunjukkan indikasi adanya endapan *yellow boy*.



Gambar 9. Kondisi lumpur dalam kolam pengendapan WMP 36

Parameter lain yang diukur adalah kadar Mn dalam sedimen. Hasil rerata kadar Mn dalam sedimen dapat dilihat pada tabel 8.

Tabel 8. Rerata kadar Mn dalam sedimen (ppm)

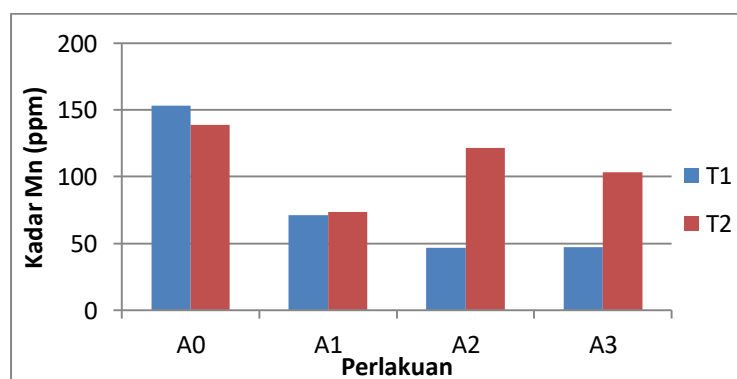
Perlakuan	A0	A1	A2	A3	Rata-rata
T1	153,33	71,33	46,67	47,33	79,67j
T2	138,67	73,33	121,33	103,33	109,17j
Rata-rata	146x	72,33y	84y	75,33y	-

Keterangan : Rerata yang diikuti oleh huruf yang sama menunjukkan tidak ada beda nyata berdasarkan uji DMRT taraf 5%. Tanda (-) menunjukkan tidak ada interaksi.

Dari tabel 8 dapat dilihat bahwa pada perlakuan A0 menunjukkan hasil yang berbeda nyata dengan perlakuan yang lainnya. Pada perlakuan A1, A2,

dan A3 menunjukkan hasil yang tidak berbeda nyata. Faktor perlakuan yang kedua yaitu waktu inkubasi tidak menunjukkan hasil yang berbeda nyata. Hal ini membuktikan bahwa bahan organik dapat menyerap Fe dalam konsentrasi yang besar.

Perlakuan kontrol (A0) menunjukkan hasil yang paling tinggi dibandingkan dengan perlakuan yang lain. Selain itu, pada perlakuan T2 juga menunjukkan hasil yang lebih tinggi dibandingkan T1. Hal ini dapat dilihat pada gambar 8.



Gambar 8. Hubungan antara perlakuan terhadap kadar Mn dalam sedimen

Perlakuan A0 menunjukkan hasil yang paling tinggi disebabkan karena tidak dicampur bahan organik sehingga sedimen murni dari kolam pengendapan WMP 36 yang bersifat sangat asam dengan kandungan Mn masih sangat tinggi. Peranan bahan organik adalah sebagai berikut:



Satu mol sulfida akan dihasilkan dari satu mol sulfat pada proses reduksi sulfat, sulfida ini akan mengendapkan logam berat dengan membentuk logam sulfida dengan kelarutan rendah.



Penyerapan ion logam oleh organisme mati dipercayai terjadi melalui proses adsorpsi yang melibatkan gugus fungsi yang berhubungan dengan protein, polisakarida, karboksilat, hidroksil, gugus sulfhidril dan biopolimer lain yang terdapat pada sel atau dinding sel (Puspitasari *dalam* Intan, 2016). Gugus-gugus polar ini diduga dapat berinteraksi dengan logam berat. Mekanisme serapan yang terjadi antara gugus –OH yang terikat pada permukaan dengan ion logam yang bermuatan positif (kation) merupakan mekanisme pertukaran ion (Nurhayati dan Sutrisno, 2011).

Kadar Fe dan Mn pada perlakuan A1, A2, maupun A3 menunjukkan hasil yang lebih kecil dibandingkan pada A0. Hal ini disebabkan karena banyaknya unsur logam Fe dan Mn yang dapat diserap oleh bahan organik. Pola penghilangan logam berat oleh bahan organik yaitu dengan mengadsorpsi ion logam dan juga membentuk senyawa kompleks serta kelat sehingga logam tersebut sulit untuk bebas. Kemungkinan besar yang terjadi adalah pada saat pengekstrakan sebelum dianalisis, pengekstrak tidak mampu melepas ikatan logam berat dengan bahan organik, sehingga sedikit sekali logam berat yang terukur dan sebagian besar masih terjerap dalam ikatan kelat bahan organik.

E. Akumulasi Fe dan Mn dalam Eceng Gondok

Hasil akumulasi Fe dalam jaringan tanaman dapat dilihat pada tabel 9. Pada jaringan akar tanaman eceng gondok sebelum perlakuan menunjukkan bahwa konsentrasi Fe tidak terdeteksi.

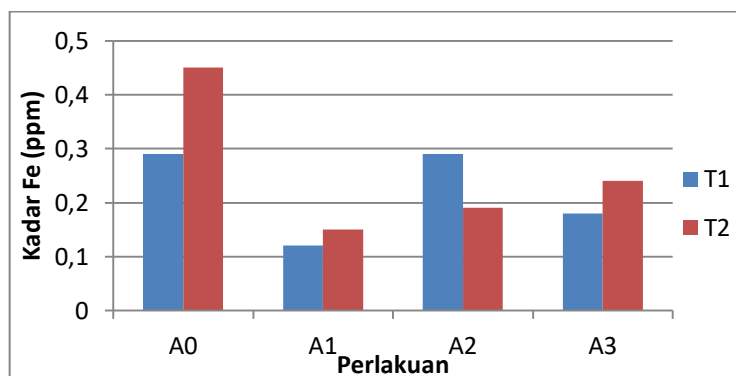
Tabel 9. Rerata kadar Fe dalam akar eceng gondok (ppm)

Perlakuan	A0	A1	A2	A3	Rata-rata
T1	0,29	0,12	0,29	0,18	0,22j
T2	0,45	0,15	0,19	0,24	0,26j
Rata-rata	0,37x	0,13y	0,24xy	0,21y	-

Keterangan : Rerata yang diikuti oleh huruf yang sama menunjukkan tidak ada beda nyata berdasarkan uji DMRT taraf 5%. Tanda (-) menunjukkan tidak ada interaksi.

Data tabel 9. menyajikan bahwa pada semua perlakuan, tanaman eceng gondok dapat menyerap kadar logam berat Fe dengan konsentrasi yang berbeda-beda. Kadar Fe terbesar di dalam akar eceng gondok yaitu pada perlakuan A0 dan menunjukkan hasil yang berbeda nyata pada perlakuan A1 dan A3, namun tidak berbeda nyata dengan perlakuan A2.

Kadar Fe tertinggi pada A0 disebabkan karena pada perlakuan A0 tidak ada bahan organik sehingga satu-satunya objek yang dapat menyerap logam Fe adalah tanaman dan hal ini menunjukkan kadar Fe dalam tanaman tinggi (pada gambar 10).



Gambar 10. Hubungan antara perlakuan terhadap kadar Fe dalam akar

Pada gambar 10. menunjukkan bahwa perlakuan A0 serapan kadar Fe oleh tanaman paling tinggi. Lain halnya pada perlakuan yang lain menunjukkan hasil yang fluktuatif.

Jika dilihat dari biomassa tanaman eceng gondok, pada perlakuan A0 menunjukkan biomassa yang kecil karena sebagian besar tanaman eceng gondok mati. Hal ini menunjukkan bahwa jika tanpa bahan organik, tanaman eceng gondok dapat menyerap logam Fe namun tidak dapat bertahan lama dan akhirnya mati (Gambar 11). Lain halnya pada perlakuan lain, tanaman eceng gondok dapat tumbuh dengan baik bahkan telah berkembang biak dengan menghasilkan anakan (Gambar 12).



Gambar 11. Kondisi tanaman pada perlakuan A0



Gambar 12. Kondisi tanaman pada perlakuan A1, A2, A3

Faktor kedua yaitu waktu inkubasi tidak menunjukkan hasil yang berbeda nyata. Hal ini menunjukkan bahwa baik di hari ke 15 maupun 33 tanaman eceng gondok belum mengalami kejenuhan dalam menyerap logam berat. Parameter lain yang diukur yaitu kadar Mn dalam tanaman eceng gondok yang dapat dilihat pada tabel 10.

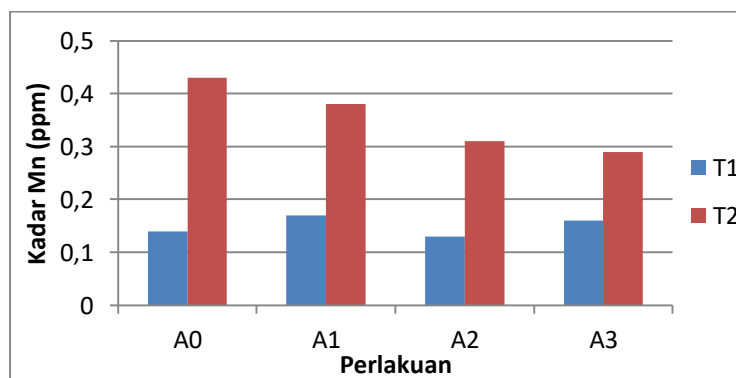
Tabel 10. Rerata kadar Mn dalam akar eceng gondok (ppm)

Perlakuan	A0	A1	A2	A3	Rata-rata
T1	0,14 a q	0,17 a q	0,13 a q	0,16 a q	0,15k
T2	0,43 a p	0,38 ab p	0,31 bc p	0,29 c p	0,35j
Rata-rata	0,29x	0,28x	0,22y	0,22y	+

Keterangan : Rerata yang diikuti oleh huruf yang sama menunjukkan tidak ada beda nyata berdasarkan uji DMRT taraf 5%. Huruf a-c untuk menunjukkan rerata dalam baris, huruf p-q untuk menunjukkan rerata dalam kolom. Tanda (+) menunjukkan adanya interaksi.

Data pada tabel 10. menunjukkan bahwa jaringan akar tanaman eceng gondok sebelum perlakuan hasilnya tidak terdeteksi. Adanya interaksi antara kedua faktor tersebut menunjukkan hasil bahwa perlakuan kombinasi bahan organik baik A0, A1, A2, maupun A3 di perlakuan waktu inkubasi T1 dan T2 semua berbeda nyata. Sedangkan untuk perlakuan waktu inkubasi T1 di semua perlakuan kombinasi bahan organik baik A0, A1, A2, maupun A3 tidak berbeda nyata, namun untuk perlakuan waktu inkubasi T2 menunjukkan bahwa A0 berbeda nyata dengan A2 dan A3 namun tidak berbeda nyata dengan A1, A1 tidak berbeda nyata dengan A2 namun berbeda nyata dengan A3, serta A2 dan A3 tidak berbeda nyata. Pengaruh interaksi optimum pada kombinasi bahan organik A0 yaitu tanpa penambahan bahan organik dan waktu inkubasi T2 (33 hari).

Kadar Mn terbesar di dalam akar eceng gondok yaitu pada perlakuan A0. Kadar Mn tertinggi pada A0 disebabkan karena pada perlakuan A0 tidak ada bahan organik sehingga satu-satunya objek yang dapat menyerap logam Mn adalah tanaman dan hal ini menunjukkan kadar Mn dalam tanaman tinggi. Serapan kadar Fe oleh tanaman paling tinggi pada perlakuan A0. Lain halnya pada perlakuan yang lain menunjukkan hasil yang fluktuatif. Hal ini dapat dilihat pada gambar 13.

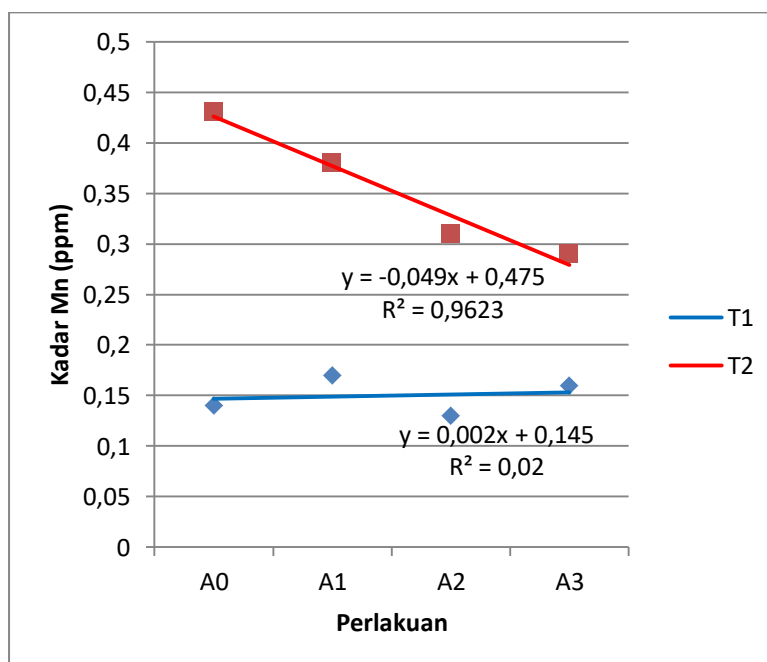


Gambar 13. Hubungan antara perlakuan terhadap kadar Mn dalam akar

Jika dilihat dari biomassa tanaman eceng gondok, pada perlakuan A0 menunjukkan biomassa yang kecil karena sebagian besar tanaman eceng gondok mati. Hal ini menunjukkan bahwa jika tanpa bahan organik, tanaman eceng gondok dapat menyerap logam Mn namun tidak dapat bertahan lama dan akhirnya mati. Lain halnya pada perlakuan lain, tanaman eceng gondok dapat tumbuh dengan baik bahkan telah berkembang biak dengan menghasilkan anakan.

Pengamatan dari hari ke-15 dan hari ke-33 menunjukkan hasil adanya kenaikan konsentrasi Mn pada tanaman eceng gondok. Hal ini dapat disebabkan karena dilihat dari hasil Mn terlarut dalam air asam tambang juga mengalami kenaikan, sehingga hal ini berbanding lurus terhadap penyerapan kadar Mn oleh akar tanaman eceng gondok.

Untuk memperjelas arah garis ada tidaknya interaksi, maka dibuat grafik regresi perlakuan terhadap kadar Mn dalam akar (Gambar 14).



Gambar 14. Regresi antara perlakuan terhadap kadar Mn dalam akar

Grafik regresi menjelaskan bahwa adanya interaksi yang menengah antara kedua perlakuan karena kedua garis belum berpotongan namun akan berpotongan di kuadran lain.. Untuk garis T1 didapatkan hasil R^2 sebesar 0,02 yang berarti bahwa 2% perlakuan penambahan bahan organik berpengaruh terhadap penyerapan kadar Mn oleh tanaman eceng gondok, sedangkan 98% sisanya disebabkan oleh faktor lain. Nilai 0,145 menunjukkan intersep yang artinya garis tersebut dimulai di angka 0,145. Nilai 0,002 adalah angka koefisien (slope) persamaan tersebut yang artinya nilai ini menunjukkan besarnya perubahan nilai Y jika nilai X berubah sebesar satu satuan. Begitu pula untuk penjelasan garis T2.

Akumulasi logam oleh tumbuhan bergantung pada banyak faktor yaitu:

1. Sifat alamiah tumbuhan, seperti: spesies, kecepatan tumbuh, ukuran dan kedalaman akar, kecepatan penguapan, serta kebutuhan nutrisi untuk metabolisme.
2. Faktor tanah, seperti: pH, kandungan dan sifat alamiah zat organik, status nutrisi, jumlah ion-ion logam dan anion-anion tertentu.
3. Variabel-variabel lingkungan dan pengelolaan yaitu temperatur, kelembaban, sinar matahari, curah hujan, pemupukan dan lain-lain (Irhamni, 2017).

Parameter selanjutnya yang dihitung adalah serapan kadar Fe dan Mn oleh tanaman eceng gondok.

$$\text{Serapan unsur Fe/Mn} = \text{BK} \times \text{kadar Fe/Mn dalam jaringan}$$

Tabel 11. Hasil perhitungan serapan Fe dan Mn dalam akar eceng gondok

Perlakuan	A0	A1	A2	A3
Berat Kering (gram)	2,9	3,4	3,7	4,1
Kadar Fe dalam tanaman (ppm)	0,37	0,13	0,24	0,21
Serapan Fe oleh tanaman (gram/rumpun)	1,07	0,44	0,89	0,86
Kadar Mn dalam tanaman (ppm)	0,29	0,28	0,22	0,22
Serapan Mn oleh tanaman (gram/rumpun)	0,84	0,95	0,81	0,90

Menurut Kelly (1997) mekanisme kerja fitoremediasi mencakup proses sebagai berikut:

1. Fitoekstraksi merupakan penyerapan polutan oleh tanaman dari air atau tanah dan kemudian diakumulasi atau disimpan di dalam tanaman (daun atau batang), tanaman seperti itu disebut dengan *hiperakumulator*.
2. Rhizofiltrasi adalah pemanfaatan kemampuan akar dalam menyerap, mengendapkan, dan mengakumulasi logam berat. Tetapi biasanya konsep dasar ini berlaku apabila media yang tercemarnya adalah badan perairan.
3. Fitodegradasi adalah proses penyerapan polutan oleh tanaman dan kemudian polutan tersebut mengalami metabolisme didalam tanaman. Metabolisme polutan didalam tanaman melibatkan enzim antara lain *nitroductase, laccase, dehalogenase* dan *nitrilase*.
4. Fitostabilisasi merupakan proses yang dilakukan oleh tanaman untuk mentransformasi polutan didalam tanah menjadi senyawa yang non toksik tanpa menyerap terlebih dahulu polutan tersebut kedalam tubuh tanaman.
5. Fitovolatilisasi merupakan proses penyerapan polutan oleh tanaman dan polutan tersebut dirubah menjadi bersifat *volatil* dan kemudian ditranspirasikan oleh tanaman. Polutan yang di lepaskan oleh tanaman keudara bisa sama seperti bentuk senyawa awal polutan, bisa juga menjadi senyawa yang berbeda dari senyawa awal.

F. Nilai pH, Kadar Fe dan Kadar Mn dalam Air

Tabel 12. Parameter pH, kadar Fe, dan kadar Mn dalam air pada perlakuan T1

Perlakuan	pH	Fe (mg/l)	Mn (mg/l)
A0	3,05	12,58	13,45
A1	3,42	0,65	17,24
A2	3,50	0,44	12,99
A3	3,90	0,56	15,62

Tabel 13. Parameter pH, kadar Fe, dan kadar Mn dalam air pada perlakuan T2

Perlakuan	pH	Fe (mg/l)	Mn (mg/l)
A0	3,02	7,53	21,65
A1	3,63	2,44	18,92
A2	3,49	3,06	15,46
A3	4,15	4,03	14,44

Jika dilihat dari kedua tabel tersebut, didapatkan hasil terbaik yaitu perlakuan A3 dengan kombinasi bahan organik kompos+serbuk kayu (2:1) dan waktu inkubasi T2 atau 33 hari. Hal ini ditunjukkan dengan parameter pH yang telah mencapai angka 4,15, kadar Fe yang tidak berbeda nyata dengan perlakuan yang lain, serta kadar Mn yang paling rendah dibandingkan perlakuan yang lain. Kenaikan pH hingga mencapai angka 4,15 dapat berpengaruh terhadap penurunan logam berat terlarut, kehidupan biota air, serta kemampuan hidup tanaman.

Kombinasi bahan organik yang terbaik yaitu A3 dengan komposisi kompos yang lebih besar dibandingkan serbuk kayu. Semakin tinggi ketebalan komposnya, maka semakin baik pula hasilnya. Hal ini disebabkan karena substansi yang terkandung pada kompos di antaranya yaitu asam humat, humin, dan asam fulvat. Lain halnya pada serbuk kayu belum mengalami dekomposisi, sehingga belum muncul muatan negatif pada gugus fungsi. Hermana dan Nurhayati *dalam* Prasetiyono (2015) menyatakan bahwa substansi humus memiliki kapasitas untuk membentuk kompleks dengan logam melalui pembentukan senyawa kompleks dan khelat. Substansi-substansi humus ini mengandung gugus fungsi karboksil atau gugus fungsi $-\text{COOH}$. Pada kompos yang telah terdekomposisi, gugus fungsi akan mengalami proses deprotonisasi sehingga ion H^+ akan lepas dari persenyawaannya dan gugus fungsi bermuatan negatif. Muatan negatif pada gugus fungsi ini akan berperan dalam mengikat logam berat di air serta mengikat ion H^+ yang akan menjadikan logam berat di air menjadi semakin rendah dan pH air semakin meningkat. Pola penghilangan logam berat oleh humus yaitu dengan mengadsorpsi ion logam dan juga membentuk senyawa kompleks serta kelat sehingga logam tersebut sulit untuk bebas. Proses khelasi ini dapat disebabkan karena ikatan antar muatan yang disebut dengan kelat elektrostatik. Hal inilah yang terjadi pada pengikatan logam berat Fe dan Mn oleh bahan organik.

G. Persebaran Fe dan Mn pada Air, Sedimen, dan Eceng Gondok

Tabel 14. Kadar Fe pada air, sedimen, dan tanaman di perlakuan T1

Fe	A0	A1	A2	A3
Air (mg/l)	12,58	0,65	0,44	0,56
Sedimen (ppm)	383,67	179,67	117,67	119,33
Tanaman (ppm)	0,29	0,12	0,29	0,18

Tabel 15. Kadar Fe pada air, sedimen, dan tanaman di perlakuan T2

Fe	A0	A1	A2	A3
Air (mg/l)	7,53	2,44	3,06	4,03
Sedimen (ppm)	347,33	184,67	304	259
Tanaman (ppm)	0,45	0,15	0,19	0,24

Tabel 16. Kadar Mn pada air, sedimen, dan tanaman di perlakuan T1

Mn	A0	A1	A2	A3
Air (mg/l)	13,45	17,24	12,99	15,62
Sedimen (ppm)	153,33	71,33	46,67	47,33
Tanaman (ppm)	0,14	0,17	0,13	0,16

Tabel 17. Kadar Mn pada air, sedimen, dan tanaman di perlakuan T2

Mn	A0	A1	A2	A3
Air (mg/l)	21,65	18,92	15,46	14,44
Sedimen (ppm)	138,67	73,33	121,33	103,33
Tanaman (ppm)	0,43	0,38	0,31	0,29

Jika dilihat dari tabel di atas, menunjukkan bahwa kadar Fe dan Mn dalam air asam tambang setelah diinkubasi dapat terpecah ke dalam 3 objek, yaitu terlarut, terendap di sedimen, dan diserap oleh akar tanaman. Kadar Fe maupun Mn dalam air (terlarut) dan dalam jaringan akar tanaman menunjukkan hasil yang lebih kecil dibandingkan dalam sedimen. Hal ini menunjukkan bahwa faktor yang paling mendominasi dalam proses remediasi air asam tambang yaitu pengaruh adanya bahan organik. Peranan bahan organik adalah sebagai berikut:



Satu mol sulfida akan dihasilkan dari satu mol sulfat pada proses reduksi sulfat, sulfida ini akan mengendapkan logam berat dengan membentuk logam sulfida dengan kelarutan rendah.

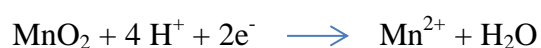


Penyerapan ion logam oleh organisme mati dipercayai terjadi melalui proses adsorpsi yang melibatkan gugus fungsi yang berhubungan dengan protein, polisakarida, karboksilat, hidroksil, gugus sulfhidril dan biopolimer lain yang terdapat pada sel atau dinding sel (Puspitasari *dalam* Intan, 2016). Gugus-gugus polar ini diduga dapat berinteraksi dengan logam berat. Mekanisme serapan yang terjadi antara gugus -OH yang terikat pada permukaan dengan ion logam yang bermuatan positif (kation) merupakan mekanisme pertukaran ion (Nurhayati dan Sutrisno *dalam* Intan, 2016).

Namun hal ini tidak menutup bahwa adanya peran tanaman eceng gondok dalam menyerap logam berat. Mekanisme kerja dari fitoremediasi

tanaman eceng-ecengan bersifat rizofiltrasi dan fitoekstraksi (Putri dkk, 2014). Fitoekstraksi yaitu proses tumbuhan menarik zat kontaminan dari media sehingga berakumulasi di sekitar akar tumbuhan. Tumbuhan hiperakumulator mempunyai kemampuan untuk mengkonsentrasikan logam di dalam biomasnya dalam kadar yang tinggi (Irhamni dkk, 2017).

Untuk parameter kadar Mn didapatkan hasil bahwa kadar Mn di air (terlarut) masih cukup tinggi jika dibandingkan dengan kadar Fe. Hal ini menunjukkan bahwa kemampuan bahan organik dan tanaman eceng gondok dalam penyerapan logam berat Mn cukup lemah. Tingginya Mn terlarut juga dapat disebabkan karena terjadinya proses reduksi dari MnO_2 yang terdapat pada lumpur menjadi Mn^{2+} . Kelarutan Mn^{2+} menjadi tinggi di dalam air sehingga ketika dianalisis hasilnya menjadi lebih besar. Karena, pada saat kondisi tergenang (reduksi), Mn akan direduksi lebih dahulu dibanding Fe sehingga Mn^{2+} lebih besar daripada Fe^{2+} . Reaksi reduksi mangan oksida terjadi sebagai berikut:



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa:

1. Sistem lahan basah buatan dapat meningkatkan pH air asam tambang dan mampu menurunkan kelarutan logam berat Fe dan Mn.
2. Penambahan bahan organik memberikan pengaruh nyata terhadap kenaikan pH dan penurunan konsentrasi Mn terlarut dalam remediasi air asam tambang, namun berpengaruh tidak nyata terhadap penurunan konsentrasi Fe dalam air. Bahan organik juga mampu menjerap logam berat Fe dan Mn.
3. Komposisi bahan organik terbaik dalam remediasi air asam tambang pada penelitian ini adalah pada perlakuan A3 yaitu dengan kompos+serbuk kayu (2:1) pada waktu inkubasi 33 hari.
4. Tanaman eceng gondok mampu menyerap logam berat Fe dan Mn pada sistem lahan basah buatan (*constructed wetland*). Mekanisme kerja dari fitoremediasi tanaman eceng-ecengan bersifat fitoekstraksi.

B. Saran

Hasil dari penelitian ini dapat diaplikasikan namun secara teori harus diperpanjang waktu inkubasinya agar didapatkan hasil yang lebih baik. Selain itu, untuk penelitian selanjutnya diharapkan ada parameter populasi bakteri

pereduksi sulfat (BPS). Jika akan dilakukan penelitian lanjutan, maka dapat dikombinasikan antara bahan organik dan inokulasi bakteri pereduksi sulfat (BPS) karena peran bahan organik yang lebih dominan dibandingkan peran dari fitoremediasi.

Untuk pengaplikasian di lapangan harus dilakukan *pre treatment* terlebih dahulu dengan metode ALD (*Anoxic Lime Drainage*). Hal ini disebabkan karena sistem *wetland* tidak dapat diaplikasikan secara tunggal pada pH yang terlampau rendah.

DAFTAR PUSTAKA

- Arif, I. 2007. *Perencanaan Tambang Total Sebagai Upaya Penyelesaian Persoalan Lingkungan Dunia Pertambangan*. Manado: Universitas Sam Ratulangi.
- Asyani, N. 2015. *Perubahan Kondisi Sosial Ekonomi Pemilik Lahan Tambang Pasir Besi di Desa Welahan Wetan Kecamatan Adipala Kabupaten Cilacap*. Program Studi Pendidikan Geografi Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Muhammadiyah Purwokerto.
- Chang IS, Shin PK, Kim BH. 2000. *Biological Treatment of Acid Mine Drainage Under Sulphate-Reducing Conditions with Solid Waste Materials as Substrate*. *Wat Res.* 34:1269–1277.
- Dhir, B. 2013. *Phytoremediation: Role of Aquatic Plants in Environmental Clean-Up*. New Delhi (IN): Springer.
- Djajadiningrat, ST. 2007. *Pertambangan Lingkungan dan Kesejahteraan Masyarakat*. Makalah Seminar Ilmiah Nasional: Mining, Environment and People Welfare. International Center for Coastal and Small Island Environment Studies. Universitas Sam Ratulangi.
- Gautama, RS. 2014. *Pembentukan AAT. Kursus dan Seminar air asam tambang Ke-5*. Bandung (ID) : Institut Teknologi Bandung.
- Greben HA, Maree JP, Eloff E, and Muray K. 2005. *Improved Sulphate Removal Rates at Increased Sulphide Concentration in The Sulphidogenic Bioreactor*. *Water SA* 31(3): 351-358.
- Gunawan F, Gautama RS, Abfertiawan MS, Kusuma GJ, Lepong Y, Saridi. 2014. *Penelitian dan Pengembangan Sistem Pengeolaan Air Asam Tambang di Lati Mine Operation*. Seminar Air Asam Tambang Ke-5 dan Pasca Tambang di Indonesia. Bandung (ID): Institut Teknologi Bandung.
- Hakim AM, Adhi W, Dadang ZH, Toni TA, Marsen A, Sidiq S, Ratnaningsih. 2009. *Penelitian Penanggulangan Air Asam Tambang pada Tambang Batubara Terbuka di Kalimantan Timur dan Kalimantan Selatan*. Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara.
- Hermana JE, dan Nurhayati. 2010. *Removal of Cr³⁺ and Hg²⁺ using Compost Derived From Muncipal Solid Waste Sustain*. *Environ. Res* 20: 257-261.
- Herwanto B, dan Santoso E. 2006. *Adsorpsi Ion Logam Pb(II) pada Membran Selulosa-Khitosan Terikat Silang*. Paper presented pada seminar nasional kimia VIII. Surabaya.

- Intan D, Irwan S, dan Paulus HA. 2016. *Pemanfaatan Biomassa Serbuk Gergaji sebagai Penyerap Logam Timbal*. Jurnal Akademika Kimia Volume 5 No. 4, 2016:166-171. Palu: Universitas Tadulako.
- Irhamni, Setiaty P, Edison P, Wirsal H. 2017. *Kajian Akumulator Beberapa Tumbuhan Air Dalam Menyerap Logam Berat Secara Fitoremediasi*. Volume: Vol 1, No 2 Januari-Juli 2017. ISSN:2541-1934. Conference: Jurnal Serambi Engineering Fakultas Teknik USM Banda Aceh.
- Joedodibroto, R. 1983. *Prospek Pemanfaatan Eceng Gondok Dalam Industri Pulp Dan Kertas*. Berita Selulosa. 29 (1): 3-7.
- Johnson DB and Hallberg KB. 2002. *Pitfalls Of Passive Mine Water Treatment*. Environ Sci BioTechnol 1:335-43.
- Kelly, EB. 1997. *Phytoremediation, Groundwater Pollution Primer*. Civil Engineering Department. Virginia Technology. Virginia.
- Lizama HM and Suzuki I. 1989. *Rate Equations And Kinetic Parameters Of The Reaction Involved In Pyrite Oxidation By Thiobacillus Ferrooxidans*. Appl. and Envi. Microbiol. 55:2918-2923.
- Logan MV, Reardon KF, Figueroa LA, McLain JET, and Ahmann DM. 2005. *Microbial Community Activies During Establishment, Performance, and Decline of Bench-Scale Passive Treatment Systems for Mine Drainage*. Water Research 39:4537-4551.
- Lottermoser, BG. 2010. *Mine Wastes, Characterization, Treatment and Enviromental Impacts*. 3rd edition. London (GB): Springer.
- Madaniyah. 2016. *Efektivitas Tanaman Air Dalam Pembersihan Logam Berat Pada Air Asam Tambang*. [Thesis]. Bogor: Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor.
- Munawar, A. 2007. *Pemanfaatan Sumber Daya Biologis Lokal untuk Pengendalian Pasif Air Asam Tambang*. Jurusan Ilmu Tanah Lingk. 7:31-42.
- Nasir, Subriyer, Marlis P, Otto S. 2014. *Pengolahan Air Asam Tambang dengan Menggunakan Membran Keramik Berbahan Tanah Liat, Tepung Jagung dan Serbuk Besi*. Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.
- Nurhasni. 2012. *Penyerapan Ion Aluminium dan Besi dalam larutan Sodium Silikat Menggunakan Karbon Aktif*. Valensi Vol. 2 No. 4, ISSN:1978-8193.
- Nurhayati I, dan Sutrisno J. 2011. *Limbah Ampas Tebu sebagai Penyerap Logam Berat Pb*. Paper presented pada seminar nasional Pengembangan Teknologi

Ramah Lingkungan Menuju Keberlanjutan Lingkungan Hidup. Surabaya: tidak diterbitkan.

Novotny V and Olem H. 1994. *Water Quality, Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution*. Van Nostrand Reinhold. 1054 pp.

Prasetyono, E. 2015. *Kemampuan Kompos dalam Menurunkan Logam Berat Timbal (Pb) pada Media Budidaya Ikan*. Jurnal Akuatika Vol.VI No.1/Maret 2015 (21-29) ISSN 0853-2532. Jurusan Budidaya Perairan, Fakultas Pertanian Perikanan dan Biologi, Universitas Bangka Belitung.

Prianto, AF. 2016. *Rekayasa Pengolahan Air Asam Tambang secara Pasif Menggunakan Biomassa Serbuk Gergaji, Kotoran Ayam, dan Bakteri Pereduksi Sulfat*. [Thesis]. Bogor: Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor.

Putri DY, Holis AH, Ida M, Anisa DA. 2014. *Pemanfaatan Tanaman Eceng-Ecengan (Ponteridaceae) sebagai Agen Fitoremediasi dalam Pengolahan Limbah Krom*. IJPST Volume 1, Nomor 1.

Riwandi dan Ali M. 2007. *Remediasi Air Asam Tambang Dengan Limbah Organik*. Ilmu Tanah Fakultas Pertanian UNIB.

Rustam, F. 2003. *Menilik Rehabilitas Lahan Tambang Kesempatan Usaha yang Menggiurkan*. Yogyakarta: Kanisius.

Said, IN. 2014. *Teknologi Pengolahan Air Asam Tambang Batubara "Alternatif Pemilihan Teknologi"*. JAI Vol. 7 No. 2. Pusat Teknologi Lingkungan, BPPT.

Sandrawati, A. 2012. *Pengelolaan Air Asam Tambang Melalui Rawa Buatan Berbasis Bahan In Situ di Pertambangan Batubara (Studi Kasus di Site Pertambangan Samarata, PT. Berau Coal, Kabupaten Berau, Provinsi Kalimantan Timur)*. [Thesis]. Bogor: Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor.

Skousen, J.G., and Ziemkiewicz P.F. 1996. *Acid Mine Drainage Control And Treatment*. 2nd Edition. National Research Center for Coal and Energy, West Virginia University, Morgantown, WV. 356 pp.

Skousen J, Rose A, Geidel G, Foreman J, Evans R, and Hellier W. 1998. *Handbook of Technologies for Avoidance and Remediation of AMD*. The National Mine Land Reclamation Centre. West Virginia.

Stumm W and Morgan JJ. 1981. *Aquatic Chemistry: an Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Water*. John Wiley Inc. New York.

Stevenson, FJ. 1982. *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reaction*. John Wiley and Sons. Canada. 443 pp.

- Subowo, G. 2011. *Penambangan System Terbuka Ramah Lingkungan dan Upaya Reklamasi Pasca Tambang untuk Memperbaiki Kualitas Sumberdaya Lahan dan Hayati Tanah*. Jurnal Sumberdaya Lahan Vol. 5 No. 2, Desember 2011. ISSN 1907-0799.
- Suprayitno. 2012. *Fitoremediasi Logam Fe Dalam Air Asam Tambang Dengan Media Eceng Gondok (Eichhornia crassipes Martius)*. [Skripsi]. Program Studi Manajemen Lingkungan Jurusan Manajemen Pertanian Politeknik Pertanian Negeri Samarinda.
- Tjitrosoepomo, G. 1996. *Taksonomi Tumbuhan Cet.Kelima*. Yogyakarta (ID): Gadjah Mada University Press.
- Tuheteru, FD. 2015. *Potensi Lonkida (Nauclea orientalis L.) untuk Fitoremediasi Lahan Basah Air Asam Tambang*. [Disertasi]. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.
- Vymazal, J. 2008. *Constructed wetland for waste water treatment: a review*. In Sagupta M, Dalwani R (eds). *Proceeding of Taal 2007: The 12th World Lake Conference*. p: 965-980.
- Yusron, M. 2009. *Pengolahan AAT Menggunakan Biofilm Bakteri Pereduksi Sulfat*. [Disertasi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Watzlaf GR, Schroeder KT, Kleinmann RLP, Kairies CL, and Nairn RW. 2004. *The Passive Treatment of Coal Mine Drainage*. US Department of Energy. Pittsburg, USA.

LAMPIRAN

LAMPIRAN



Gambar 1. Pembuatan kotak *wetland* **Gambar 2. Pengambilan serbuk kayu**



Gambar 3. Pengambilan eceng gondok **Gambar 4. Pengambilan air asam**



Gambar 5. Aklimatisasi tanaman



Gambar 6. Pemilihan tanaman



Gambar 7. Pengisian bak *wetland*



Gambar 8. Lahan basah buatan



Gambar 9. Pengukuran pH



Gambar 10. Pengambilan lumpur



Gambar 11. Analisis air asam



Gambar 12. Pengeringan tanaman

SPLIT PLOT KADAR FE DALAM BO

19:29 Monday, November 29, 2018

The ANOVA Procedure
Class Level Information

Class	Levels	Values
PERL	4	1 2 3 4
WAKTU	2	1 2
ULANGAN	3	1 2 3

Number of observations 24

The ANOVA Procedure

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
ULANGAN	2	9341.5833	4670.7917	0.67	0.5374
PERL	3	134949.8333	44983.2778	6.47	0.0156
PERL*ULANGAN	6	27413.4167	4568.9028	0.66	0.6866
WAKTU	1	32560.6667	32560.6667	4.68	0.0624
PERL*WAKTU	3	50797.3333	16932.4444	2.44	0.1397
Error	8	55613.0000	6951.6250		
Corrected Total	23	310675.8333			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Y Mean
0.820993	35.19229	83.37641	236.9167

SPLIT PLOT KADAR FE DALAM BO

The ANOVA Procedure

Duncan's Multiple Range Test for Y

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05		
Error Degrees of Freedom	8		
Error Mean Square	6951.625		
Number of Means	2	3	4
Critical Range	111.0	115.7	118.3

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	PERL
A	365.50	6	1
B	210.83	6	2
B	189.17	6	3
B	182.17	6	4

SPLIT PLOT KADAR FE DALAM BO

The ANOVA Procedure

Duncan's Multiple Range Test for Y

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	8
Error Mean Square	6951.625

Number of Means	2
Critical Range	78.49

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	WAKTU
A	273.75	12	2
A	200.08	12	1

Level of PERL	Level of WAKTU	N	-----Y----- Mean	Std Dev
1	1	3	383.666667	164.199066
1	2	3	347.333333	89.745938
2	1	3	117.666667	30.664855
2	2	3	304.000000	30.446675
3	1	3	119.333333	33.724373
3	2	3	259.000000	49.274740
4	1	3	179.666667	31.085902
4	2	3	184.666667	69.060360

SPLIT PLOT KADAR MN DALAM BO

19:29 Monday, November 29, 2018

The ANOVA Procedure
Class Level Information

Class	Levels	Values
PERL	4	1 2 3 4
WAKTU	2	1 2
ULANGAN	3	1 2 3

Number of observations 24

The ANOVA Procedure

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
ULANGAN	2	1490.58333	745.29167	0.67	0.5378
PERL	3	21727.16667	7242.38889	6.52	0.0153
PERL*ULANGAN	6	4411.08333	735.18056	0.66	0.6835
WAKTU	1	5221.50000	5221.50000	4.70	0.0620
PERL*WAKTU	3	8173.83333	2724.61111	2.45	0.1380
<u>Error</u>	<u>8</u>	<u>8885.66667</u>	<u>1110.70833</u>		
Corrected Total	23	49909.83333			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Y Mean
0.821966	35.29810	33.32729	94.41667

SPLIT PLOT KADAR MN DALAM BO
The ANOVA Procedure

Duncan's Multiple Range Test for Y

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	8
Error Mean Square	1110.708

Number of Means	2	3	4
Critical Range	44.37	46.24	47.28

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	PERL
A	146.00	6	1
B	84.00	6	2
B	75.33	6	3
B	72.33	6	4

SPLIT PLOT KADAR MN DALAM BO

The ANOVA Procedure

Duncan's Multiple Range Test for Y

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	8
Error Mean Square	1110.708

Number of Means	2
Critical Range	31.37

Means with the same letter are not significantly different.

		Duncan Grouping	Mean	N	WAKTU
		A	109.17	12	2
		A	79.67	12	1
Level of PERL	Level of WAKTU	-----Y-----			Std Dev
		N	Mean		
1	1	3	153.333333		65.5769268
1	2	3	138.666667		36.1155553
2	1	3	46.666667		12.4230968
2	2	3	121.333333		12.2202019
3	1	3	47.333333		13.6503968
3	2	3	103.333333		19.6044213
4	1	3	71.333333		12.5033329
4	2	3	73.333333		27.5378527

SPLIT PLOT KADAR FE DALAM ECENG GONDOK

19:29 Monday, November 29, 2018

The ANOVA Procedure
Class Level Information

Class	Levels	Values
PERL	4	1 2 3 4
WAKTU	2	1 2
ULANGAN	3	1 2 3

Number of observations 24

The ANOVA Procedure

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
ULANGAN	2	0.00890833	0.00445417	0.36	0.7098
PERL	3	0.17391667	0.05797222	4.66	0.0364
PERL*ULANGAN	6	0.08565833	0.01427639	1.15	0.4165
WAKTU	1	0.00735000	0.00735000	0.59	0.4643
PERL*WAKTU	3	0.05458333	0.01819444	1.46	0.2961
Error	8	0.09956667	0.01244583		
Corrected Total	23	0.42998333			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Y Mean
0.768441	46.64567	0.111561	0.239167

SPLIT PLOT KADAR FE DALAM ECENG GONDOK

The ANOVA Procedure

Duncan's Multiple Range Test for Y

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05		
Error Degrees of Freedom	8		
Error Mean Square	0.012446		
Number of Means	2	3	4
Critical Range	1485	.1548	.1583

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	PERL
A	0.37000	6	1
B A	0.24000	6	2
B	0.21333	6	3
B	0.13333	6	4

SPLIT PLOT KADAR FE DALAM ECENG GONDOK
The ANOVA Procedure

Duncan's Multiple Range Test for Y

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	8
Error Mean Square	0.012446

Number of Means	2
Critical Range	.1050

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	WAKTU
A	0.25667	12	2
A	0.22167	12	1

Level of PERL	Level of WAKTU	-----Y-----		
		N	Mean	Std Dev
1	1	3	0.29000000	0.07000000
1	2	3	0.45000000	0.24248711
2	1	3	0.29333333	0.04041452
2	2	3	0.18666667	0.05131601
3	1	3	0.18333333	0.13428825
3	2	3	0.24333333	0.06506407
4	1	3	0.12000000	0.05567764
4	2	3	0.14666667	0.06110101

SPLIT PLOT KADAR MN DALAM ECENG GONDOK

19:29 Monday, November 29, 2018 20

The ANOVA Procedure
Class Level Information

Class	Levels	Values
PERL	4	1 2 3 4
WAKTU	2	1 2
ULANGAN	3	1 2 3

Number of observations 24

The ANOVA Procedure

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
ULANGAN	2	0.01243333	0.00621667	4.47	0.0498
PERL	3	0.02188333	0.00729444	5.24	0.0272
PERL*ULANGAN	6	0.03236667	0.00539444	3.88	0.0408
WAKTU	1	0.25215000	0.25215000	181.19	<.0001
PERL*WAKTU	3	0.02101667	0.00700556	5.03	0.0301
Error	8	0.01113333	0.00139167		
Corrected Total	23	0.35098333			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Y Mean
0.968280	14.87244	0.037305	0.250833

SPLIT PLOT KADAR MN DALAM ECENG GONDOK

The ANOVA Procedure

Duncan's Multiple Range Test for Y

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05		
Error Degrees of Freedom	8		
Error Mean Square	0.001392		
Number of Means	2	3	4
Critical Range	.04967	.05176	.05293

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	PERL
A	0.28500	6	1
A	0.27667	6	4
B	0.22333	6	3
B	0.21833	6	2

SPLIT PLOT KADAR MN DALAM ECENG GONDOK
The ANOVA Procedure

Duncan's Multiple Range Test for Y

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	8
Error Mean Square	0.001392
Number of Means	2
Critical Range	.03512

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	WAKTU
A	0.35333	12	2
B	0.14833	12	1

Level of PERL	Level of WAKTU	N	-----Y-----	
			Mean	Std Dev
1	1	3	0.13666667	0.05507571
1	2	3	0.43333333	0.11372481
2	1	3	0.12666667	0.02886751
2	2	3	0.31000000	0.06082763
3	1	3	0.15666667	0.06506407
3	2	3	0.29000000	0.05567764
4	1	3	0.17333333	0.00577350
4	2	3	0.38000000	0.01000000

SPLIT PLOT KADAR FE DALAM AAT

19:29 Monday, November 29, 2018

The ANOVA Procedure
Class Level Information

Class	Levels	Values
PERL	4	1 2 3 4
WAKTU	2	1 2
ULANGAN	3	1 2 3

Number of observations 24

The ANOVA Procedure

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
ULANGAN	2	70.0717583	35.0358792	0.89	0.4462
PERL	3	303.6928792	101.2309597	2.58	0.1259
ULANGAN*PERL	6	294.3929083	49.0654847	1.25	0.3737
WAKTU	1	3.0033375	3.0033375	0.08	0.7889
PERL*WAKTU	3	68.4230458	22.8076819	0.58	0.6433
Error	8	313.495267	39.186908		
Corrected Total	23	1053.079196			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Y Mean
0.702306	160.0156	6.259945	3.912083

SPLIT PLOT KADAR FE DALAM AAT

The ANOVA Procedure

Duncan's Multiple Range Test for Y

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05		
Error Degrees of Freedom	8		
Error Mean Square	39.18691		
Number of Means	2	3	4
Critical Range	8.334	8.685	8.881

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	PERL
A	10.055	6	1
A	2.297	6	3
A	1.752	6	2
A	1.545	6	4

SPLIT PLOT KADAR FE DALAM AAT
The ANOVA Procedure

Duncan's Multiple Range Test for Y

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	8
Error Mean Square	39.18691

Number of Means	2
Critical Range	5.893

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	WAKTU
A	4.266	12	2
A	3.558	12	1

Level of PERL	Level of WAKTU	-----Y-----		
		N	Mean	Std Dev
1	1	3	12.5800000	17.8591937
1	2	3	7.5300000	4.0332245
2	1	3	0.4433333	0.2569695
2	2	3	3.0600000	0.8252878
3	1	3	0.5600000	0.6766831
3	2	3	4.0333333	1.1118153
4	1	3	0.6500000	0.3831449
4	2	3	2.4400000	1.0836512

SPLIT PLOT KADAR MN DALAM AAT

19:29 Monday, November 29, 2018

The ANOVA Procedure
Class Level Information

Class	Levels	Values
PERL	4	1 2 3 4
WAKTU	2	1 2
ULANGAN	3	1 2 3

Number of observations 24

The ANOVA Procedure

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
ULANGAN	2	57.5685250	28.7842625	5.70	0.0289
PERL	3	63.7982833	21.2660944	4.21	0.0461
ULANGAN*PERL	6	153.0605417	25.5100903	5.05	0.0198
WAKTU	1	46.8162667	46.8162667	9.27	0.0159
PERL*WAKTU	3	69.5785667	23.1928556	4.59	0.0376
<u>Error</u>	<u>8</u>	<u>40.3838667</u>	<u>5.0479833</u>		
Corrected Total	23	431.2060500			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Y Mean
0.906347	13.84973	2.246772	16.22250

SPLIT PLOT KADAR MN DALAM AAT
The ANOVA Procedure

Duncan's Multiple Range Test for Y

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05		
Error Degrees of Freedom	8		
Error Mean Square	5.047983		
Number of Means	2	3	4
Critical Range	2.991	3.117	3.188

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	PERL
A	18.083	6	4
A	17.550	6	1
B A	15.032	6	3
B	14.225	6	2

SPLIT PLOT KADAR MN DALAM AAT
The ANOVA Procedure

Duncan's Multiple Range Test for Y

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	8
Error Mean Square	5.047983

Number of Means	2
Critical Range	2.115

Means with the same letter are not significantly different.

		Duncan Grouping	Mean	N	WAKTU
		A	17.6192	12	2
		B	14.8258	12	1
Level of PERL	Level of WAKTU	-----Y-----			
		N	Mean	Std Dev	
1	1	3	13.4500000	5.54949547	
1	2	3	21.6500000	5.63772117	
2	1	3	12.9866667	3.02612514	
2	2	3	15.4633333	2.80311137	
3	1	3	15.6233333	6.12435575	
3	2	3	14.4400000	2.74402988	
4	1	3	17.2433333	0.76271445	
4	2	3	18.9233333	0.54003086	

SPLIT PLOT PH AAT

21:32 Sunday, January 17, 2019

The ANOVA Procedure
Class Level Information

Class	Levels	Values
PERL	4	1 2 3 4
WAKTU	2	1 2
ULANGAN	3	1 2 3

Number of observations 24

The ANOVA Procedure

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
ULANG	2	0.31937500	0.15968750	28.56	0.0002
PERL	3	2.94531250	0.98177083	175.58	<.0001
ULANG*PERL	6	1.00442500	0.16740417	29.94	<.0001
WAKTU	1	0.06100417	0.06100417	10.91	0.0108
PERL*WAKTU	3	0.09421250	0.03140417	5.62	0.0228
<u>Error</u>	<u>8</u>	<u>0.04473333</u>	<u>0.00559167</u>		
Corrected Total	23	4.46906250			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Y Mean
0.989990	2.123605	0.074777	3.521250

SPLIT PLOT PH AAT
The ANOVA Procedure

Duncan's Multiple Range Test for Y

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	8
Error Mean Square	0.005592

Number of Means	2	3	4
Critical Range	.0996	.1037	.1061

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	PERL
A	4.02667	6	3
B	3.52500	6	4
B	3.49667	6	2
C	3.03667	6	1

SPLIT PLOT PH AAT
The ANOVA Procedure

Duncan's Multiple Range Test for Y

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	8
Error Mean Square	0.005592

Number of Means	2
Critical Range	.07040

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	WAKTU
A	3.57167	12	2
B	3.47083	12	1

Level of PERL	Level of WAKTU	-----Y-----		
		N	Mean	Std Dev
1	1	3	3.05333333	0.08144528
1	2	3	3.02000000	0.10583005
2	1	3	3.50333333	0.12423097
2	2	3	3.49000000	0.06082763
3	1	3	3.90333333	0.47521925
3	2	3	4.15000000	0.60605280
4	1	3	3.42333333	0.12858201
4	2	3	3.62666667	0.19399313

**UJI DUNCAN MULTIPLE RANGE TEST (DMRT)
KADAR pH AIR ASAM TAMBANG**

SSD	0,043
-----	-------

	2	3	4
Rp	3,261	3,398	3,475
SSR	0,140	0,146	0,149

			0,149	0,146	0,14		
			A0	A1	A2	A3	
T1			3,05	3,42	3,5	3,9	
	A3	3,9	0,85	0,48	0,4	0	a
	A2	3,5	0,45	0,08	0		b
	A1	3,42	0,37	0			b
	A0	3,05	0				c

			0,149	0,146	0,14		
			A0	A1	A2	A3	
T2			3,02	3,49	3,63	4,15	
	A3	4,15	1,13	0,66	0,52	0	a
	A1	3,63	0,61	0,14	0		b
	A2	3,49	0,47	0			b
	A0	3,02	0				c

			0,149		
			T2	T1	
A0			3,02	3,05	
	T1	3,05	0,03	0	p
	T2	3,02	0		p

			0,149		
			T2	T1	
A2			3,49	3,5	
	T1	3,5	0,01	0	p
	T2	3,49	0		p

			0,149		
			T1	T2	
A1			3,42	3,63	
	T2	3,63	0,21	0	p
	T1	3,42	0		q

			0,149		
			T1	T2	
A3			3,9	4,15	
	T2	4,15	0,25	0	p
	T1	3,9	0		q

**UJI DUNCAN MULTIPLE RANGE TEST (DMRT)
KADAR MN DALAM AIR ASAM TAMBANG**

SSD	1,297
-----	-------

	2	3	4
Rp	3,261	3,398	3,475
SSR	4,230	4,407	4,507

			4,507	4,407	4,23		
			A2	A0	A3	A1	
T1			12,99	13,45	15,62	17,24	
	A1	17,24	4,25	3,79	1,62	0	a
	A3	15,62	2,63	2,17	0		a
	A0	13,45	0,46	0			a
	A2	12,99	0				a

			4,507	4,407	4,23		
			A3	A2	A1	A0	
T2			14,44	15,46	18,92	21,65	
	A0	21,65	7,21	6,19	2,73	0	a
	A1	18,92	4,48	3,46	0		ab
	A2	15,46	1,02	0			b
	A3	14,44	0				b

			4,507		
			T1	T2	
A0			13,45	21,65	
	T2	21,65	8,2	0	p
	T1	13,45	0		q

			4,507		
			T1	T2	
A2			12,99	15,46	
	T2	15,46	2,47	0	p
	T1	12,99	0		p

			4,507		
			T1	T2	
A1			17,24	18,92	
	T2	18,92	1,68	0	p
	T1	17,24	0		p

			4,507		
			T2	T1	
A3			14,44	15,62	
	T1	15,62	1,18	0	p
	T2	14,44	0		p

**UJI DUNCAN MULTIPLE RANGE TEST (DMRT)
KADAR MN DALAM ECENG GONDOK**

SSD	0,022
-----	-------

	2	3	4
Rp	3,261	3,398	3,475
SSR	0,072	0,075	0,076

			0,076	0,075	0,072		
			A2	A0	A3	A1	
T1			0,13	0,14	0,16	0,17	
	A1	0,17	0,04	0,03	0,01	0	a
	A3	0,16	0,03	0,02	0		a
	A0	0,14	0,01	0			a
	A2	0,13	0				a

			0,076	0,075	0,072		
			A3	A2	A1	A0	
T2			0,29	0,31	0,38	0,43	
	A0	0,43	0,14	0,12	0,05	0	a
	A1	0,38	0,09	0,07	0		ab
	A2	0,31	0,02	0			bc
	A3	0,29	0				c

			0,076		
			T1	T2	
A0			0,14	0,43	
	T2	0,43	0,29	0	p
	T1	0,14	0		q

			0,076		
			T1	T2	
A2			0,13	0,31	
	T2	0,31	0,18	0	p
	T1	0,13	0		q

			0,076		
			T1	T2	
A1			0,17	0,38	
	T2	0,38	0,21	0	p
	T1	0,17	0		q

			0,076		
			T1	T2	
A3			0,16	0,29	
	T2	0,29	0,13	0	p
	T1	0,16	0		q