

BIDANG ILMU PERTANIAN

LAPORAN HASIL PENELITIAN FUNDAMENTAL

JUDUL PENELITIAN
UJI LABORATORIUM SIFAT-SIFAT LIMBAH ORGANIK DAN
MEKANISME REMEDIASI AIR ASAM TAMBANG

OLEH
DR. IR. RIWANDI, MS.
IR. ALI MUNAWAR, MSc. PhD.

DIBIYAI OLEH DIREKTORAT JENDERAL PENDIDIKAN TINGGI,
DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL
SESUAI DENGAN SURAT PERJANJIAN PELAKSANAAN HIBAH
PENELITIAN

NO: 27/SP2H/PP/DP2M/III/2007
TANGGAL 29 MARET 2007

PROGRAM ILMU TANAH JURUSAN BUDIDAYA PERTANIAN
FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS BENGKULU
2007

RINGKASAN

Riset dasar berjudul “Uji laboratorium sifat-sifat limbah organik dan mekanisme remediasi air asam tambang” dilaksanakan karena bermacam alasan. Pertama, limbah organik yang tersedia melimpah, mempunyai potensi sebagai pengendali air asam tambang, lebih murah daripada pemakaian bahan kimia. Alasan lainnya adalah sangat diperlukan pengendalian air asam tambang dengan teknologi pasif yang lebih mudah dalam pelaksanaannya dengan pemakaian limbah organik sebagai bahan dasarnya, dan kemampuan limbah organik menetralkan asam dan menjerap logam berat potensial sangat tinggi. Tujuan riset ini adalah karakterisasi sifat-sifat limbah organik yang digunakan untuk remediasi air asam tambang; identifikasi mekanisme yang bertanggung jawab terhadap kemampuan remediasi dari limbah organik; memilih jenis limbah organik yang mempunyai kemampuan remedial terbaik yang dapat digunakan dalam pengendalian air asam tambang. Manfaat riset ini adalah mengatasi masalah limbah air asam tambang; membantu mengurangi pencemaran lingkungan daratan dan perairan; membantu kesehatan lingkungan perairan; dan memperkaya khasanah ilmu pengetahuan dasar teknik pengendalian air asam tambang.

Riset ini dilaksanakan di Laboratorium Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Bengkulu pada bulan Maret sampai dengan Nopember 2007. Karakterisasi limbah organik dan air asam tambang dilakukan dengan menganalisis sifat-sifat kimia limbah organik dan air asam tambang di Laboratorium. Desain percobaan adalah percobaan inkubasi air (air asam tambang) dan limbah organik dalam botol tertutup rapat. Limbah organik yang dipakai adalah kulit kayu (asli maupun dikomposkan), janjang sawit (asli maupun dikomposkan), abu batubara, serbuk gergaji, dan pupuk kandang kotoran ayam. Inkubasi dilaksanakan selama 30 hari dengan perbandingan antara limbah organik dan air (dan air asam tambang) adalah 1:5 (250 g limbah organik dan 1250 mL air (air asam tambang)). Limbah organik dikeringkan, dipotong-potong halus lolos ayakan bermata saring 5 mm agar diperoleh contoh limbah organik yang homogen. Kemudian ditimbang 250 g limbah organik dan dicampur dengan air atau air asam tambang di dalam botol plastik (toples) merek Lion Star kapasitas 2.5 L diaduk rata dan diinkubasikan selama 30 hari.

Sifat-sifat air (air asam tambang) yang diamati adalah pH, potensial redoks (Eh), daya hantar listrik (DHL), kadar besi dan sulfat larut pada waktu hari pertama, 7, 14, dan 30 hari. Analisis regresi linier digunakan untuk melihat hubungan antara sifat-sifat air atau air asam tambang. Data yang diperoleh dari bentuk tabel diubah ke dalam gambar agar mudah untuk membacanya.

Hasil yang diperoleh sebagai berikut: karakteristik limbah organik diperoleh keasaman (pH) mendekati netral (pH 7) kecuali kulit kayu dan serbuk gergaji; daya hantar listrik (DHL) sangat beragam dari sangat rendah sampai sangat tinggi; bahan organik (C-organik) sangat tinggi, kecuali abu batubara; nitrogen total rendah kecuali kompos lumpur sawit, dan fosfor total rendah kecuali pupuk kandang; jumlah basa-basa (Na, K, Ca, Mg) rendah kecuali kompos kulit kayu dan kompos lumpur kayu; dan unsur mikro (Fe, Mn, Zn) sangat beragam dari sangat rendah pada abu batubara, dan tertinggi pada kompos lumpur kayu.

Hasil yang lain, karakteristik air asam tambang diperoleh bahwa keasaman (pH) rerata 2.5; DHL rerata 1394 $\mu\text{S}/\text{cm}$; kalsium (Ca) 33.73 ppm; magnesium (Mg) 83.31 ppm; Fe^{3+} 4,45 ppm; Fe^{2+} 0.06 ppm; aluminium (Al) 7.36 ppm; mangan (Mn) 4.42 ppm; alkalinitas (CaCO_3) 84.21 ppm; dan sulfat (SO_4) 407.28 ppm. Contoh air asam tambang yang diberi asam nitrat ketika dalam pengirimannya dianalisis di laboratorium menghasilkan karakteristik: ; Fe^{3+} 7,48 ppm; Fe^{2+} <0.1 ppm.

Hasil uji mekanisme remediasi limbah organik terhadap air asam tambang sebagai berikut: keasaman (pH) meningkat dari 2.5 (pH awal) menjadi mendekati netral (7), potensial redoks (Eh) sebagian bernilai positif rendah (reduksi-oksidasi) dan sisanya bernilai negatif (reduksi). Daya hantar listrik (DHL) sangat beragam mulai dari rerata terendah 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sampai dengan tertinggi 9000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, kadar besi larut (Fe) menurun menjadi sangat rendah, dan sulfat (SO_4) terjadi penurunan pada kulit kayu, kompos janjang sawit, dan serbuk gergaji, sedangkan limbah organik lainnya terjadi peningkatan kadar sulfatnya. Alasan peningkatan sulfat ini tidak diketahui dengan jelas.

Kesimpulan yang diperoleh bahwa sifat-sifat limbah organik sangat beragam dan kemampuan remediasinya berlainan satu dengan yang lain. Jenis limbah organik yang terbaik untuk remediasi air asam tambang adalah kulit kayu, kompos kulit kayu, dan serbuk gergaji.

PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Ilahi yang telah memberikan petunjuk kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan laporan ini dengan sebaik-baiknya. Riset dasar ini berjudul: Uji laboratorium sifat-sifat limbah organik dan mekanisme remediasi air asam tambang yang didanai oleh Direktorat Penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat (DP2M) – DIKTI DEPDIKNAS anggaran tahun 2007. Pelaksanaan riset ini dimulai pada bulan Maret sampai dengan Nopember 2007 dengan melibatkan 3 laboratorium (Laboratorium Tanah UNIB, Laboratorium Jurusan Tanah Fakultas Pertanian UGM, dan Laboratorium Kimia Tanah Balai Penelitian Tanah Bogor). Dalam pelaksanaan riset ini pada mulanya berjalan lancar sampai selesai, tetapi ketika sampel air asam tambang pengamatan tanggal 30 September 2007 yang dikirim ke Bogor pada tanggal 1 Oktober 2007 dan diterima oleh Laboratorium Kimia Tanah Bogor pada tanggal 22 Oktober 2007. Hambatan ini terjadi karena bertepatan dengan hari libur nasional (Hari raya Iedul Fitri 1 Syawal 1428 H). Oleh karena itu, data kadar besi (Fe) dan sulfat (SO_4) larut pada pengamatan tanggal 30 September 2007 belum dapat dilaporkan dalam laporan ini.

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Yth:

- Direktur DP2M DIKTI Depdiknas Jakarta yang telah memberikan kepercayaan dan membiayai riset dasar ini.
- Kepala Lembaga Penelitian UNIB yang telah memberikan informasi dan fasilitas yang cukup baik kepada peneliti.
- Dekan Fakultas Pertanian UNIB sebagai pimpinan Fakultas yang telah rela meluangkan waktunya bagi penulis untuk memfasilitasi riset dasar ini dapat berjalan baik.
- General manager Persero Tbk PTBA Tanjung Enim yang telah memberi izin pengambilan contoh air asam tambang sebagai bahan riset
- Ketua Laboratorium Jurusan Tanah Fakultas Pertanian UGM yang telah membantu mendapatkan data hasil analisis limbah organik dan air asam tambang.
- Manager Laboratorium Kimia Tanah Balai Penelitian Tanah Bogor yang telah membantu mendapatkan data hasil analisis air asam tambang selama riset berlangsung.
- Kepala dan staf Perencanaan Lingkungan (Ren-Ling) PTBA Tanjung Enim yang telah berbesar hati membantu ke lapangan dalam pengambilan contoh air asam tambang.
- Mahasiswa program Ilmu Tanah Fakultas Pertanian yang turut aktif melaksanakan riset ini mulai dari pengambilan sampel sampai berakhirnya riset ini.
- Pak Mansyur, Suroto, Dedi yang telah rela untuk membantu di laboratorium tanah memberikan pelayanan kepada penulis dalam percobaan laboratorium ini.
- Pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan disini juga diucapkan terima kasih banyak.

Penulis membuka kesempatan kepada pembaca untuk melayangkan kritik dan sarannya untuk perbaikan laporan ini kelak di kemudian hari.

Penulis

DAFTAR TABEL

No	Judul Gambar	Halaman
1	Potensial elektroda (potensial reduksi) reaksi paruh pada 25°C	8
2	Hasil analisis laboratorium sifat-sifat limbah organik	19
3	Hasil analisis laboratorium air asam tambang (sampel AAT tanpa diberi HNO ₃)	21
4	Hasil analisis laboratorium air asam tambang (sampel diberi HNO ₃)	21
5	Hasil pengamatan AAT di Laboratorium Tanah UNIB pada 2 September 2007	21

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul Gambar	Halaman
1	Hubungan antara pH dan waktu inkubasi kulit kayu (KK), kompos kulit kayu (KmKK), kompos lumpur kayu (KmLK) dalam air suling	23
2	Hubungan antara pH dan waktu inkubasi janjang sawit (JS), kompos janjang sawit (KmJS), kompos lumpur sawit (KmLS) dalam air suling	23
3	Hubungan antara pH dan waktu inkubasi abu batubara (AB), serbuk gergaji (SG), pupuk kandang (PK) dalam air suling	23
4	Hubungan antara pH dan waktu inkubasi kulit kayu (KK), kompos kulit kayu (KmKK), kompos lumpur kayu (KmLK) dalam air asam tambang (AAT)	25
5	Hubungan antara pH dan waktu inkubasi janjang sawit (JS), kompos janjang sawit (KmJS), kompos lumpur sawit (KmLS) dalam AAT	25
6	Hubungan antara pH dan waktu inkubasi abu batubara (AB), serbuk gergaji (SG), pupuk kandang (PK) dalam AAT	25
7	Nilai pH air pada perlakuan limbah organik yang diinkubasi dalam air suling selama 30 hari (rata-rata dari 4 ulangan dan 4 kali pengamatan inkubasi)	26
8	Nilai pH air pada perlakuan limbah organik yang diinkubasi dalam AAT selama 30 hari (rata-rata dari 4 ulangan dan 4 kali pengamatan inkubasi)	26
9	Hubungan antara Eh dan waktu inkubasi kulit kayu (KK), kompos kulit kayu (KmKK), kompos lumpur kayu (KmLK) dalam air suling	28
10	Hubungan antara Eh dan waktu inkubasi janjang sawit (JS), kompos janjang sawit (KmJS), kompos lumpur sawit (KmLS) dalam air suling	28
11	Hubungan antara Eh dan waktu inkubasi abu batubara (AB), serbuk gergaji (SG), pupuk kandang (PK) dalam air suling	28
12	Hubungan antara Eh dan waktu inkubasi kulit kayu (KK), kompos kulit kayu (KmKK), kompos lumpur kayu (KmLK) dalam air asam tambang (AAT)	30
13	Hubungan antara Eh dan waktu inkubasi janjang sawit (JS), kompos janjang sawit (KmJS), kompos lumpur sawit (KmLS) dalam AAT	30
14	Hubungan antara Eh dan waktu inkubasi abu batubara (AB), serbuk gergaji (SG), pupuk kandang (PK) dalam AAT	30
15	Hubungan antara Eh dan pH pada perlakuan kelompok kulit kayu (KK, KmKK, KmLK) dalam air suling yang diinkubasi 30 hari	32
16	Hubungan antara Eh dan pH pada perlakuan kelompok janjang sawit (JS, KmJS, KmLS) dalam air suling yang diinkubasi 30 hari	32
17	Hubungan antara Eh dan pH pada perlakuan kelompok abu batubara (AB, SG, PK) dalam air suling yang diinkubasi 30 hari	32

No.	Judul Gambar	Halaman
18	Hubungan antara Eh dan pH pada perlakuan kelompok kulit kayu (KK, KmKK, KmLK) dalam AAT yang diinkubasi 30 hari	34
19	Hubungan antara Eh dan pH pada perlakuan kelompok janjang sawit (JS, KmJS, KmLS) dalam AAT yang diinkubasi 30 hari	34
20	Hubungan antara Eh dan pH pada perlakuan kelompok abu batubara (AB, SG, PK) dalam AAT yang diinkubasi 30 hari	34
21	Nilai Eh air pada perlakuan limbah organik yang diinkubasi dalam air suling selama 30 hari (rata-rata dari 4 ulangan dan 4 kali pengamatan inkubasi)	36
22	Nilai Eh air pada perlakuan limbah organik yang diinkubasi dalam AAT selama 30 hari (rata-rata dari 4 ulangan dan 4 kali pengamatan inkubasi)	36
23	Hubungan antara DHL dan waktu inkubasi kulit kayu (KK), kompos kulit kayu (KmKK), kompos lumpur kayu (KmLK) dalam air suling	38
24	Hubungan antara DHL dan waktu inkubasi janjang sawit (JS), kompos janjang sawit (KmJS), kompos lumpur sawit (KmLS) dalam air suling	38
25	Hubungan antara DHL dan waktu inkubasi abu batubara (AB), serbuk gergaji (SG), pupuk kandang (PK) dalam air suling	38
26	Hubungan antara DHL dan waktu inkubasi kulit kayu (KK), kompos kulit kayu (KmKK), kompos lumpur kayu (KmLK) dalam AAT	40
27	Hubungan antara DHL dan waktu inkubasi janjang sawit (JS), kompos janjang sawit (KmJS), kompos lumpur sawit (KmLS) dalam AAT	40
28	Hubungan antara DHL dan waktu inkubasi abu batubara (AB), serbuk gergaji (SG), pupuk kandang (PK) dalam AAT	40
29	Hubungan antara DHL dan pH pada perlakuan kelompok kulit kayu (KK, KmKK, KmLK) dalam air suling	42
30	Hubungan antara DHL dan pH pada perlakuan kelompok janjang sawit (JS, KmJS, KmLS) dalam air suling	42
31	Hubungan antara DHL dan pH pada perlakuan kelompok abu batubara (AB, SG, PK) dalam air suling	42
32	Hubungan antara DHL dan pH pada perlakuan kelompok kulit kayu (KK, KmKK, KmLK) dalam AAT	44
33	Hubungan antara DHL dan pH pada perlakuan kelompok janjang sawit (JS, KmJS, KmLS) dalam AAT	44
34	Hubungan antara DHL dan pH pada perlakuan kelompok abu batubara (AB, SG, PK) dalam AAT	44
35	Nilai DHL air pada perlakuan limbah organik yang diinkubasi dalam air suling selama 30 hari (rata-rata dari 4 ulangan dan 4 kali pengamatan inkubasi)	45
36	Nilai DHL air pada perlakuan limbah organik yang diinkubasi dalam AAT selama 30 hari (rata-rata dari 4 ulangan dan 4 kali pengamatan inkubasi)	45

No.	Judul Gambar	Halaman
37	Hubungan antara Fe dan waktu inkubasi kulit kayu (KK), kompos kulit kayu (KmKK), kompos lumpur kayu (KmLK) dalam AAT	47
38	Hubungan antara Fe dan waktu inkubasi janjang sawit (JS), kompos janjang sawit (KmJS), kompos lumpur sawit (KmLS) dalam AAT	47
39	Hubungan antara Fe dan waktu inkubasi abu batubara (AB), serbuk gergaji (SG), pupuk kandang (PK) dalam AAT	47
40	Hubungan Fe dan pH pada perlakuan kelompok kulit kayu (KK, KmKK, KmLK) dalam AAT	49
41	Hubungan Fe dan pH pada perlakuan kelompok janjang sawit (JS, KmJS, KmLS) dalam AAT	49
42	Hubungan Fe dan pH pada perlakuan kelompok abu batubara (AB, SG, PK) dalam AAT	49
43	Kadar Fe air asam tambang pada perlakuan limbah organik yang diinkubasi dalam AAT selama 14 hari (rata-rata dari 4 ulangan dan 4 kali pengamatan inkubasi)	50
44	Hubungan antara SO ₄ dan waktu inkubasi kulit kayu (KK), kompos kulit kayu (KmKK), kompos lumpur kayu (KmLK) dalam AAT	52
45	Hubungan antara SO ₄ dan waktu inkubasi janjang sawit (JS), kompos janjang sawit (KmJS), kompos lumpur sawit (KmLS) dalam AAT	52
46	Hubungan antara SO ₄ dan waktu inkubasi abu batubara (AB), serbuk gergaji (SG), pupuk kandang (PK) dalam AAT	52
47	Hubungan antara SO ₄ dan pH pada perlakuan kelompok kulit kayu (KK, KmKK, KmLK) dalam AAT	54
48	Hubungan antara SO ₄ dan pH pada perlakuan kelompok janjang sawit (JS, SG, PK) dalam AAT	54
49	Hubungan antara SO ₄ dan pH pada perlakuan kelompok abu batubara (AB, SG, PK) dalam AAT	54
50	Kadar SO ₄ air asam tambang pada perlakuan limbah organik yang diinkubasi dalam AAT selama 14 hari (rata-rata dari 4 ulangan dan 4 kali pengamatan inkubasi)	55

DAFTAR LAMPIRAN

No	Judul Tabel Lampiran	Halaman
1	Hasil pengukuran sifat limbah organik (perlakuan limbah organik dalam air suling	66
2	Hasil pengukuran sifat air asam tambang dengan perlakuan limbah organik	68
3	Hasil analisis laboratorium kadar besi dan sulfat larut dalam air asam tambang setelah perlakuan dengan limbah organik pada pengukuran tanggal 1, 7, 14, dan 30 September 2007	70

BAB I PENDAHULUAN

Air asam tambang (AAT), disebut *Acid Mine Drainage* atau *Acid Rock Drainage*, merupakan bahan pencemar penting di sekitar wilayah penambangan batubara atau bahan mineral lainnya, karena sifatnya yang sangat masam (pH 2-3) dan mengandung logam-logam toksik (seperti Al, Fe, dan Mn) yang larut tinggi. Oleh karena itu, sebelum dialirkan ke perairan umum, AAT harus diperlakukan sedemikian rupa sehingga tingkat kemasaman dan kadar logamnya sampai batas ambang yang dapat diterima. Limbah organik/bahan organik diketahui dapat digunakan untuk memulihkan (remediasi) mutu AAT, sehingga bahan organik menjadi komponen penting pada beberapa teknik pengendalian AAT, seperti lahan basah buatan (*constructed wetland*).

Lahan basah buatan adalah sistem pengendalian air asam tambang dengan perlakuan pasif (*passive treatments*). Beberapa peneliti seperti Skousen & Jage, 1998, menyebutkan perlakuan pasif yang utama pengendalian air asam tambang adalah *aerobic wetlands*, *anaerobic wetlands*, *anoxic limestone drains (ALD)*, *successive alkalinity producing systems (SAPS)*, *limestone pond*, dan *open limestone channel (OLC)*. Demikian pula peneliti lain, Zipper et al, 2001 mempunyai pendapat yang sama dengan Skousen, tetapi ditambahkan perlakuan pasif yang disebut *vertical flow system*. Jenis perlakuan pasif ini tidak akan dibicarakan disini.

Perlakuan pasif air asam tambang di era moderen sekarang ini banyak digunakan karena tidak memerlukan input kimiawi secara terus menerus dan proses-proses yang terjadi berjalan secara alami untuk meminimalkan bahaya air asam tambang, biaya murah dan pemeliharannya lebih mudah. Sebaliknya, perlakuan aktif air asam tambang memerlukan biaya yang tinggi, pemeliharaan lebih sulit, dan memerlukan waktu lama untuk mencapai tujuan meminimalkan bahaya air asam tambang.

Salah satu komponen utama yang digunakan dalam perlakuan pasif pengendalian air asam tambang adalah limbah organik atau bahan organik (*organic matter*). Keuntungan penggunaan bahan organik dalam pengendalian air asam tambang adalah memacu pertumbuhan mikrob dan menghasilkan lingkungan yang anaerob melalui reduksi sulfat (Skousen & Jage, 1998). Penggunaannya yang lain bahan organik dapat

menurunkan keasaman 20% (1500 ke 1160 mg/L setara CaCO_3), dan menurunkan Fe, Mn, dan Al.

Penelitian lain menunjukkan bahwa permeabilitas atau porositas bahan organik adalah faktor kunci lapisan organik. Kulit kayu telah banyak digunakan dan berhasil di dalam waktu tunggu yang sangat lama. Kulit kayu bersifat permeabel atau porus, tetapi mempunyai BOD (*biochemical oxygen demand*) yang rendah karena proporsi ukuran kulit besar sangat banyak, dan tidak mudah dihancurkan oleh bakteri. Bahan organik yang lain yang mudah lapuk seperti pupuk kompos atau kompos mempunyai waktu tunggu yang lebih pendek dan menyediakan senyawa organik yang lebih tinggi. Beragam bahan organik yang telah digunakan berhasil termasuk kompos kayu, kompos jamur, kompos pupuk kandang, dan campuran bahan kompos dengan sumber bahan organik yang murah seperti limbah organik. Campuran bahan organik dan bahan kapur tidak direkomendasikan, karena potensial terjadi penjonjotan logam hidroksida di dalam pori-pori yang halus sehingga tidak efektif untuk pencucian logam (Zipper et al, 2001).

Di sekitar lokasi penambangan PT Tambang Batubara Bukit Asam (PERSERO) Tbk (PT BA), Tanjung Enim, Sumatera Selatan, terdapat beberapa jenis limbah organik, seperti kulit kayu dan lumpur kayu dari industri bahan kertas (*pulp industry*) PT Tanjung Enim Lestari, janjang dan lumpur kelapa sawit dari PT Perkebunan Nusantara VII Bengkulu, abu batubara di PT Perusahaan Listrik Tenaga Uap (PLTU) milik PTBA, dan pupuk kandang ayam dari peternak ayam di Bengkulu. Bahan organik yang sangat beragam ini memiliki sifat-sifat yang sangat berbeda-beda, sehingga kemampuan bahan organik meremediasi tentu sangat berbeda.

Sampai saat ini, kajian terhadap sifat-sifat, mekanisme atau reaksi-reaksi yang bertanggung jawab terhadap kemampuan remediasi bahan organik belum banyak dilakukan. Oleh karena itu, sangat diperlukan untuk melakukan penelitian ini.

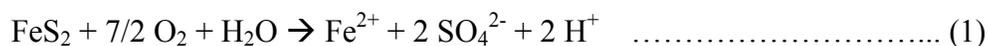
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Air Asam Tambang (AAT)

Air asam tambang (AAT) terjadi bila batuan yang mengandung mineral sulfida (misalnya pirit) terbuka atau terhampar mengalami kontak dengan udara dan air sehingga terjadi oksidasi. Proses oksidasi batuan atau mineral sulfida dipercepat dengan adanya bakteri. Hal ini biasanya terjadi pada kegiatan penambangan batu bara atau bahan tambang yang lain. AAT dihasilkan dari dinding-dinding batuan yang terpapar seperti lubang tambang, batuan limbah yang ditumpuk, dan material yang ditimbun. Adanya air permukaan akibat hujan akan memindahkan air asam, logam-logam- dan sulfat-larut ke air bawah tanah dan air permukaan (Kem, 2004).

Produksi asam dan pelarutan logam-logam merupakan persoalan utama yang berkaitan dengan pencemaran dari kegiatan penambangan terutama batubara. Pirit (FeS_2) bertanggung jawab terhadap dimulainya produksi asam dan pelarutan logam-logam di penambangan batubara dan tambang yang lainnya. Ketika pirit bersinggungan dengan oksigen dan air, akan terjadi oksidasi pirit, menghasilkan ion Hidrogen, keasaman, ion sulfat, dan kation logam yang larut. Oksidasi pirit ini terjadi di dalam batuan tak-terusik tetapi laju oksidasi sangat lambat dan air mampu menyanggah keasamannya. Penambangan meningkatkan persinggungan luas permukaan batuan mengandung sulfur sehingga diproduksi asam yang berlebihan di atas kemampuan daya sanggah air (Costello, 2003).

AAT dicirikan oleh konsentrasi sulfat, logam larut, dan kemasaman yang tinggi dengan $\text{pH} < 4,5$ (Skousen et al., 1996; Sexstone et al., 1999; Skousen et al., 1999; Skousen et al. 2000; dalam Costello, 2003). Reaksi oksidasi tersebut dapat disederhanakan sebagai berikut:



Oksidasi Fe^{2+} ke Fe^{3+} terjadi ketika ketersediaan oksigen yang larut dalam air cukup.



Besi (III) dapat diendapkan sebagai besi hidroksida berwarna merah jambu tampak di dalam air yang dipengaruhi oleh air asam tambang atau dapat bereaksi langsung dengan pirit menghasilkan besi (II) dan keasaman yang lebih banyak.



Ketika besi (II) dihasilkan (persamaan 4) dan ketersediaan oksigen terlarut cukup, siklus persamaan 2 dan 3 berjalan sempurna. Dengan tidak adanya oksigen terlarut, persamaan 4 akan terus berjalan sempurna (Younger, et al, 2002 dalam Costello, 2003).

Bakteri asidofilik adalah bakteri yang mampu hidup di dalam pH air asam yang rendah. Jasad renik termasuk bakteri dapat memainkan peranan penting dalam mempercepat reaksi-reaksi kimiawi di dalam air asam tambang. Bakteri yang biasanya berperanan penting adalah *Thiobacillus Ferroxidans*. Bakteri ini mengkatalisa oksidasi besi (II), dan berperanan dalam persamaan 2 sampai dengan 4.

Pemanfaatan bakteri pereduksi sulfat (BPS) sangat dianjurkan untk memindahkan logam-logam berat dari larutan menjadi endapan logam-sulfat (Zaluski et al, 2000 dalam Costello, 2003). Bakteri pereduksi sulfat mampu mereduksi sulfat ke sulfida larut ketika diberikan bahan organik, yakni kompos; yang menghasilkan ion asetat dan ion bikarbonat. Sulfida larut bereaksi dengan logam larut membentuk logam sulfida tak larut (persamaan 6); ion bikarbonat meningkatkan pH dan alkalinitas air (persamaan 5) (Zaluski, et al., 2000 dalam Costello, 2003). Bikarbonat juga memungkinkan memproduksi Zn-, Cu-, atau Mn-karbonat (Macalady, 1998 dalam Costello, 2003). Logam-logam yang membentuk endapan tak larut dengan sulfida adalah Cu, Zn, Cd, Pb, Ag, dan Fe (II) (Macalady, 1998 dalam Costello, 2003).

Ferguson dan Erickson dalam (US EPA, 1994) mengidentifikasi faktor utama, ke dua, dan ke tiga yang mengontrol asam tambang. Faktor utama yang terlibat dalam produksi asam adalah reaksi oksidasi. Faktor ke dua bertindak mengontrol produk reaksi oksidasi seperti reaksi-reaksi dengan mineral lain yang mengkonsumsi asam. Faktor ke dua ini menetralkan asam atau bereaksi dengan mineral lain. Faktor ke tiga merujuk ke aspek fisik manajemen limbah (yaitu pit wall, waste rock piles, atau tailing) yang mempengaruhi reaksi oksidasi, migrasi asam, dan konsumsinya. Faktor utama penghasil asam adalah mineral sulfida, air, oksigen, besi (II), bakteri yang mengkatalisa reaksi oksidasi dan panas yang dihasilkan. Faktor ke dua bertindak menetralkan asam yang dihasilkan oleh oksidasi sulfida atau mengubah sifat effluent dengan menambahkan ion logam atau bahan organik. Faktor ke tiga yang mempengaruhi asam tambang adalah karakteristik fisik bahan, bagaimana asam dihasilkan dan bagaimana bahan penetral ditempatkan.

Pembentukan asam sulfat pada reaksi mineral pirit menyebabkan AAT sangat masam. Kemasaman yang tinggi dapat meningkatkan kelarutan logam-logam, seperti Fe, Mn, Al, dan bahkan logam-logam berat, seperti Cu, Zn, Cd, Ni, dan Hg. Oleh karena itu, AAT telah menjadi persoalan lingkungan yang sangat serius di wilayah penambangan batubara dan sekitarnya. Jika mengalir ke perairan, AAT tidak saja meracun jasad hidup akuatik, tetapi juga dapat menyebabkan korosi pipa-pipa air dan bangunan perairan lain yang dilewatinya (Widdowson, 1990). Masyarakat di sekitar daerah pertambangan sering mengeluhkan munculnya penyakit gatal-gatal, akibat air sungai yang sudah tercemar oleh AAT. Bahkan jika AAT melewati daratan, tanah dapat menjadi sangat masam dan meningkatkan kelarutan logam-logam toksiknya, sehingga menyebabkan tanah menjadi media yang kurang baik untuk pertumbuhan tanaman.

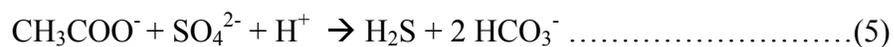
Pengambilan contoh batuan sangat penting untuk pengujian air asam tambang. Beberapa pendapat mengatakan bahwa jumlah contoh yang dikumpulkan sangat bervariasi bergantung pada perusahaan penambangan. Satu perusahaan penambangan menganjurkan sekitar 8 sampai dengan 12 contoh untuk setiap tipe batuan yang dominan atau satu contoh setiap satu juta ton (Schafer, 1993 dalam US EPA, 1994). US Forest Service menganjurkan satu contoh (kira-kira 1500 g) dikumpulkan untuk setiap 20 000

ton batuan limbah, atau 50 contoh setiap satu juta ton (USDA Forest Service 1992 dalam US EPA 1994).

Penetapan berapa banyak contoh yang harus diambil pada saat kapan saja bergantung pada variasi geologi dan bagaimana penambangan berkembang. Karena tidak pasti metode prediksi air asam tambang, pengambilan bahan limbah dilakukan sepanjang penambangan terus berjalan.

Bahan Organik dan Pengendalian AAT

Bahan organik merupakan salah satu komponen penting pengendalian pasif AAT dengan teknik lahan basah buatan (*constructed wetland, CWL*). Peran substrat organik antara lain menghambat oksidasi pirit melalui mekanisme: (1) konsumsi oksigen oleh bakteri selain *Thiobacillus ferrooxidans* dan *T. thiooxidans*, (2) pengambilan besi (III) dari larutan melalui kompleksasi, dan (3) pembentukan kompleks pirit-besi (II)-humat (Evangelou, 1995; Ditch dan Karathanasis, 1994). Bahan organik merupakan donor elektron bagi bakteri pereduksi sulfat (BPS), sebelum BPS melakukan reduksi sulfat dari AAT, yang menghasilkan endapan sulfida logam dan meningkatkan alkalinitas. Reaksi peningkatan alkalinitas akibat bahan organik (asetat sebagai donor elektron) dapat digambarkan sebagai berikut:



Reduksi satu molekul sulfat menghasilkan kurang lebih dua molekul alkalinitas. Satu mole sulfida dihasilkan setiap mole sulfat yang direduksi, dan sulfida ini akan bereaksi logam-logam larut dalam AAT, menghasilkan logam-logam sulfida yang mempunyai kelarutan rendah, seperti yang ditunjukkan oleh reaksi berikut:



dengan Me^{2+} sebagai simbol dari logam divalen larut dalam AAT (Skousen & Ziemkiewicz, 1996; Drury, 1999).

Bahan organik dapat menurunkan Fe dari 32 mg/L ke 5 mg/L (84%), Mn dari 15 ke 14 mg/L (7%), dan bahan suspensi total dari 32 ke 12 mg/L (63%), tetapi semua tapak jerapan bahan organik diisi dengan logam-logam dari air asam (Brodie et al. 1988 dalam Skousen, 1998). Bahan organik telah digunakan sebagai suatu strategi yang berhasil untuk memperbaharui kapasitas jerapan sementara, selanjutnya kemampuannya menurun di dalam kinerja lahan basah (Skousen, 1998).

Bahan organik mempunyai karakteristik yang sangat beragam, sehingga kemampuan remediasi AAT juga sangat beragam. Di antara karakteristik yang diduga mempengaruhi kemampuan remediasi adalah rasio karbon dan nitrogen (C/N), ketersediaan asam-asam organik berberat molekul rendah, jumlah tapak jerapan (*adsorption sites*), dan kandungan C-organik. Ketersediaan asam-asam organik berberat molekul rendah bermanfaat bagi pereduksi sulfat. Semakin muda bahan, semakin tinggi kandungan senyawa asam-asam tersebut. Daya Hantar Listrik (DHL) yang tinggi berkorelasi dengan besarnya tapak jerapan bahan organik tersebut. Keasaman (pH) berkorelasi dengan kelarutan logam berat dan ketersediaan unsur hara bagi tanaman lahan basah buatan. Potensial redoks (Eh) berkorelasi dengan proses reduksi-oksidasi suatu sistem dan keberadaan senyawa kimiawi seperti oksida Fe atau nitrat yang berada di dalam keadaan reduksi atau oksidasi (Vepraska, 2002). Reduksi merupakan penambahan elektron, sedangkan oksidasi adalah kehilangan elektron dari suatu senyawa kimia, atau unsur akibat proses reduksi-oksidasi yang terjadi. Potensial redoks digunakan untuk mengestimasi status senyawa kimiawi dan sifat-sifat kimiawi suatu sistem (misalnya kolam penampung air asam tambang). Contoh yang sederhana kejadian yang melibatkan potensial redoks adalah oksidasi C menjadi CO_2 dan reduksi C menjadi CH_4 dengan bantuan Hidrogen. Contoh lain, oksidasi Fe^{3+} menjadi Fe^{2+} dan reduksi NO_3 menjadi N_2 . Beberapa contoh tersebut mengindikasikan bahwa perubahan unsur kimiawi menyebabkan terbentuknya unsur baru yang mungkin berbahaya atau tidak bermanfaat bagi kehidupan kita. Karbon (C) adalah unsur yang dibutuhkan membentuk bahan organik, hilang melalui CO_2 ke udara, atau menjadi CH_4 yang sangat berbahaya terhadap lingkungan atmosfer (pemanasan global). Nitrat merupakan unsur hara yang berguna bagi tanaman dan organisme lain, hilang melalui gas N_2 ke atmosfer. Banyak lagi contoh yang lain tetapi tidak dapat diterangkan disini.

Hubungan antara Eh dan reaksi kimia

Potensial elektroda tinggi adalah ion atau unsur yang siap menerima elektron seperti contoh yang ada di dalam Tabel 1. Agen oksidasi mempunyai potensial elektroda yang tinggi, tetapi tidak semua zat yang mempunyai potensial elektroda tinggi adalah agen oksidasi. Agen oksidasi yang kuat mampu menerima elektron dengan cepat. Logam-logam alkali merupakan donor elektron yang kuat, agen pereduksi yang kuat.

Tabel 1. Potensial elektroda (potensial reduksi) reaksi paruh pada 25°C

	Eh ^o (x1000 mV)
$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^{-} = \text{Fe}^{2+}$	0.77
$\text{SO}_4^{-} + 10 \text{H}^{+} + 8 \text{e}^{-} = \text{H}_2\text{S} + 4\text{H}_2\text{O}$	0.31
$\text{Fe}^{2+} + 2 \text{e}^{-} = \text{Fe}$	-0.44
$\text{Zn}^{2+} + 2 \text{e}^{-} = \text{Zn}$	-0.76
$\text{Al}^{3+} + 3 \text{e}^{-} = \text{Al}$	-1.66
$\text{Mg}^{2+} + 2 \text{e}^{-} = \text{Mg}$	-2.37
$\text{Na}^{+} + \text{e}^{-} = \text{Na}$	-2.71
$\text{Ca}^{2+} + 2 \text{e}^{-} = \text{Ca}$	-2.87
$\text{K}^{+} + \text{e}^{-} = \text{K}$	-2.92

Sumber: Bon et al. 1979.

Remediasi Air Asam Tambang dengan Metode Pasif

Metode pasif utama diklasifikasikan menurut Skousen (1998) ke dalam lahan basah buatan (*aerobic wetlands* dan *anaerobic wetlands*), *anoxic limestone drains* (ALD), *successive alkalinity producing systems* (SAPS), *limestone ponds*, dan *open limestone channels* (OLC). Metode lahan buatan dan SAPS yang sekarang banyak dilakukan karena biaya murah dan pemeliharaannya lebih mudah. Ke dua metode ini melibatkan bahan organik sebagai komponennya. Lahan basah buatan adalah suatu ekosistem buatan manusia yang meniru lahan basah di alam. Lahan buatan terdiri atas kolam dangkal yang

diisi dengan krakal/krikil, tanah, dan bahan organik untuk mendukung tanaman lahan basah. Perlakuan yang dibuat bergantung pada interaksi dinamika biogeokimiawi perjalanan air yang tercemar melalui lahan basah buatan. ALD adalah sistem abiotik yang mengandung sel batukapur terbenam yang menghasilkan bikarbonat akibat dilalui aliran air tambang. SAPS adalah gabungan dari lahan basah buatan dan ALD. Air beroksigen diperlakukan lebih dulu dengan bahan organik untuk memindahkan oksigen dan besi (III), dan kemudian aliran air anoxic melalui ALD pada bagian bawah sistem tersebut.

Mekanisme retensi logam di dalam lahan basah berurutan meliputi: 1) pembentukan dan pengendapan logam-hidroksida, 2) pembentukan logam-sulfida, 3) reaksi kompleks organik, 4) pertukaran dengan kation lain pada tapak jerapan, dan 5) diambil langsung oleh tanaman hidup. Mekanisme yang lain meliputi netralisasi dengan karbonat, pengikatan dengan bahan substrat, jerapan dan pertukaran kation pada matras algae, dan reduksi besi hidroksida dan sulfat.

Suatu cara lahan basah dibuat mempengaruhi bagaimana suatu perlakuan air terjadi. Dua gaya konstruksi yang dominan sekarang: 1) "aerobic" wetlands terdiri atas *Typha* (*Cattails*) dan vegetasi lahan basah yang lain yang ditanam pada lahan dangkal (<30 cm), sedimen tidak permeabel terdiri atas tanah, liat, atau bahan tambang, dan 2) "anaerobic" wetlands mengandung *Typha* dan vegetasi lahan basah lainnya yang ditanam pada kedalaman tanah >30 cm, sedimen permeabel terdiri atas tanah, gambut moss, kompos mushroom, serbuk gergaji, jerami/pupuk kandang, atau campuran bahan organik lainnya, yang di bawah lahan basah atau dicampur dengan batukapur (Skousen, 1998).

Kajian yang pernah dilaksanakan

Pada tahun 2004 dilakukan inkubasi beberapa jenis bahan organik, yaitu pupuk kandang ayam, kulit kayu dan lumpur kayu dari industri bahan kertas (*pulp*), dan gambut saprik di dalam AAT yang memiliki pH 3,7. Penulis menemukan bahwa bahan-bahan organik tersebut mempunyai pengaruh yang berbeda-beda terhadap AAT. Secara umum data menunjukkan bahwa pemberian bahan-bahan tersebut dapat meningkatkan pH AAT dan menurunkan kadar logam-logam larutnya (Munawar, 2004). Hal ini diduga akibat sifat-sifat bahan yang berbeda-beda, sehingga memiliki mekanisme reaksi yang berbeda

dan menghasilkan reaktan yang berbeda-beda selama inkubasi. Namun, penulis belum mengetahui mekanisme/reaksi apa yang bertanggung jawab terhadap perbedaan tersebut. Data juga menunjukkan bahwa pada awal inkubasi perbedaan sangat signifikan antar jenis bahan organik, tetapi setelah kira-kira 3 minggu, perbedaan tersebut berkurang. Hal ini menunjukkan bahwa waktu juga mempengaruhi mekanisme reaksi dan hasilnya. Yang menarik adalah bahwa inokulasi BPS tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap perubahan AAT. Diduga bahwa dalam bahan organik yang digunakan sudah mengandung cukup BPS.

BAB III

TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

Tujuan penelitian ini untuk (1) karakterisasi sifat-sifat jenis limbah organik yang digunakan untuk remediasi air asam tambang, (2) identifikasi mekanisme/reaksi-reaksi yang bertanggung jawab terhadap kemampuan remediasi dari limbah organik, dan (3) memilih jenis limbah organik yang memiliki kemampuan remedial terbaik untuk digunakan dalam teknik pengendalian air asam tambang.

Manfaat penelitian ini untuk (1) mengatasi masalah limbah air asam tambang sebelum dibuang ke badan air (seperti sungai, danau, atau laut), (2) membantu mengurangi pencemaran lingkungan daratan dan perairan, (3) membantu kesehatan lingkungan perairan (sungai dan danau), dan (4) memperkaya khasanah ilmu pengetahuan.

BAB IV METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan mulai bulan Maret 2007 sampai dengan Nopember 2007 di Laboratorium Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Bengkulu.

Bahan penelitian menggunakan bahan yang tersedia di sekitar lokasi PT Tambang Batubara Bukit Asam (PTBA), Tanjung Enim, Sumatera Selatan. Limbah organik berasal dari kulit-kayu (*bark*) dan lumpur kayu (*sludge*) dari industri bahan kertas (*pulp*) PT Tanjung Enim Lestari, Tanjung Enim. Janjang buah sawit dan lumpur sawit (yang asli maupun yang telah dikomposkan) diambil dari pabrik *crumb palm oil* (CPO) PT Perkebunan Bio Nusantara, Bengkulu Utara. Abu batubara (*fly ash*) dari Perusahaan Listrik Tenaga Uap (PLTU) milik PTBA, Tanjung Enim, serbuk gergaji dan pupuk kandang ayam potong diambil dari penggergajian kayu dan peternakan ayam potong di Bengkulu. Bahan-bahan tersebut diayak dengan ayakan bermata saring 5 mm. Semua limbah organik dianalisis kadar karbon-organik (C), bahan organik (BO), nitrogen total (N), fosfor total (P), kalium total (K), kalsium (Ca), magnesium (Mg), natrium (Na), mangan (Mn), besi (Fe), seng (Zn), kapasitas tukar kation (KTK), daya hantar listrik (DHL), dan pH.

Limbah organik dibersihkan, dikeringkan, dicincang halus, dan diayak dengan ayakan bermata saring 5 mm. Kulit kayu, kompos, dan lumpur kayu dibersihkan dari kotoran, kemudian dikering-anginkan, dicincang dengan menggunakan alat pisau tajam sampai dengan panjang 2-5 cm, kemudian disaring dengan ayakan dan hasilnya ditampung. Janjang buah sawit, kompos, dan lumpur sawit dibersihkan dari kotoran, dikeringkan dan dicincang sampai halus (janjang buah sawit), kemudian disaring dengan ayakan dan hasilnya ditampung. Abu batubara, serbuk gergaji, dan pupuk kandang dibersihkan dari kotoran, dikeringkan, dan diayak dan hasilnya ditampung.

Air asam tambang yang digunakan berasal dari *mainsump* Banko Barat Pit 1 PT BA, Tanjung Enim. Contoh air asam tambang yang belum diberi bahan kapur diambil dengan cara sebagai berikut: air asam tambang dari kolam *mainsump* dipompa ke atas, kemudian air ditampung langsung dengan menggunakan selang di dalam jiregen yang bersih berkapasitas 35 L, kemudian ditutup rapat dan dibawa ke laboratorium. Contoh air asam tambang yang diambil ada 2 jenis, pertama contoh air untuk analisis sifat kimia

sebelum diperlakukan, dan ke dua contoh air untuk perlakuan remediasi dengan bahan organik. Air asam tambang dianalisis pH, daya hantar listrik (DHL), kalsium (Ca), magnesium (Mg), besi (Fe), mangan (Mn), aluminium (Al), sulfat (SO_4^{2-})-larut, dan alkalinitas.

Tahapan penelitian

Penelitian dibagi ke dalam dua tahap: a) karakteristisasi sifat limbah organik, dan b) uji mekanisme/reaksi dan kemampuan remediasi limbah organik.

a) Karakterisasi sifat-sifat limbah organik yang dilakukan sebagai berikut:

- (1) kulit kayu (KK),
- (2) kompos kulit kayu (KmKK),
- (3) kompos lumpur kayu (KmLK),
- (4) janjang kelapa sawit (JS)
- (5) kompos janjang kelapa sawit (KmJS),
- (6) kompos lumpur janjang kelapa sawit (KmJLS),
- (7) abu batubara (AB),
- (8) serbuk gergaji (SG),
- (9) pupuk kandang ayam potong (PK).

Semua limbah organik ditimbang sebanyak 250 g, kemudian dimasukkan ke dalam toples plastik berukuran 2 L dan ditambahkan air suling (H_2O) sebanyak 1250 ml. Masing-masing bahan diulang sebanyak empat (4) kali, sehingga jumlah total satuan percobaan menjadi 36. Bahan dicampur dengan baik, ditutup rapat dan dibiarkan pada suhu kamar. Setelah 1 hari, 7 hari, 14 hari, dan 30 hari, dilakukan pengukuran pH, potensial redoks (Eh), dan daya hantar listrik (DHL). Metode pengukuran pH, Eh, dan DHL dengan menggunakan pH meter digital, Eh meter digital, dan Ec-meter digital yang dikalibrasi lebih dahulu. Elektroda gelas pH meter digital dikalibrasi dengan larutan penyanggah pH 4 dan pH 7, elektroda Platinum (Pt) dipasang pada Eh meter digital dan dikalibrasi dengan menggunakan Hidrokuin G.R di dalam larutan penyanggah pH 4 (Eh

referensi = 222 mV), dan elektroda Ec-meter digital dikalibrasi dengan larutan KCl 0,01 M (DHL larutan KCl 0,01 M = 1413 $\mu\text{S/cm}$).

Kalibrasi alat ukur pH meter, Eh meter, dan Ec meter dapat diterangkan secara ringkas sebagai berikut:

pH meter: Sebelum dipakai pH meter harus dikalibrasi dengan menggunakan larutan penyanggah pH 4, 7, dan 10 (option). pH meter perlu diperiksa lebih dahulu apakah keadaannya baik, dan baterai dalam keadaan baru, kalau baterai telah usang/sudah pernah dipakai sebaiknya diganti baterai yang baru dengan voltage 9 V tipe baterai alkalin karena dapat tahan lebih lama daripada baterai yang biasa. Elektroda gelas juga diperiksa apakah keadaannya baik, kalau telah rusak biasanya tampak kurang peka atau kurang respon terhadap pengukuran pH. Kalau kurang respon sebaiknya elektroda gelas diganti dengan yang baru. Setelah diperiksa pH meter, baterai, elektroda gelas dalam keadaan baik, maka dilakukan kalibrasi pH meter dengan menggunakan larutan penyanggah pH 4 dan 7. Larutan penyanggah pH 4 dan 7 biasanya telah tersedia dalam kemasan tertentu sehingga mudah untuk membuat larutan penyanggah pH 4 dan 7. Bubuk larutan penyanggah pH sebaiknya yang masih baru atau belum kadaluarsa, biasanya ditunjukkan dengan warna bubuk yang putih (bukan kuning atau berjamur). Dengan mengikuti petunjuk yang terdapat pada kemasan bubuk dapat dibuat larutan penyanggah pH 4 dan 7. Sebaiknya juga digunakan air suling yang baru (pH sekitar 6) untuk melarutkan bubuk larutan penyanggah pH 4 dan 7. Kalibrasi pH meter dapat dilakukan dengan mengikuti petunjuk yang terdapat di dalam buku Manual pH meter.

Eh meter: Sebelum dipakai Eh meter perlu diperiksa lebih dahulu apakah dalam keadaan baik termasuk baterai atau sumber listrik. Elektroda Pt yang dipakai perlu juga diperiksa apakah sesuai dengan Eh meter yang dipakai (sebaiknya dibaca petunjuk Manual Eh meter). Setelah Eh meter, baterai atau sumber listrik, dan elektroda Pt dalam keadaan baik, maka dilakukan kalibrasi Eh meter. Kalibrasi Eh meter dilakukan dengan menggunakan bahan kimia Hidrokuin G.R (*Grade Reagent*) berwarna hitam berbentuk butir halus. Hidrokuin dimasukkan ke dalam larutan penyanggah pH 4 sampai dengan larutan jenuh Hidrokuin (yang ditunjukkan dengan butir Hidrokuin terapung di atas larutan), biasanya hanya beberapa miligram saja yang dipakai. Larutan kalibrasi Eh meter

ini hanya dipakai sekali saja, kemudian dibuang, dan hanya tahan dalam beberapa jam saja. Formula yang dipakai untuk menghitung potensial redoks (Eh contoh) sebagai berikut: $Eh \text{ contoh} = Eh \text{ referen} + Eh \text{ baca}$. Contoh: $Eh \text{ air asam tambang} = 222 \text{ mV} + X \text{ mV}$ (X dapat bernilai negatif atau positif yang diperoleh dari pembacaan contoh air asam tambang dengan Eh meter). $Eh \text{ referen} = 222 \text{ mV}$ diperoleh dari pembacaan larutan penyanggah pH 4 yang diberi Hidrokuin dengan alat ukur Eh meter (kalau memakai bahan yang lain Eh referennya beda).

Ec meter: Sama dengan alat ukur pH meter, diperiksa dahulu Ec meter apakah dalam keadaan baik, sumber listrik dalam keadaan stabil atau belum, kalau dipakai baterai diperiksa apakah baterai masih baru atau sudah usang. Sebaiknya dipakai baterai yang masih baru, diperiksa voltage dan digunakan baterai Alkalin agar tahan lama. Kalibrasi Ec meter dengan menggunakan larutan KCl 0,01 M yang masih segar atau baru. Caranya: disiapkan larutan KCl 0,01 M dalam beaker gelas kecil sebanyak 10 mL untuk diukur dengan Ec meter. DHL yang terbaca pada Ec meter menunjukkan angka 1413 $\mu\text{S/cm}$ (setiap kali pengukuran contoh pada waktu berlainan supaya dikalibrasi Ec meter dengan larutan KCl standar). Setelah dikalibrasi Ec meter telah siap untuk dipakai.

b) Uji Mekanisme/Reaksi dan Kemampuan Remediasi Bahan Organik

Untuk uji mekanisme dan kemampuan remediasi, dilakukan prosedur yang sama pada percobaan (a), kecuali bahwa dalam percobaan ini inkubasi dilakukan dengan menggunakan air asam tambang (AAT). Di samping pH, DHL, dan Eh, pada saat pengamatan contoh AAT dan suspensi AAT diambil untuk analisis di laboratorium, yang meliputi kadar Fe-larut; sulfat (SO_4^{2-})-larut dalam suspensi AAT. Metode pengukuran kadar Fe-larut dan sulfat-larut dengan *Atomic Absorption Spectrophotometer* dan *UV-Vis Spectrophotometer* di Laboratorium Kimia Tanah Balai Penelitian Tanah (BALITTANAH) Bogor. Analisis substrat organik dan air asam tambang sebelum percobaan dilakukan di Laboratorium Jurusan Tanah Fakultas Pertanian UGM di Yogyakarta.

Data dari pengamatan dan analisis di laboratorium yang diperoleh dikumpulkan dan dianalisis dengan regresi linier. Untuk mempermudah interpretasi data yang didapat maka dibuat gambar grafik dan histogram batang.

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

a) Karakterisasi sifat-sifat limbah organik

Karakterisasi sifat-sifat limbah organik sebagai bahan remediasi air asam tambang telah dilakukan di Laboratorium Jurusan Tanah Fakultas Pertanian UGM di Yogyakarta. Hasil analisis laboratorium (Tabel 2) menunjukkan bahwa semua limbah (organik) mempunyai pH mendekati netral, kecuali serbuk gergaji dan kulit kayu masing-masing mempunyai pH 4.9 dan 5.5. Daya Hantar Listrik (DHL) menunjukkan keberadaan total garam terlarut di dalam bahan organik ($\text{total garam terlarut, mg/L} = 640 \times \text{DHL mS/m}$), semakin tinggi nilai DHL semakin besar total garam terlarut bahan organik. Hasil analisis laboratorium menunjukkan bahwa semua limbah (organik) mengandung nilai DHL yang tinggi (dalam satuan mili-Siemen, disingkat mS, satu mS = 1000 μS) kecuali serbuk gergaji (SG) yang mengandung nilai DHL yang sedang ($<750\mu\text{S}$), artinya semua limbah (organik), kecuali SG mempunyai mempunyai total garam terlarut yang tinggi. Foth (1984) mengatakan bahwa kadar DHL rendah berkisar 100 sampai dengan 250 μS ; DHL sedang 250 sampai 750 μS ; DHL tinggi 750 sampai dengan 2250 μS ; dan DHL sangat tinggi $>2250 \mu\text{S}$.

Karbon (C)-organik atau bahan organik semua limbah organik tergolong tinggi, kecuali abu batubara (AB) yang rendah (3.41% BO). Kisaran bahan organik antara 3.41 sampai dengan 96.25%, artinya jumlahnya sangat beragam. Nisbah C/N limbah (organik) adalah tinggi karena kadar Nitrogen (N) yang relatif rendah ($<5\%$).

Kapasitas Pertukaran Kation (KPK) limbah (organik) aktual termasuk rendah sampai dengan sedang, KPK potensial adalah tinggi karena kadar bahan organik limbah yang tinggi. KPK abu batubara dan janjang sawit termasuk rendah masing-masing 5.68 dan 13.8 me/100 g.

Unsur makro (P, K, Ca, Mg, K, dan Na) limbah (organik) secara umum sangat rendah, kecuali janjang kelapa sawit (kadar K tinggi), dan pupuk kandang (kadar P tinggi). Unsur mikro (Fe, Mn, dan Zn) limbah (organik) digolongkan ke dalam kategori yang rendah sampai dengan tinggi.

Kelompok kulit kayu, kelompok janjang sawit, dan kelompok abu batu bara (termasuk serbuk gergaji dan pupuk kandang) mempunyai karakteristik atau sifat kimia bahan organik yang berbeda. Perbedaan yang dominan terdapat pada bahan organik, KPK, dan kadar unsur hara makro dan mikro. Ke tiga sifat kimiawi bahan tersebut sangat penting di dalam proses remediasi air asam tambang, karena ke tiga sifat kimiawi tersebut sangat memegang peranan penting di dalam netralisasi asam, jerapan logam berat, memacu proses mikrobiologis, reduksi-oksidasi, ketersediaan substrat (unsur hara) bagi pertumbuhan tanaman air di kolam lahan basah (alami dan buatan). Hal ini sebenarnya sangat relevan dengan kegunaan lahan basah buatan yang mempunyai vegetasi tanaman tingkat tinggi. Tanaman tingkat tinggi di lahan basah buatan sangat bermanfaat untuk penyediaan substrat, akumulasi logam berat, jerapan/presipitasi logam berat, memacu proses mikrobiologi tanah. Kemampuan tumbuhan ini dalam mengakumulasi logam berat sangat bervariasi bergantung pada jenis dan sifat bahan organiknya. Contoh, tumbuhan *Sphagnum* sp (lumut), algae sangat baik mengakumulasi Fe, sedangkan tumbuhan *Typha* (*Cattails*) hanya mampu mengakumulasi Fe <1% (Skousen, 1998).

Zipper (2001) mengatakan bahwa sifat fisik bahan organik juga sangat berpengaruh terhadap kualitas air asam tambang yang akan dibuang ke sungai atau badan air. Sifat fisik tersebut antara lain adalah kekasaran bahan atau tekstur bahan organik, karena selain mempunyai ketahanan terhadap pelapukan (fisik, kimia, biologis) juga bersifat porus sehingga air lebih mudah masuk ke dalam bahan organik dan mengalir ke outlet yang ada di dalam kolam lahan basah. Sifat porus atau permeabel ini sangat membantu aliran air dari inlet air asam tambang ke outlet di dalam kolam lahan basah sehingga jarang sekali terjadi penyumbatan aliran air.

Tabel 1 . Hasil analisis laboratorium sifat-sifat limbah organik

No.	Kode	KL. % Ø 0,5 mm	pH H ₂ O	DHL mS	C org. %	BO %	N total %	P total %	KPK me/100 g	K total %	Ca %	Na total %	Mg %	Fe %	Mn total ppm	Zn ppm
1	KK	20,20	5,5	3,65	43,58	75,14	0,22	0,23	29,79	0,24	0,58	0,17	0,16	0,35	117,07	6,88
2	KMKK	30,49	7,3	8,82	31,35	54,04	1,28	0,49	35,25	0,39	5,60	0,78	0,43	0,01	96,48	248,69
3	KMLK	7,89	7,7	9,50	12,45	21,46	0,36	0,49	27,86	0,70	4,28	0,59	0,36	2,09	612,49	116,69
4	JS	17,74	6,7	27,00	54,29	93,61	0,04	0,37	13,80	1,19	0,15	0,65	0,64	0,07	53,27	77,43
5	KMJS	15,22	6,6	13,30	54,21	93,46	0,62	0,40	22,21	0,76	0,36	0,16	0,40	0,16	94,41	55,65
6	KMLS	15,47	6,0	10,00	48,00	82,75	3,20	0,71	24,40	0,74	0,74	0,14	0,53	0,46	166,95	117,83
7	AB	0,56	7,8	1,65	1,98	3,41	1,36	0,37	5,68	0,12	0,16	0,38	0,39	0,97	194,36	18,70
8	SG	19,79	4,9	0,70	55,83	96,25	0,69	0,27	31,59	0,06	0,18	0,14	0,08	0,18	4,79	42,05
9	PK	12,72	7,8	16,45	20,02	34,52	0,95	2,16	18,59	1,02	0,72	0,53	0,74	1,36	417,22	283,36

Keterangan:

JS= janjang kelapa sawit; SG= serbuk gergaji; KMJS= kompos janjang kelapa sawit; AB= abu batubara; KK= kulit kayu; PK= pupuk kandang; KMKK= kompos kulit kayu; KMLK= kompos lumpur kayu; KMLS= kompos lumpur janjang kelapa sawit

Sumber:

Laboratorium Jurusan Tanah Fakultas Pertanian UGM pada tanggal 24 September 2007

Karakterisasi sifat air yang berasal dari PIT 1 BANKO tambang batubara PTBA Tanjung Enim telah dilakukan di Laboratorium Jurusan Tanah Fakultas Pertanian UGM di Yogyakarta. Dua jenis sampel air asam tambang yang dianalisis. Pertama, sampel air asam tambang yang tidak diberi asam nitrat (HNO_3), dan yang diberi HNO_3 . Maksud pemberian HNO_3 (2 mL setiap Liter air asam tambang) untuk menjaga tidak terjadi reaksi selama perjalanan sampel air asam tambang dari Bengkulu ke Yogyakarta.

Hasil analisis laboratorium menunjukkan bahwa sampel air asam tambang yang pertama mempunyai pH 2.5 (sangat asam), DHL 1394 $\mu\text{S}/\text{cm}$, kalsium (Ca) dan magnesium (Mg) masing-masing 33.73 dan 83.31 ppm, alkalinitas (sebagai CaCO_3) 84.21 ppm, sulfat (SO_4) 407.28 ppm (sangat tinggi), Aluminium (Al) 7.36 ppm, besi (III) 4.45 ppm, besi (II) 0.06 ppm, dan Mn 4.42 ppm (Tabel 3).

Keasaman air (pH) sangat rendah mengindikasikan bahwa air mengandung mineral pirit dan/mineral sulfat lainnya. Mineral pirit dijumpai di mainsumps Banko Pit I PTBA ketika penulis survei ke lokasi tambang. Mineral pirit terdapat pada batuan beku yang berwarna kekuningan. Jumlahnya banyak terdapat pada batuan beku tersebut. Mineral pirit mengalami oksidasi dengan oksigen dan air menghasilkan asam dalam bentuk asam sulfat, tetapi kalau dalam keadaan reduksi tidak terjadi asam sulfat. Netralisasi asam yang dihasilkan dengan bahan kapur sangat tidak ekonomis karena mahal dan memerlukan pemeliharaan yang intensif dan keberhasilannya sangat kecil. Oleh karena itu, metode pengendalian air asam tambang sekarang menggunakan metode pasif, yaitu lahan basah buatan. Metode pasif ini meniru konsep lahan basah alami (*natural wetlands*) dengan menambahkan media bahan organik ke dalam lahan.

Kadar sulfat air asam tambang sangat tinggi menunjukkan bahwa oksidasi pirit telah terjadi dengan dihasilkannya sulfat yang sangat tinggi. Sedangkan kadar besi (III) 4.45 ppm dan besi (II) 0.06 menunjukkan bahwa air asam tambang telah terjadi oksidasi pirit menghasilkan asam sulfat. Hal ini dapat dibuktikan dengan memberikan asam nitrat (HNO_3) ke dalam contoh air asam tambang 2 mL setiap 1 L air asam tambang untuk mencegahnya oksidasi. Tabel 4 menunjukkan bahwa kadar besi (III) 7.48 ppm lebih tinggi daripada kadar besi (III) air asam tambang yang tidak diberi HNO_3 . Artinya dalam keadaan sangat asam, air asam tambang dapat terjaga dari oksidasi. Tabel 5 menunjukkan pula bahwa oksidasi dalam air asam tambang terjadi dengan diketahuinya potensial redoks (E_h s = potensial redoks contoh air) mempunyai nilai positif tinggi (rerata 769 mV).

Tabel 3 . Hasil analisis laboratorium air asam tambang (Sampel AAT tanpa diberi HNO₃)

No.	Parameter	Ulangan			Rerata	Metode
		1	2	3		
1.	pH	2.5	2.5	2.5	2.50	
2.	DHL ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1394	1394	1394	1394.00	
3.	Ca (ppm)	33.612	34.634	32.93	33.73	AAS
4.	Ferri (ppm)	4.582	4.402	4.351	4.45	“
5.	Ferro (ppm)	0.056	0.061	0.054	0.06	UV-Vis. Spect.
6.	Mg (ppm)	82.623	83.852	83.443	83.31	AAS
7.	Mn (ppm)	4.447	4.323	4.501	4.42	“
8.	Al (ppm)	7.56	7.198	7.319	7.36	“
9.	Alkalinitas (CaCO ₃)	84	86.48	82.227	84.21	'
10.	SO ₄ (ppm)	410.211	401.408	410.211	407.28	UV-Vis. Spect.

Tabel 4 . Hasil analisis laboratorium air asam tambang (Sampel diberi HNO₃)

No.	Parameter	Ulangan			Rerata	Metode
		1	2	3		
11.	Fe ³⁺	7.709	7.367	7.367	7.48	AAS
12.	Fe ²⁺	<i>ttd</i>	<i>ttd</i>	<i>ttd</i>	<i>ttd</i>	UV-Vis. Spect.
13.	Mn	3.484	3.574	3.552	3.54	AAS

Sumber: Laboratorium Jurusan Tanah Fakultas Pertanian UGM pada 24 September 2007

*) *ttd* = tidak terdeteksi/di bawah limit deteksi alat (<0,1 ppm)

Tabel 5. Hasil pengamatan AAT di Laboratorium Tanah UNIB pada 2 September 2007

Ulangan	pH	Eh*)	Eh ref.	Eh s	DHL
		(mV)			($\mu\text{S}/\text{cm}$)
1	2.96	553	222	775	1586
2	2.63	542	222	764	1578
3	2.66	541	222	763	1589
4	2.68	550	222	772	1581
Rerata	2.73	547	222	769	1584

Keterangan: *) Eh baca, Eh ref. = Eh reference (menggunakan hidrokuin G.R), Eh s = Eh sampel AAT

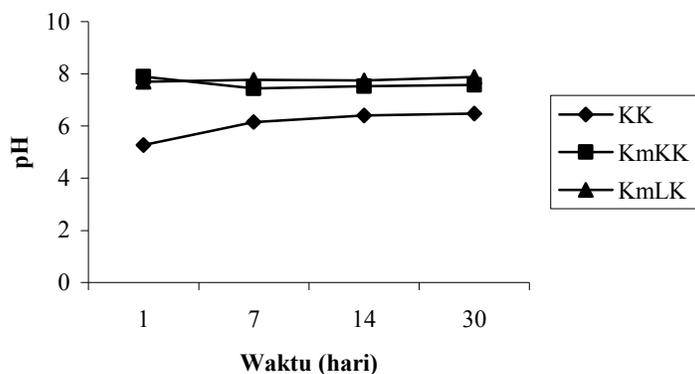
b) Uji Mekanisme/Reaksi dan Kemampuan Remediasi Bahan Organik

Pembahasan ini difokuskan kepada sifat air suling atau air asam tambang yang diukur seperti pH, Eh, DHL, kadar Fe-larut dan SO₄-larut didasarkan kurun waktu pengamatan hari pertama, ke 7, 14, dan 30. Catatan: data kadar Fe-larut dan SO₄-larut pada pengamatan IV hari ke 30 belum selesai dikerjakan karena kesalahan teknis ketika pengiriman contoh air asam tambang ke Bogor (Contoh air telah dikirim tanggal 2 Oktober 2007 dari Bengkulu ke Bogor, tetapi sampai sekarang contoh air tersebut masih di Kantor Pos Besar Bogor, belum dikirim ke Laboratorium Kimia Tanah BALITTANAH Jalan Ir. H. Juanda No. 98 Bogor bertepatan dengan hari libur besar). Oleh karena itu, data Fe-larut dan SO₄-larut yang ada pada hari pertama, ke 7, dan 14 akan dibahas disini.

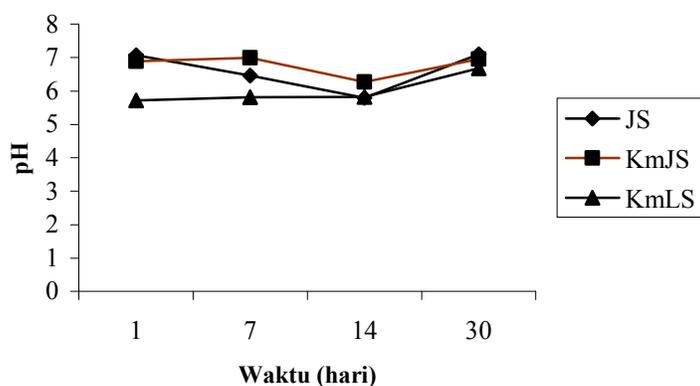
Keasaman (pH)

Hubungan antara pH dan waktu inkubasi bahan organik dalam air suling dapat dilihat pada Gambar 1 sampai dengan 3. Gambar 1 menunjukkan bahwa pH suspensi (air dan bahan organik) mula-mula rendah untuk perlakuan kulit kayu (KK), tetapi dengan waktu inkubasi berjalan pH meningkat sampai dengan mendekati netral (=7). Kompos kulit kayu (KmKK) dan kompos lumpur kayu (KmLK) mempunyai pH suspensi yang relatif stabil dan netral. Ke tiga bahan organik ini rata-rata mempunyai pH yang netral sampai sedikit alkalin.

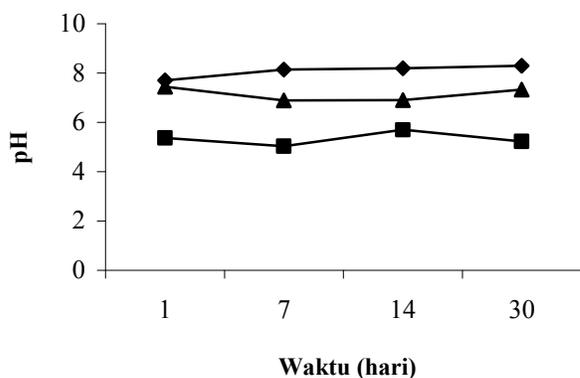
Gambar 2 menunjukkan bahwa pH suspensi relatif stabil rata-rata mendekati netral untuk janjang sawit (JS), kompos janjang sawit (KmJS), dan kompos lumpur sawit (KmLS). Berbedal halnya dengan pH suspensi air dan serbuk gergaji (SG) yang sedikit asam, sedangkan pH suspensi untuk abu batubara (AB) dan pupuk kandang (PK) netral sampai alkalin (>7). pH suspensi SG yang sedang karena serbuk gergaji bersifat asam (senyawa asam organik yang dominan). Kesimpulannya bahwa limbah organik ini bersifat sedikit netral sampai dengan sedikit alkalin (pH antara 5.5 sampai dengan 8).



Gambar 1. Hubungan antara pH dan waktu inkubasi kulit kayu (KK), kompos kulit kayu (KmKK), kompos lumpur kayu (KmLK) dalam air suling

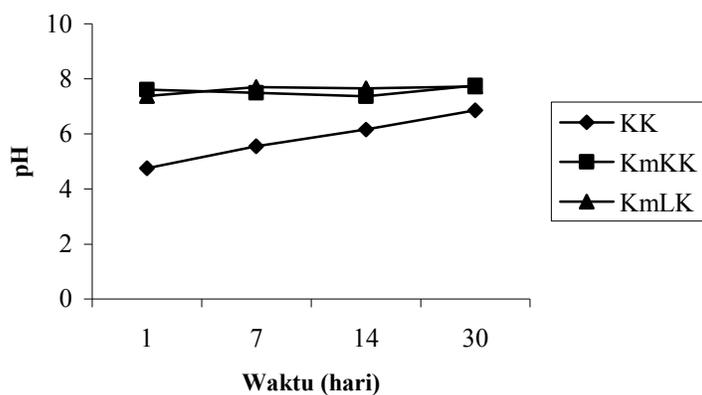


Gambar 2. Hubungan antara pH dan waktu inkubasi janjang sawit (JS), kompos janjang sawit (KmJS), kompos lumpur sawit (KmLS) dalam air suling

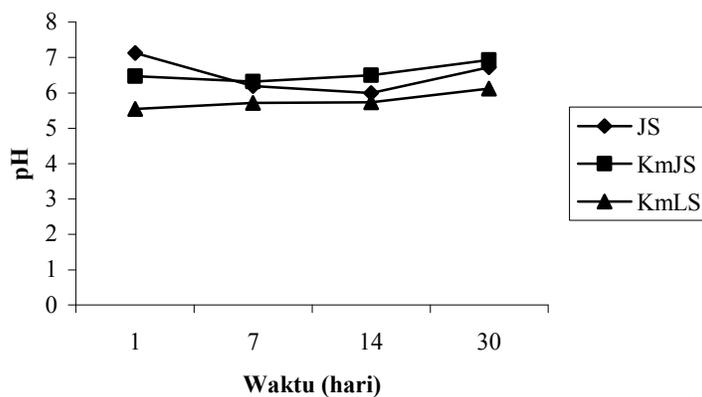


Gambar 3. Hubungan antara pH dan waktu inkubasi abubatubara (AB), serbuk gergaji (SG), pupuk kandang (PK) dalam air suling

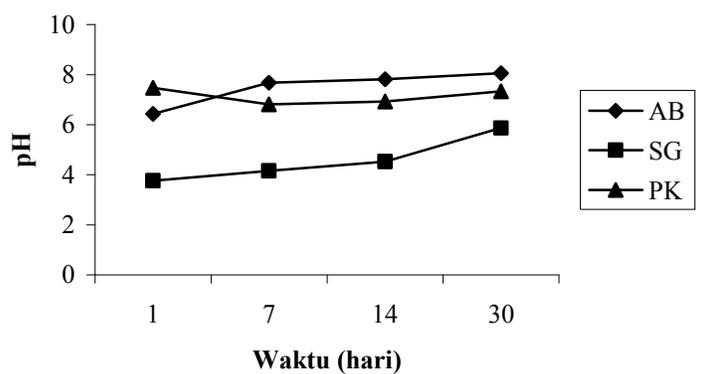
Bagaimanakah pH dari limbah organik ini diinkubasi di dalam air asam tambang yang akan diremediasi? Apakah pH air asam tambang (pH semula 2.5) dapat ditingkatkan dengan adanya limbah organik tersebut? Hasil penelitian menunjukkan pada Gambar 4 sampai dengan 6 bahwa semua limbah organik memberikan pH air asam tambang secara keseluruhan meningkat dari pH 2.5 (awal) menjadi >6 . Kenapakah hal ini dapat terjadi? Karena bahan organik mampu menetralkan air asam tambang dengan tersedianya basa-basa (Na, K, Ca, Mg) dan bahan organik yang relatif tinggi jumlahnya sehingga ion H sebagai sumber keasaman air asam tambang diikat oleh basa-basa dan bahan organik. Alasan lain adalah bahan organik bereaksi dengan sulfat dari air asam membentuk bikarbonat (basa) sehingga pH air dapat menjadi netral. Hal yang menarik perhatian adalah KK dan SG karena terjadi peningkatan pH air dari pH sekitar 4 menjadi pH >6 (lihat Gambar 4 dan 6), sedangkan limbah organik yang lain tidak menunjukkan hal yang serupa. Mengapa hal ini terjadi? Karena proses netralisasi air asam tambang berjalan dengan berangsur-angsur meningkat. Karakteristik KK dan SG (Tabel 1) menunjukkan bahwa kadar bahan organik dan kapasitas tukar kation relatif tinggi. Hal ini memberikan kemampuan ke dua limbah organik tersebut untuk melakukan netralisasi air asam tambang. Netralisasi dapat berjalan dengan berbagai macam cara, antara lain jerapan ion H pada tapak jerapan bahan organik, atau netralisasi asam dengan basa (Na, K, Ca, Mg), atau terjadi kilasi antara logam Fe, Mn, Al dengan bahan organik. Kesimpulannya bahwa semua limbah organik mampu menetralkan air asam tambang.



Gambar 4. Hubungan antara pH dan waktu inkubasi kulit kayu (KK), kompos kulit kayu (KmKK), kompos lumpur kayu (KmLK) dalam air asam tambang (AAT)

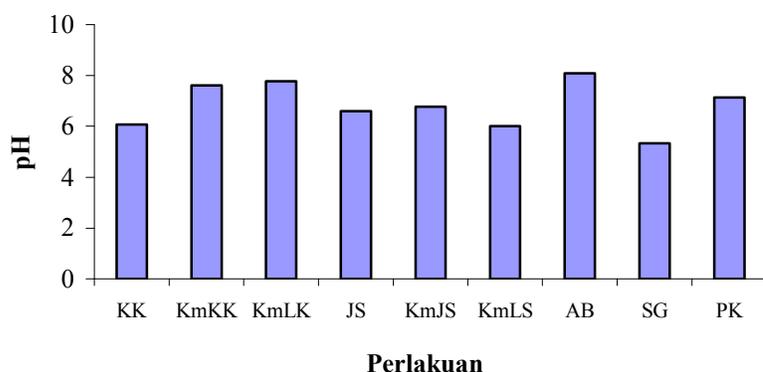


Gambar 5. Hubungan antara pH dan waktu inkubasi janjang sawit (JS), kompos janjang sawit (KmJS), kompos lumpur sawit (KmLS) dalam AAT

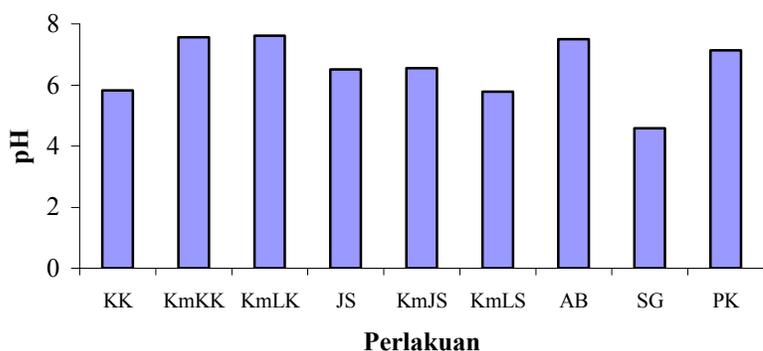


Gambar 6. Hubungan antara pH dan waktu inkubasi abubatubara (AB), serbuk gergaji (SG), pupuk kandang (PK) dalam AAT

Limbah organik diinkubasi dalam air suling memberikan nilai pH air yang mendekati netral selama kurun waktu inkubasi 30 hari. Bagaimanakan bila limbah organik diinkubasikan ke dalam air asam tambang? Penelitian menunjukkan bahwa limbah organik mampu mengubah pH air asam tambang dari pH awal 2.5 menjadi pH mendekati netral (lihat Gambar 7 dan 8).



Gambar 7. Nilai pH air pada perlakuan limbah organik yang diinkubasi dalam air suling selama 30 hari (rata-rata dari 4 ulangan dan 4 kali pengamatan inkubasi)



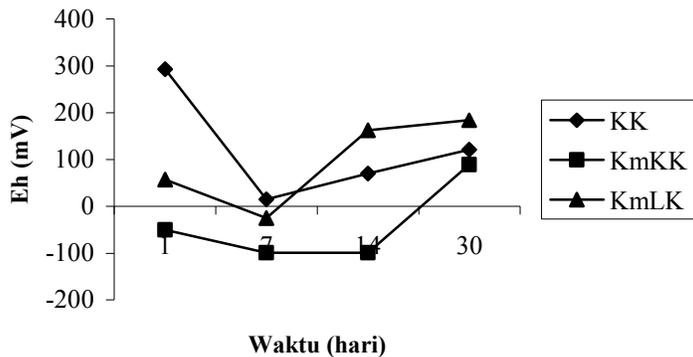
Gambar 8. Nilai pH-AAT pada perlakuan limbah organik yang diinkubasi dalam AAT selama 30 hari (rata-rata dari 4 ulangan dan 4 kali pengamatan inkubasi)

Potensial Redoks (Eh)

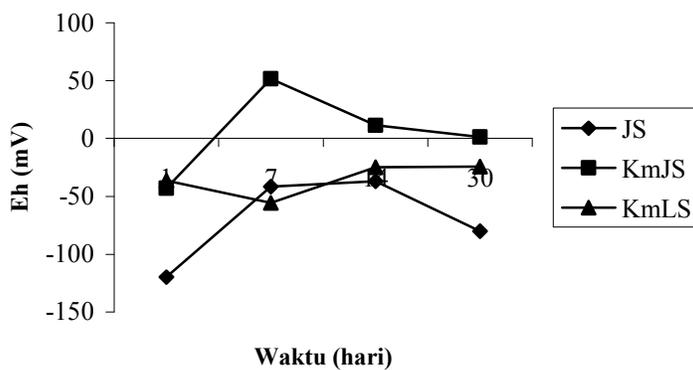
Hubungan antara Eh dan waktu inkubasi limbah organik dapat dilihat pada Gambar 9 sampai dengan 11. Gambar 9 menunjukkan bahwa kompos kulit kayu (KmKK) mula-mula mempunyai Eh negatif sampai dengan hari ke 14, tetapi kemudian meningkat menjadi +100 mV. Sedangkan kulit kayu (KK) dan kompos lumpur kayu (KmLK) mula-mula Eh menurun sampai dengan di bawah angka nol, tetapi kemudian meningkat sampai dengan angka +100 sampai dengan +200 mV. Inkubasi KK, KmKK, dan KmLK menunjukkan bahwa kisaran nilai Eh mulai dari -100 sampai dengan +200 mV. Hal ini menunjukkan bahwa di dalam sistem limbah organik – air suling terjadi reduksi NO_3 , Fe^{3+} , SO_4 , CO_2 , N_2 , dan H^+ (Bonn, et al. 1979). Hasil reduksi masing-masing unsur atau senyawa kimiawi berturut-turut NO_2 , Fe^{2+} , H_2S , C, NH_3 , dan H_2 .

Gambar 10 menunjukkan bahwa janjang sawit (JS) dan kompos lumpur sawit (KmLS) mempunyai kecenderungan Eh yang negatif (-30 sampai dengan -100 mV), sedangkan kompos janjang sawit (KmJS) mempunyai Eh cenderung bernilai nol mV. Hal ini mengindikasikan bahwa di dalam sistem ini terjadi reduksi SO_4 menjadi H_2S . Senyawa Hidrogen Sulfida ini berbau busuk dan berbentuk gas yang hilang ke atmosfer (Catatan: Ketika terjadi gempa di Bengkulu pada tanggal 12 September 2007 dengan 7.9 skala Richter, gedung laboratorium tanah digoncang gempa sampai 5 toples percobaan berisi limbah organik + air suling terjatuh ke lantai dan tumpah isinya sehingga tercium bau gas sulfida yang menyengat hidung).

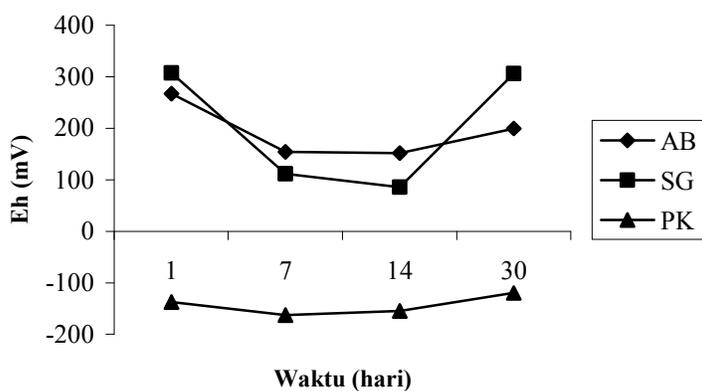
Gambar 11 menunjukkan bahwa abu batura (AB) dan serbuk gergaji (SG) mempunyai kecenderungan nilai Eh +100 mV sampai dengan +300 mV, sedangkan pupuk kandang (PK) mempunyai nilai Eh -100 sampai dengan -200 mV. Hal ini mengindikasikan bahwa di dalam sistem ini terjadi Fe^{2+} , H_2S , CH_4 dari reduksi FeOOH , SO_4 , $(\text{CH}_2\text{O})_n$. $(\text{CH}_2\text{O})_n$ adalah simbol dari bahan organik, bila tereduksi menghasilkan CH_4 .



Gambar 9. Hubungan Eh dan waktu inkubasi kulit kayu (KK), kompos kulit kayu (KmKK), kompos lumpur kayu (KmLK) dalam air suling

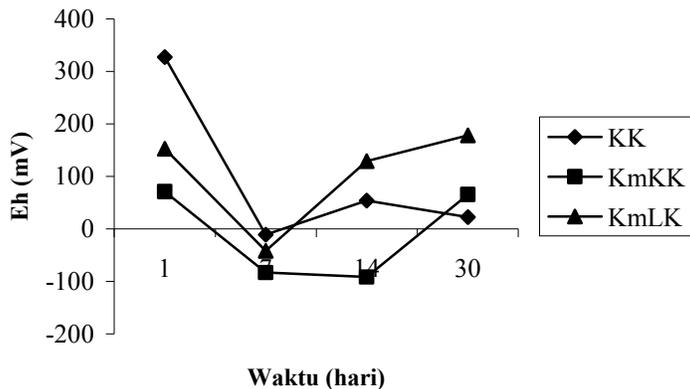


Gambar 10. Hubungan Eh dan waktu inkubasi janjang sawit (JS), kompos janjang sawit (KmJS), kompos lumpur sawit (KmLS) dalam air suling

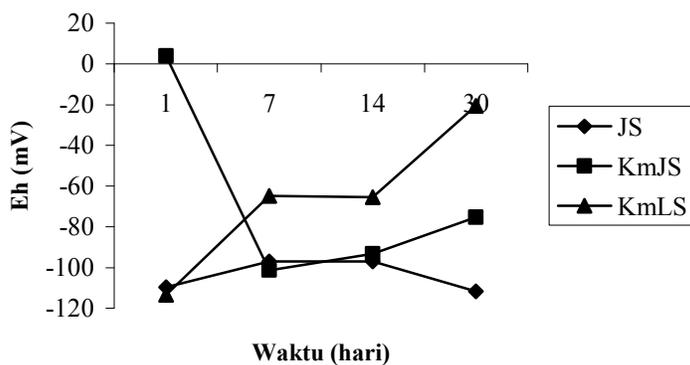


Gambar 11. Hubungan Eh dan waktu inkubasi abu batubara (AB), serbuk gergaji (SG), pupuk kandang (PK) dalam air suling

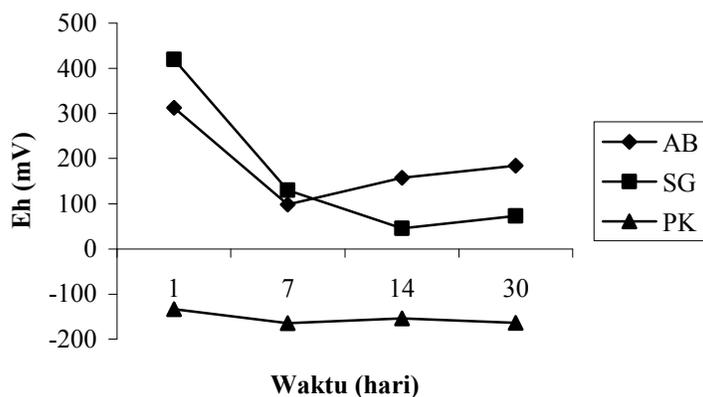
Hubungan Eh dan waktu inkubasi limbah organik dalam air asam tambang disajikan dalam Gambar 12 sampai dengan 14. Gambar 12 menunjukkan bahwa mula-mula Eh menurun dari hari pertama ke hari 7, tetapi kemudian meningkat perlahan sampai dengan hari ke 14. Hal yang menarik adalah meskipun terjadi peningkatan Eh sampai hari ke 14, tetapi masih di bawah angka 180 mV. Proses reduktif terus berlangsung karena meskipun lambat karena angka Eh air suling 300 mV. Hal yang sangat menarik lagi bahwa angka Eh suspensi air asam tambang – janjang sawit, kompos janjang sawit, kompos lumpur sawit adalah negatif mulai dari nol sampai dengan negatif 120 mV (Gambar 13). Hal ini menunjukkan bahwa suasana reduktif yang tercipta karena pengaruh limbah organik tersebut. Namun perlu diperhatikan bahwa angka Eh KmLS terus meningkat mulai dari hari pertama sampai dengan hari ke 14 inkubasi. Dalam keadaan reduktif (lihat Gambar 13) unsur yang tereduksi adalah besi (II), Zn (II), Al (III). Gambar 14 menunjukkan bahwa Eh negatif terjadi pada PK, sedangkan Eh positif terjadi pada AB dan SG. Penurunan Eh terjadi dari 400 mV menjadi 100 mV pada AB dan SG mulai hari pertama sampai hari ke 7 inkubasi, kemudian angka Eh stabil pada angka 100 mV sampai hari ke 30. Penurunan angka Eh tidak terjadi pada PK mulai hari pertama sampai dengan hari ke 30 Eh relatif stabil pada angka -100 sampai dengan -200 mV. Logam besi, aluminium, mangan, dan sulfat larut dijumpai pada Eh negatif 100 sampai -200 mV.



Gambar 12. Hubungan Eh dan waktu inkubasi kulit kayu (KK), kompos kulit kayu (KmKK), kompos lumpur kayu (KmLK) dalam AAT



Gambar 13. Hubungan Eh dan waktu inkubasi janjang sawit (JS), kompos janjang sawit (KmJS), kompos lumpur sawit (KmLS) dalam AAT



Gambar 14. Hubungan Eh dan waktu inkubasi abu batubara (AB), serbuk gergaji (SG), pupuk kandang (PK) dalam AAT

Hubungan Potensial Redoks (Eh) dengan pH

Hubungan Eh dengan pH dapat dinyatakan dengan rumus di bawah ini.

$$Eh = Eh^{\circ} - (m/n) 0.059 \text{ pH} \quad (\text{Bohn et al. 1979}) \dots\dots\dots (7)$$

Adapun :

Eh = potensial redoks larutan yang diukur

Eh° = potensial redoks referen yang dipakai (kalibrasi elektroda Pt)

$m = H^{+}$

$n = e^{-}$

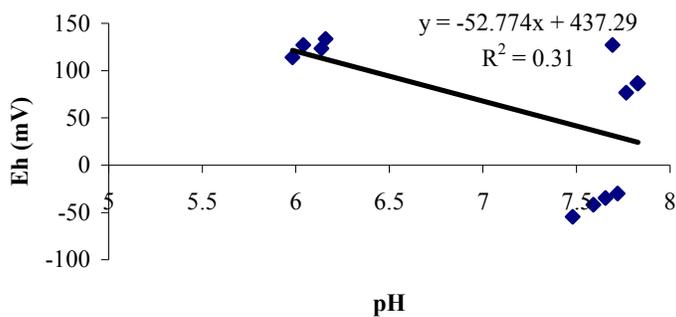
$m/n = 1$

$\text{pH} = -\log [H^{+}]$

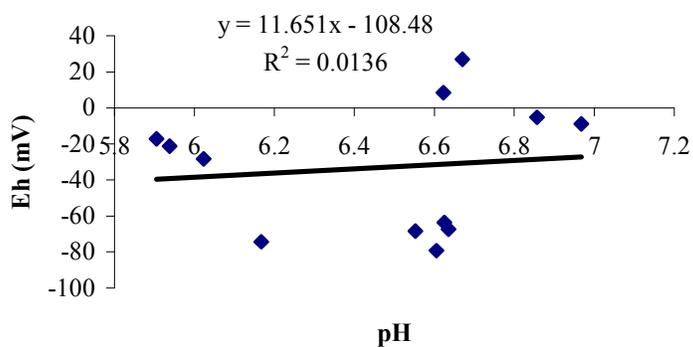
Keberadaan Hidrogen (H^{+}) mempengaruhi potensial elektroda di dalam reaksi redoks (Eh). Bila $Eh^{\circ} = 0$ maka Eh berbanding terbalik dengan pH. Bila pH suatu larutan meningkat, maka Eh menurun atau negatif.

Hubungan antara Eh dan pH pada inkubasi limbah organik dalam air suling selama 30 hari disajikan dalam Gambar 15 sampai dengan 17. Gambar 15 menunjukkan bahwa terjadi penurunan nilai Eh pada perlakuan kelompok kulit kayu dengan meningkatnya pH suspensi air suling-kulit kayu. Hal yang sama juga diikuti oleh kelompok abu batubara (Gambar 17). Kedua kelompok limbah organik ini mempunyai nilai Eh positif. Berbeda halnya dengan kelompok janjang sawit (Gambar 16) terjadi peningkatan Eh dengan bertambahnya pH suspensi air suling-janjang sawit. Kelompok limbah organik terakhir ini mempunyai nilai Eh negatif.

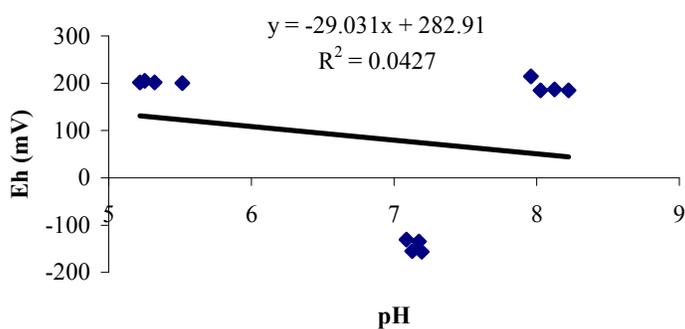
Kesimpulan yang diperoleh Gambar 15 – 17 adalah kelompok kulit kayu dan kelompok abu batubara selama inkubasi dalam air suling cenderung bereaksi reduktif (karena terjadi penurunan Eh dari positif besar ke positif kecil), sedangkan kelompok janjang sawit cenderung bereaksi oksidatif (karena terjadi peningkatan Eh). Namun, korelasi ke tiga kelompok ini bernilai sangat kecil sehingga diperlukan pengujian dengan sampel pengukuran yang lebih banyak dan lebih seragam.



Gambar 15. Hubungan antara Eh dan pH pada perlakuan kelompok kulit kayu (KK, KmKK, KmLK) dalam air suling yang diinkubasi 30 hari



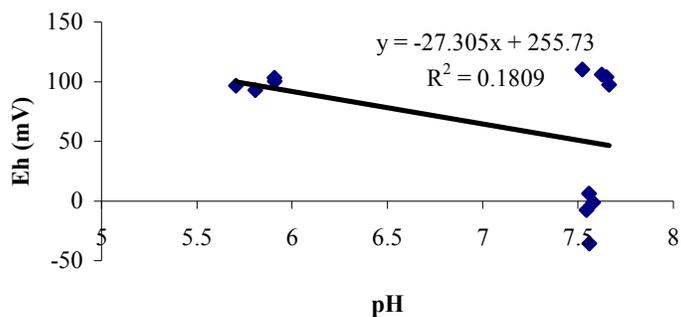
Gambar 16. Hubungan antara Eh dan pH pada perlakuan kelompok janjang sawit (JS, KmJS, KmLS) dalam air suling yang diinkubasi 30 hari



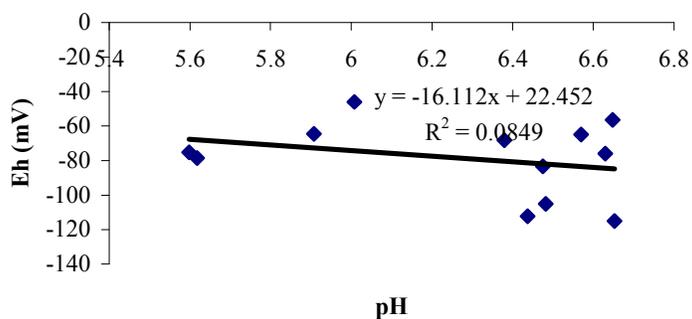
Gambar 17. Hubungan antara Eh dan pH pada perlakuan kelompok abu batubara (AB, SG, PK) dalam air suling yang diinkubasi 30 hari

Hubungan antara Eh dan pH pada inkubasi limbah organik di dalam air asam tambang selama 30 hari disajikan dalam Gambar 18 sampai dengan 20.

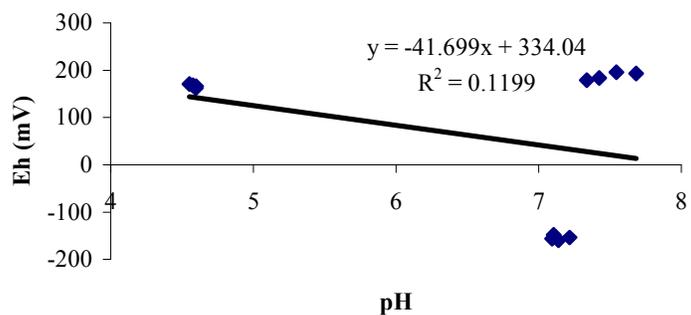
Gambar 18 dan 20 menunjukkan bahwa Eh cenderung menurun dengan meningkatnya pH suspensi air asam tambang pada kelompok kulit kayu dan kelompok abu batubara. Hal yang sama dijumpai pada Gambar 19, Eh cenderung menurun dengan meningkatnya pH suspensi air asam tambang pada kelompok janjang sawit. Nilai Eh cenderung positif terdapat pada kelompok kulit kayu dan kelompok abu batubara, sedangkan Eh cenderung negatif kecil pada kelompok janjang sawit. Hal ini mempunyai makna bahwa ke tiga kelompok cenderung suasananya reduktif terutama kelompok janjang sawit lebih reduktif daripada ke dua kelompok lainnya.



Gambar 18. Hubungan antara Eh dan pH pada perlakuan kelompok kulit kayu (KK, KmKK, KmLK) dalam air asam tambang (AAT) yang diinkubasi 30 hari



Gambar 19. Hubungan antara Eh dan pH pada perlakuan kelompok janjang sawit (JS, KmJS, KmLS) dalam AAT yang diinkubasi 30 hari

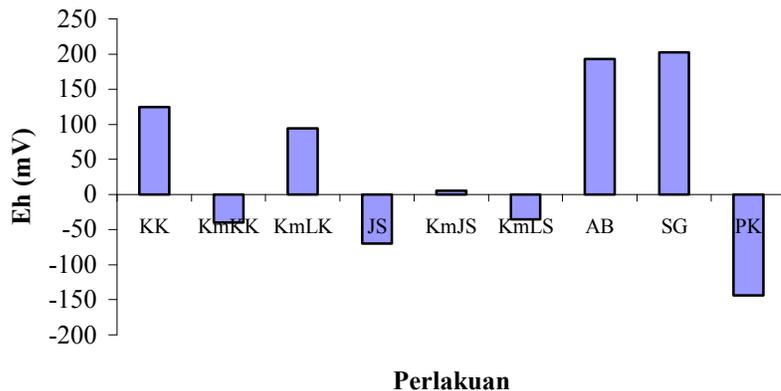


Gambar 20. Hubungan antara Eh dan pH pada perlakuan kelompok abu batubara (AB, SG, PK) dalam AAT yang diinkubasi 30 hari

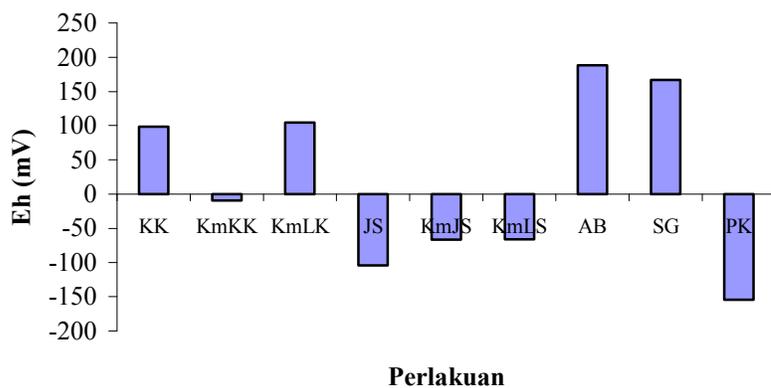
Nilai Eh air maupun Eh air asam tambang dengan perlakuan limbah organik yang diinkubasi selama 30 hari disajikan dalam Gambar 21 dan 22.

Gambar 21 menunjukkan bahwa nilai Eh positif dijumpai pada kulit kayu (KK), kompos lumpur kayu (KmLK), kompos janjang sawit (KmJS), abu batubara (AB), dan serbuk gergaji (SG), sedangkan nilai Eh negatif dijumpai pada kompos kulit kayu (KmKK), janjang sawit (JS), kompos lumpur sawit (KmLS), dan pupuk kandang (PK). Hal ini berarti bahwa limbah organik yang mempunyai nilai Eh negatif mampu menciptakan suasana reduktif dalam sistem air suling-limbah organik, sedangkan limbah organik yang mempunyai nilai Eh positif mampu menciptakan suasana oksidatif dalam sistem tersebut.

Gambar 22 menunjukkan bahwa nilai Eh positif dijumpai pada janjang sawit (JS), kompos janjang sawit (KmJS), kompos lumpur sawit (KmLS), dan pupuk kandang (PK), sedangkan nilai Eh positif dijumpai pada kulit kayu (KK), kompos lumpur kayu (KmLK), kompos lumpur kayu (KmLK), abu batubara (AB), dan serbuk gergaji (SG), sedangkan nilai Eh negatif dijumpai pada KmKK, JS, KmJS, KmLS, dan PK. Hal ini berarti bahwa dalam suasana asam (air asam tambang) suasana reduktif tercipta lebih baik oleh limbah organik yang dipakai dalam sistem inkubasi limbah organik dan air suling, sedangkan limbah organik yang mempunyai nilai Eh positif dapat menciptakan suasana oksidatif sama seperti ketika berada di dalam sistem air suling-limbah organik.



Gambar 21. Nilai Eh air pada perlakuan limbah organik yang diinkubasi dalam air suling selama 30 hari (rata-rata dari 4 ulangan dan 4 kali pengamatan inkubasi)



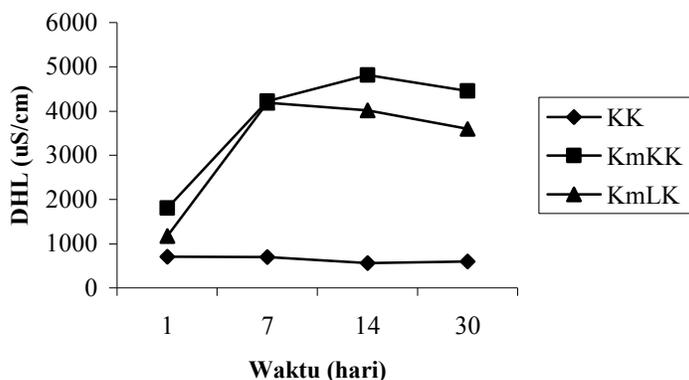
Gambar 22. Nilai Eh air asam tambang pada perlakuan limbah organik yang diinkubasi dalam AAT selama 30 hari (rata-rata dari 4 ulangan dan 4 kali pengamatan inkubasi)

Daya Hantar Listrik (DHL)

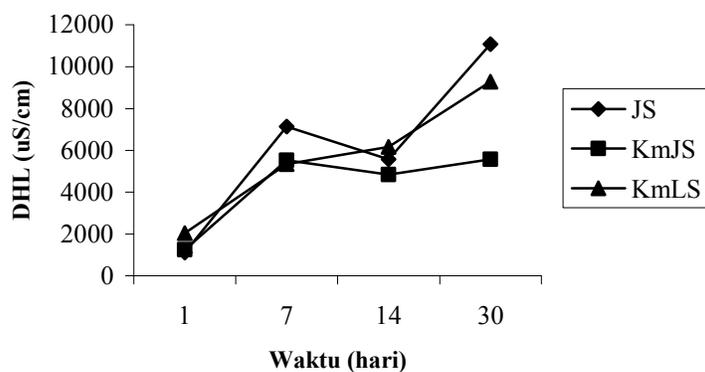
Hubungan antara DHL dan waktu inkubasi limbah organik dalam air suling disajikan dalam Gambar 23 sampai dengan 25. Gambar 23 menunjukkan bahwa terjadi peningkatan DHL pada KmKK dan KmLK yang tinggi dari 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pada hari pertama inkubasi menjadi 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, kecuali untuk kulit kayu (KK). Hal ini disebabkan KmKK dan KmLK banyak mengandung mineral yang berasal dari campuran liat dan produk sisa dari pabrik kertas dan pulp PT TEL (Tanjung Enim Lestari) di Muara Enim. Hasil analisis laboratorium sifat kimiawi KK, KmKK, dan KmLK diperoleh bahwa pH dan DHL dari KmKK dan KmLK lebih besar daripada pH dan DHL dari KK (lihat Tabel 1). Hal ini berarti ketersediaan basa-basa (Na, K, Ca, Mg) dan logam mikro lebih tinggi pada KmKK dan KmLK daripada KK.

Gambar 24 menunjukkan bahwa ke tiga limbah organik (JS, KmJS, dan KmLS) memberikan peningkatan DHL dari hari pertama inkubasi sampai dengan hari ke 30. Peningkatan DHL ini sangat besar dari 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sampai dengan 12000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Hasil analisis laboratorium menunjukkan bahwa pH dan DHL ke tiga limbah organik ini sangat tinggi (lihat Tabel 1). Hal ini berarti bahwa kemungkinan terjadinya peningkatan DHL ke tiga limbah organik ini sangat layak, karena pelarutan basa-basa dan unsur hara di dalam air menyebabkan total garam terlarut makin tinggi akhirnya DHL juga makin tinggi.

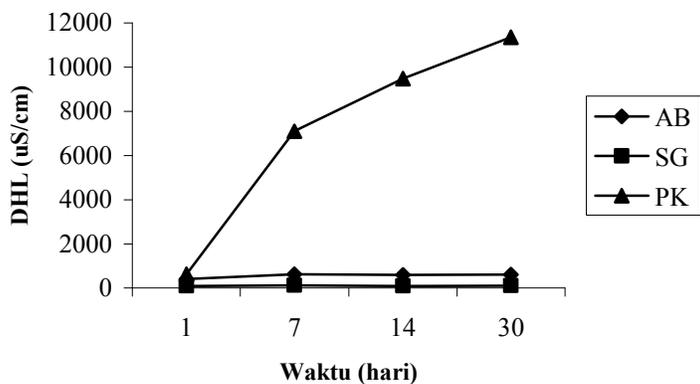
Gambar 25 menunjukkan bahwa DHL meningkat dari hari pertama sampai hari ke 30 hanya untuk pupuk kandang (PK), sedangkan abu batubara (AB) dan serbuk gergaji (SG) tidak mengalami peningkatan DHL, cenderung menunjukkan angka yang stabil (tidak meningkat). Hasil analisis laboratorium menunjukkan bahwa pH dan DHL serbuk gergaji sangat rendah, tetapi pH dan DHL abu batubara (AB) dan PK justru sangat tinggi (lihat Tabel 1). Hal yang menarik disini bahwa abu batubara mempunyai pH dan DHL yang sangat tinggi malah tidak terjadi peningkatan DHL dengan bertambahnya waktu inkubasi limbah organik dalam air suling. Kemungkinan besar bahwa kelarutan basa-basa dan logam berat yang ada di dalam abu batubara belum terlarutkan dengan sempurna sehingga memerlukan waktu yang lama, dengan kata lain, kelarutan basa-basa dan logam beratnya sangat rendah sehingga tidak memberikan kontribusi terhadap DHL ketika inkubasi.



Gambar 23. Hubungan antara DHL dan waktu inkubasi kulit kayu (KK), kompos kulit kayu (KmKK), kompos lumpur kayu (KmLK) dalam air suling

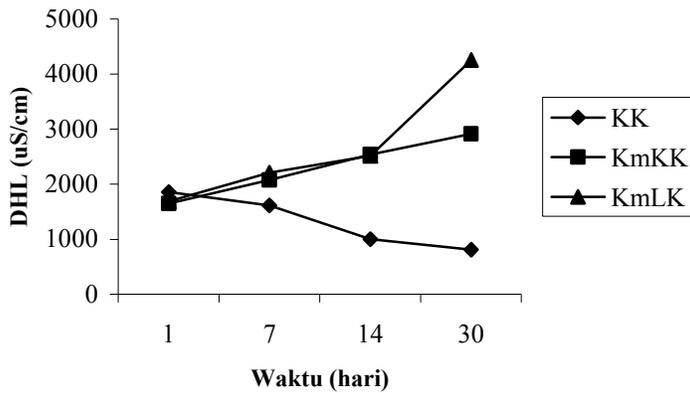


Gambar 24. Hubungan antara DHL dan waktu inkubasi janjang sawit (JS), kompos janjang sawit (KmJS), kompos lumpur sawit (KmLS) dalam air suling

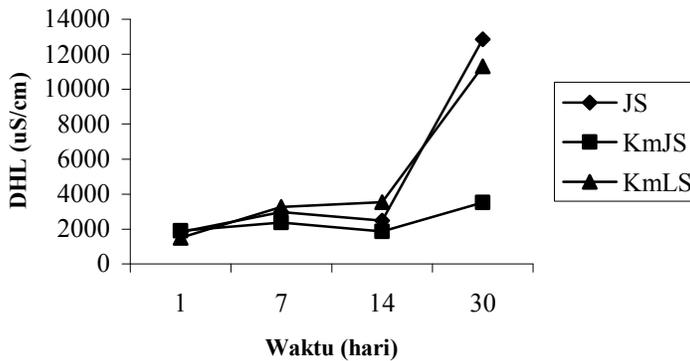


Gambar 25. Hubungan antara DHL dan waktu inkubasi abu batubara (AB), serbuk gergaji (SG), pupuk kandang (PK) dalam air suling

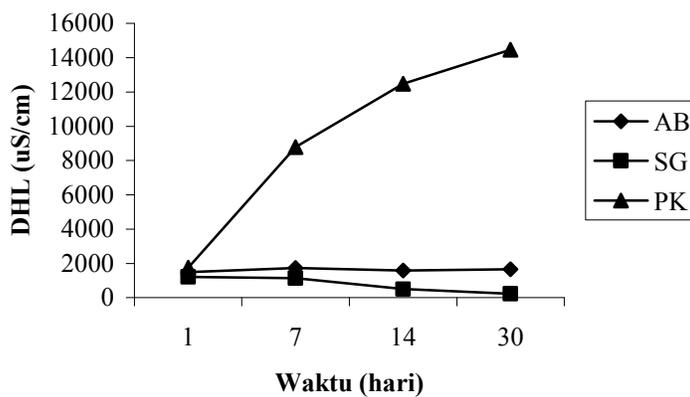
Hubungan antara DHL dan waktu inkubasi limbah organik dalam air asam tambang disajikan dalam Gambar 26 sampai dengan 28. Gambar 26 sampai dengan 28 memperlihatkan bahwa pola grafik yang ditampilkan sama dengan pola grafik yang ada pada Gambar 23 sampai 25 mengenai hal yang sama tetapi berbeda dalam media inkubasinya, air suling. Meskipun sama polanya tetapi tampak adanya penurunan DHL terutama pada kulit kayu (KK) dari 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ menjadi $<1000 \mu\text{S}/\text{cm}$. Kemungkinan hal ini terjadi karena imbalanced basa-basa dan asam yang kecil sehingga basa-basa dipakai untuk menetralkan asam sehingga basa-basa atau garam terlarut di dalam air asam tambang menjadi berkurang, akhirnya garam total terlarut juga menurun. Hal ini berlaku untuk semua limbah organik kecuali pupuk kandang (PK) yang tetap tidak terpengaruh asam dari air asam tambang, meskipun diinkubasi di dalam air asam tambang tetapi tetap saja DHL pupuk kandang tidak berubah bahkan meningkat sampai akhir waktu inkubasi. Kesimpulan yang diperoleh bahwa DHL semua limbah organik tidak dipengaruhi oleh air asam tambang, walaupun ada hanya kecil pengaruhnya terhadap DHL limbah organik dan jumlah DHLnya ditentukan oleh jumlah DHL limbah organik yang berada di dalam air suling (lihat Tabel 1).



Gambar 26. Hubungan antara DHL dan waktu inkubasi kulit kayu (KK), kompos kulit kayu (KmKK), kompos lumpur kayu (KmLK) dalam AAT



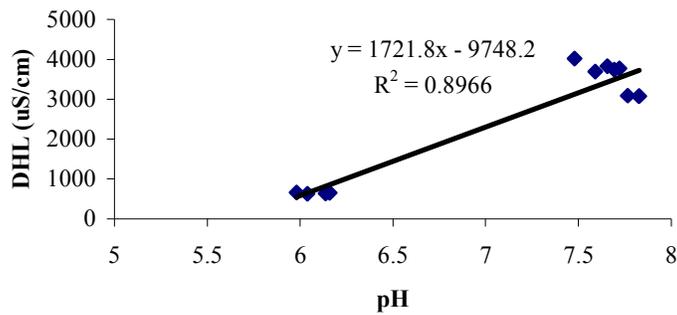
Gambar 27. Hubungan antara DHL dan waktu inkubasi janjang sawit (JS), kompos janjang sawit (KmJS), kompos lumpur sawit (KmLS) dalam AAT



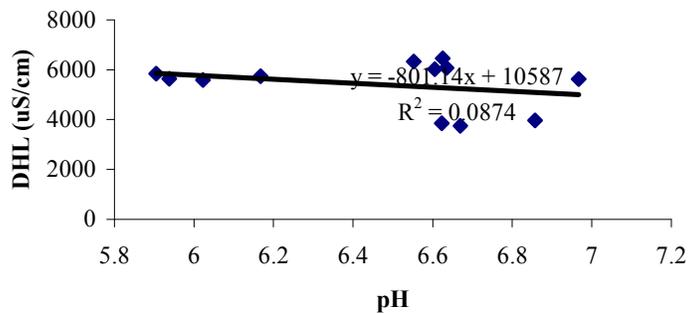
Gambar 28. Hubungan antara DHL dan waktu inkubasi abu batubara (AB), serbuk gergaji (SG), pupuk kandang (PK) dalam AAT

Hubungan DHL dan pH

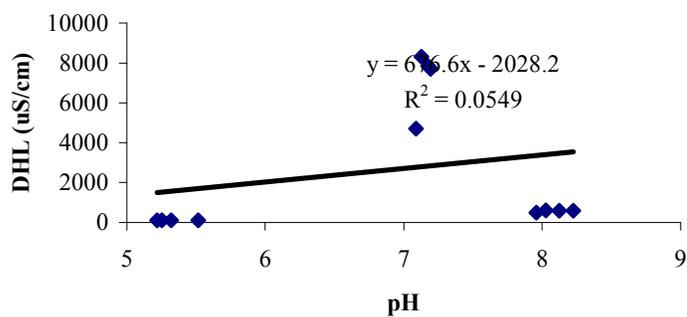
Hubungan antara DHL dan pH pada perlakuan inkubasi limbah organik dalam air suling disajikan dalam Gambar 29 sampai dengan 31. Hasilnya menunjukkan bahwa hubungan antara DHL dan pH adalah linier positif, kecuali kelompok janjang sawit (JS, KmJS, KmLS) yang mempunyai hubungan linier negatif. Nilai keeratan hubungan (R^2) adalah 0.0847 untuk kelompok janjang sawit, $R^2 = 0.0549$ untuk kelompok abu batubara (sangat kecil), sedangkan $R^2 = 0.8966$ untuk kelompok kulit kayu (tinggi). Kesimpulannya bahwa hubungan antara DHL dan pH pada perlakuan inkubasi limbah organik dalam air suling terjadi pada kelompok kulit kayu (KK, KmKK, KmLK), tetapi tidak terjadi pada kelompok limbah organik yang lain.



Gambar 29. Hubungan antara DHL dan pH pada perlakuan kelompok kulit kayu (KK, KmKK, KmLK) dalam air suling

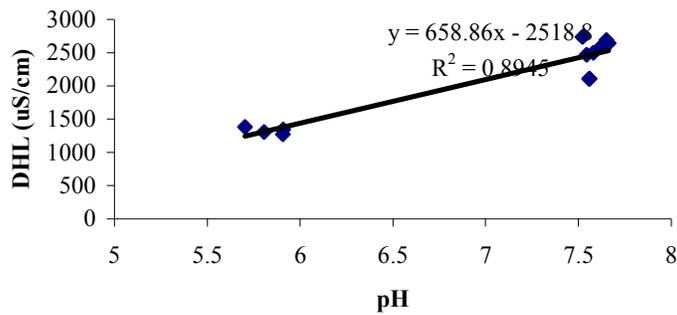


Gambar 30. Hubungan antara DHL dan pH pada perlakuan kelompok janjang sawit (JS, KmJS, KmLS) dalam air suling

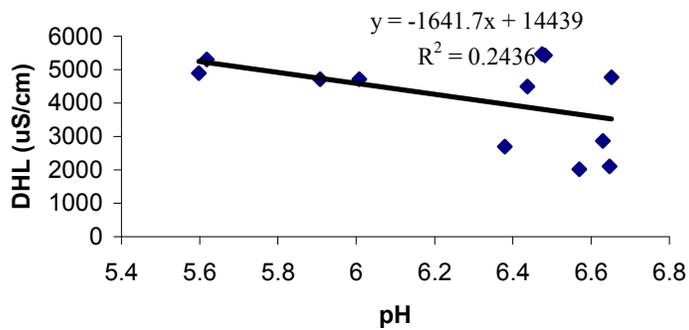


Gambar 31. Hubungan antara DHL dan pH pada perlakuan kelompok abu batubara (AB, SG, PK) dalam air suling

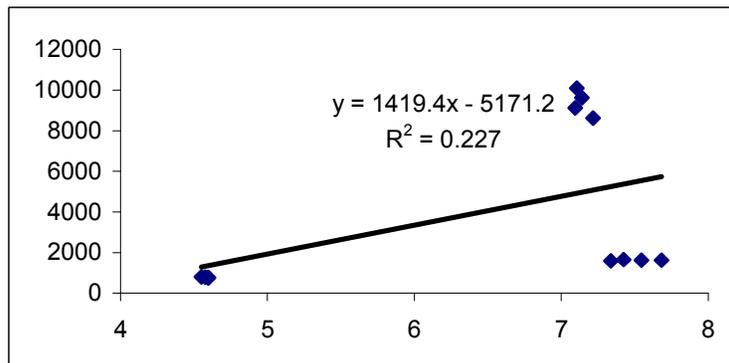
Hubungan antara DHL dan pH pada perlakuan limbah organik dalam air asam tambang disajikan dalam Gambar 32 sampai dengan 34. Gambar 32 menunjukkan bahwa penambahan pH meningkatkan DHL suspensi kelompok kulit kayu dalam air asam tambang dengan keeratan hubungan (R^2) = 0.8945 (tinggi). Hal yang sama juga terjadi pada kelompok abu batubara dengan keeratan hubungan (R^2) = 0.2270 (Gambar 34). Namun, penambahan pH menurunkan DHL suspensi kelompok janjang sawit dalam air asam tambang dengan keeratan hubungan (R^2) = 0.2436 (Gambar 33). Kesimpulan yang sama dengan kesimpulan yang sebelumnya bahwa hubungan antara DHL dan pH terjadi pada inkubasi kelompok kulit kayu (KK, KmKK, KmLK) dalam air asam tambang, tetapi tidak terjadi pada inkubasi kelompok limbah organik lainnya.



Gambar 32. Hubungan antara DHL dan pH pada perlakuan kelompok kulit kayu (KK, KmKK, KmLK) dalam AAT

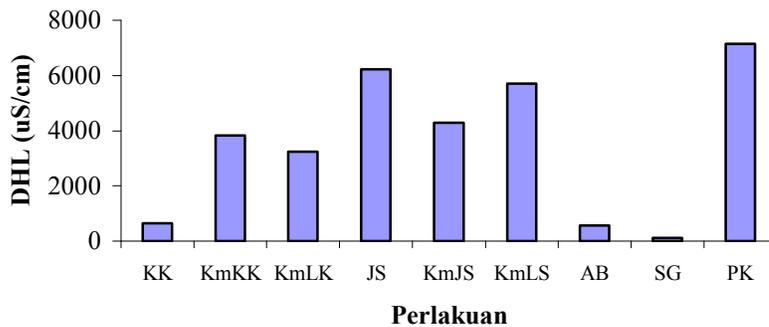


Gambar 33. Hubungan antara DHL dan pH pada perlakuan kelompok janjang sawit (JS, KmJS, KmLS) dalam AAT

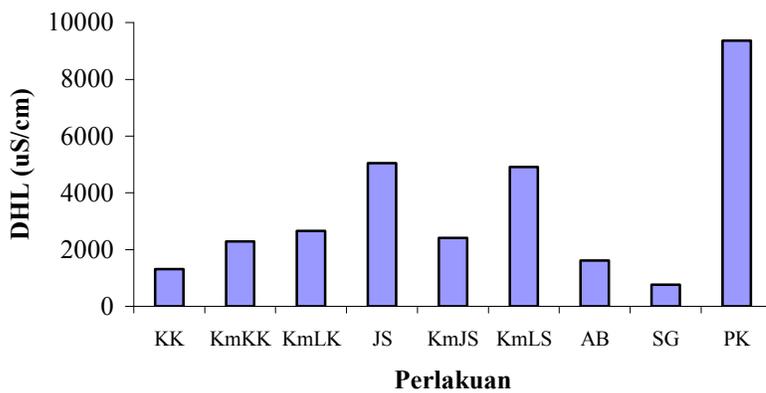


Gambar 34. Hubungan antara DHL dan pH pada perlakuan kelompok abu batubara (AB, SG, PK) dalam AAT

Distribusi DHL pada berbagai limbah organik yang diinkubasi dalam air suling dan air asam tambang disajikan dalam Gambar 35 dan 36. Gambar 35 menunjukkan bahwa distribusi DHL berbagai limbah organik dapat diurutkan dari tertinggi sampai dengan terendah sebagai berikut: PK>JS>KmLS>KmJS>KmKK>KmLK>KK=AB>SG. Gambar 36 menunjukkan bahwa distribusi DHL dari tertinggi sampai dengan terendah sebagai berikut: PK>JS>KmLS>KmLK>KmKK>AB>KK>SG.



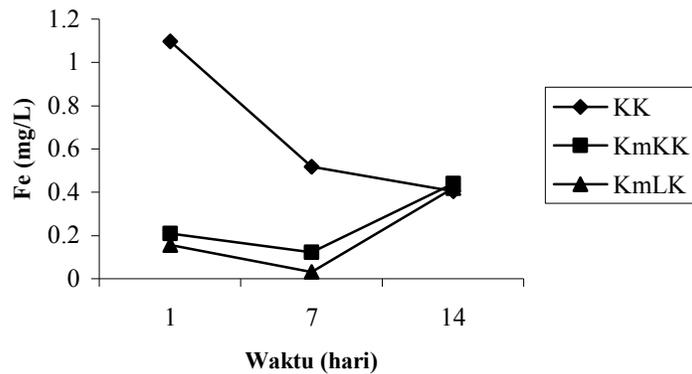
Gambar 35. Nilai DHL air pada perlakuan limbah organik yang diinkubasi dalam air suling selama 30 hari (rata-rata dari 4 ulangan dan 4 kali pengamatan inkubasi)



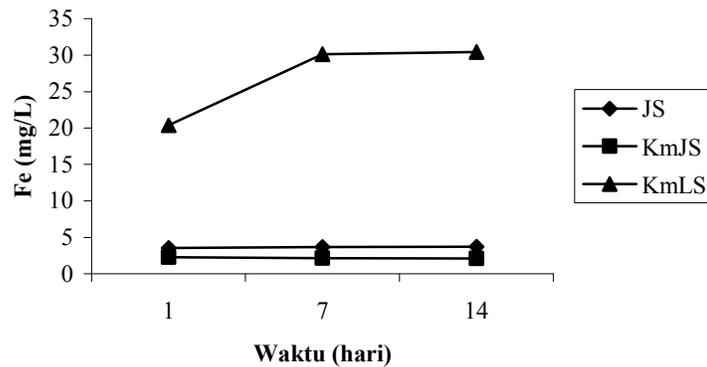
Gambar 36. Nilai DHL air asam tambang pada perlakuan limbah organik yang diinkubasi dalam AAT selama 30 hari (rata-rata dari 4 ulangan dan 4 kali pengamatan inkubasi)

Besi (Fe) larut dalam air asam tambang

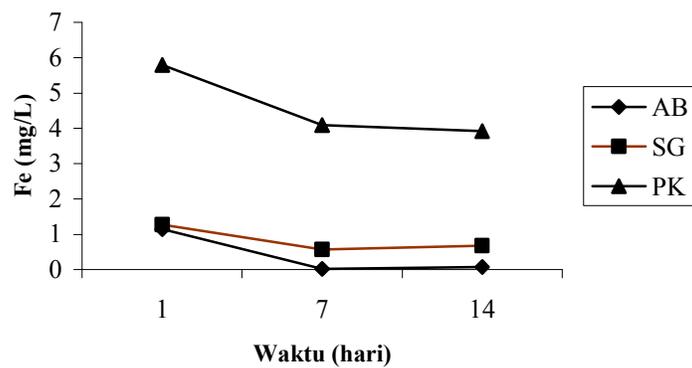
Hubungan antara Fe dan waktu inkubasi limbah organik dalam air asam tambang disajikan dalam Gambar 37 sampai dengan 39. Gambar 37 menunjukkan bahwa terjadi penurunan kadar Fe dalam air asam tambang sampai dengan kurang dari 0.5 mg/L pada hari ke 7, kemudian kadar Fe meningkat dari 0.1 mg/L pada hari ke 7 menjadi 0.5 mg/L pada hari 14. Hal yang menarik adalah kompos kulit kayu mulai dari hari pertama sampai dengan ke 14 terjadi penurunan kadar Fe dalam air asam tambang sampai dengan 0.5 mg/L. Hal ini karena KmKK mempunyai kemampuan menjerap logam Fe menjadi ikatan senyawa organik-Fe atau humus-Fe. Gambar 38 menunjukkan bahwa terjadi peningkatan kadar Fe larut dalam air asam tambang pada KmLS, sedangkan JS dan KmJS tidak terjadi peningkatan kadar Fe larut. Kenapa KmLS meningkatkan kadar Fe larut dalam air asam tambang? Karena kandungan Fe dalam KmLS lebih tinggi daripada kandungan Fe dalam JS maupun KmJS (lihat Tabel 1). Keberadaan Fe sangat bergantung pada keberadaan unsur Mn dan Zn di dalam larutan. Semakin tinggi kadar Mn maupun Zn di dalam larutan semakin tinggi juga keberadaan kadar Fe di dalam larutan. Keberadaan kadar Mn dan Zn dalam larutan KmLS sangat tinggi (lihat Tabel 1) sehingga keberadaan kadar Fe juga menjadi sangat tinggi. Gambar 39 menunjukkan bahwa terjadi penurunan kadar Fe larut air asam tambang bagi ke tiga limbah organik (AB, SG, PK). Hal yang menarik adalah kadar Fe larut menurun sampai dengan kurang dari 1 mg/L dijumpai pada AB dan SG, sedangkan kadar Fe larut menurun sampai dengan 4 mg/L dijumpai pada PK. Hal ini disebabkan kadar Fe larut dijumpai pada PK lebih tinggi daripada yang dijumpai pada AB maupun SG (lihat Tabel 1). Kadar Mn dan Zn di dalam PK sangat tinggi sehingga memacu terjadinya keberadaan Fe larut di dalam air asam tambang.



Gambar 37. Hubungan antara Fe dan waktu inkubasi kulit kayu (KK), kompos kulit kayu (KmKK), kompos lumpur kayu (KmLK) dalam AAT



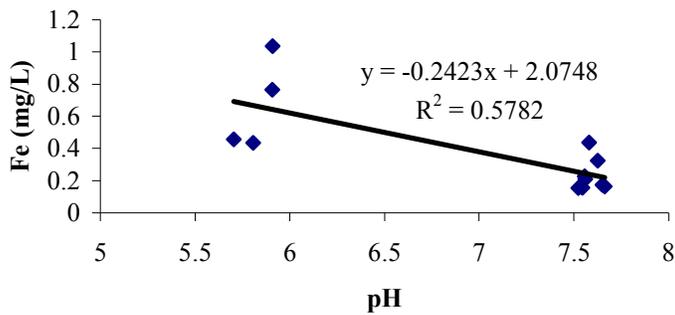
Gambar 38. Hubungan antara Fe dan waktu inkubasi janjang sawit (JS), kompos janjang sawit (KmJS), kompos lumpur sawit (KmLS) dalam AAT



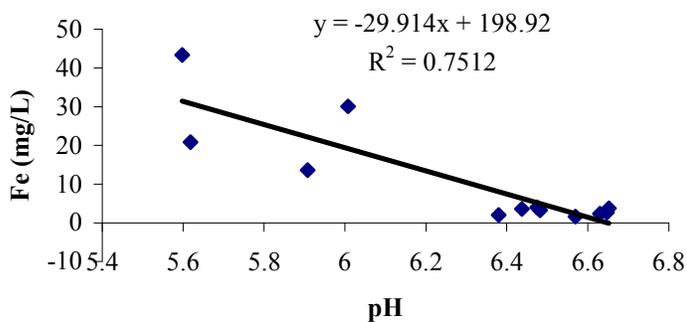
Gambar 39. Hubungan antara Fe dan waktu inkubasi abu batubara (AB), serbuk gergaji (SG), pupuk kandang (PK) dalam AAT

Hubungan antara Besi (Fe)-larut dan pH

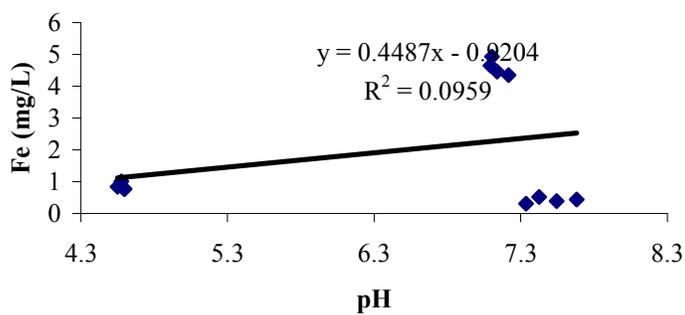
Hubungan antara Fe dan pH pada perlakuan inkubasi limbah organik dalam air asam tambang disajikan dalam Gambar 40 sampai dengan 42. Gambar 40 menunjukkan bahwa terjadi penurunan Fe larut dengan meningkatnya pH suspensi air asam tambang-kelompok kulit kayu (KK, KmKK, KmLK). Hal yang serupa terjadi pada inkubasi kelompok janjang sawit (JS, KmJS, KmLS) dalam air asam tambang, penurunan Fe dengan meningkatnya pH (Gambar 41). Sebaliknya, terjadi peningkatan Fe dengan meningkatnya pH suspensi air asam tambang-kelompok abu batubara (AB, SG, PK), tetapi bila dilihat hubungan keeratannya (R^2) 0.0959 termasuk sangat kecil (Gambar 42). Hal ini berarti bahwa hanya 9% kontribusi pH terhadap peningkatan Fe (dapat diabaikan).



Gambar 40. Hubungan antara Fe dan pH pada perlakuan kelompok kulit kayu (KK, KmKK, KmLK) dalam AAT

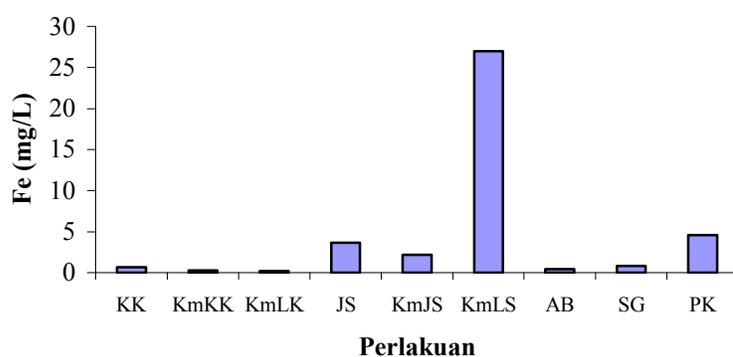


Gambar 41. Hubungan antara Fe dan pH pada perlakuan kelompok janjang sawit (JS, KmJS, KmLS) dalam AAT



Gambar 42. Hubungan antara Fe dan pH pada perlakuan kelompok abu batubara (AB, SG, PK) dalam AAT

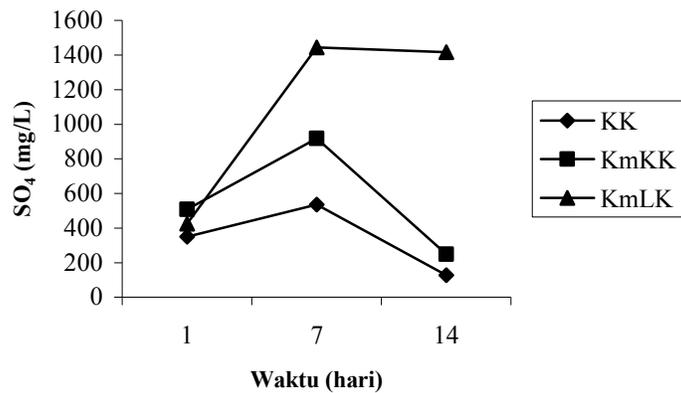
Bila dilihat Fe dalam suspensi air asam tambang-limbah organik disajikan dalam Gambar 43. Gambar 43 menunjukkan bahwa kadar Fe masing-masing limbah organik dapat diurutkan dari terbesar sampai dengan terendah adalah $KmLS > PK > JS > KmJS > KK = SG > AB > KK > KmKK = KmLK$. Kalau dipilahkan limbah organik yang mempunyai kadar Fe yang sangat rendah adalah SG, AB, KK, KmKK, dan KmLK. Artinya bahwa limbah organik yang terakhir ini mampu menurunkan kadar Fe larut air asam tambang. Kemudian disusul dengan limbah organik lain yang kadar Fe larut <5 mg/L adalah KmJS, JS, dan PK. Kadar Fe larut mencapai >25 mg/L dijumpai pada KmLS.



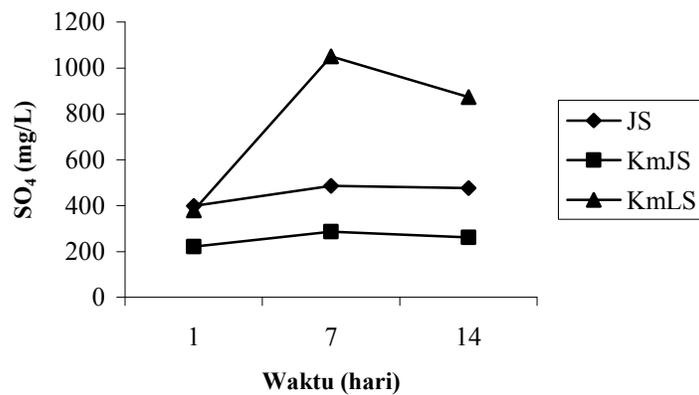
Gambar 43. Kadar Fe air asam tambang pada perlakuan limbah organik yang diinkubasi dalam AAT selama 14 hari (rata-rata dari 4 ulangan dan 4 kali pengamatan inkubasi)

Sulfat (SO₄) larut dalam air asam tambang

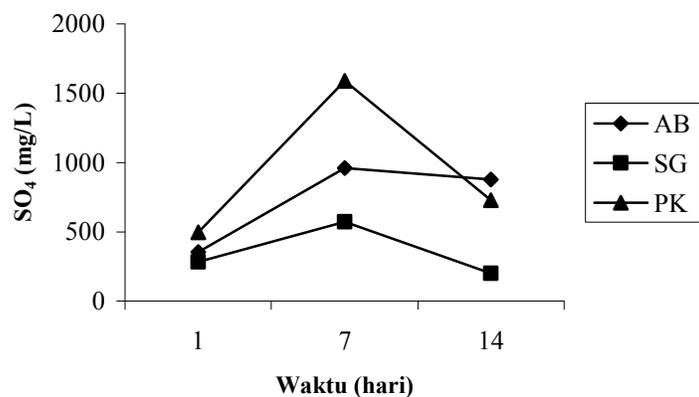
Hubungan antara sulfat dan waktu inkubasi limbah organik dalam air asam tambang disajikan dalam Gambar 44 sampai dengan 46. Gambar 44 menunjukkan bahwa mula-mula kadar SO₄ meningkat dari hari pertama ke 7 kemudian menurun sampai dengan hari ke 14 pada masing-masing KK, KmKK, dan KmLK. Kecenderungan kadar SO₄ menurun dengan bertambahnya waktu inkubasi mengindikasikan terjadinya proses reduksi SO₄ menjadi H₂S (gas) dengan keberadaan bahan organik/humus. Hal yang serupa dijumpai pada limbah organik yang lain, seperti janjang sawit (JS), kompos janjang sawit (KmJS), kompos lumpur sawit (KmLS) yang ditunjukkan dalam Gambar 45. Juga hal yang sama terjadi pada abu batubara (AB), serbuk gergaji (SG), dan pupuk kandang (PK) (Gambar 46).



Gambar 44. Hubungan antara SO_4 dan waktu inkubasi kulit kayu (KK), kompos kulit kayu (KmKK), kompos lumpur kayu (KmLK) dalam AAT

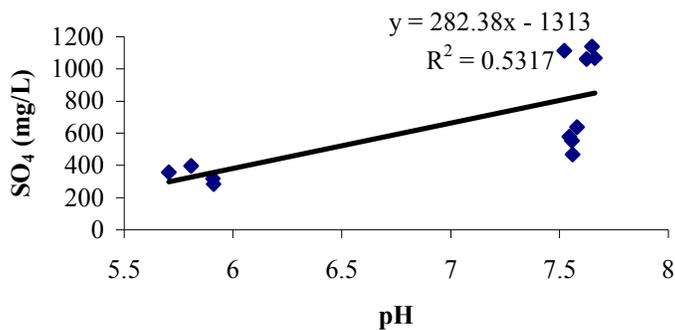


Gambar 45. Hubungan antara SO_4 dan waktu inkubasi janjang sawit (JS), kompos janjang sawit (KmJS), kompos lumpur sawit (KmLS) dalam AAT

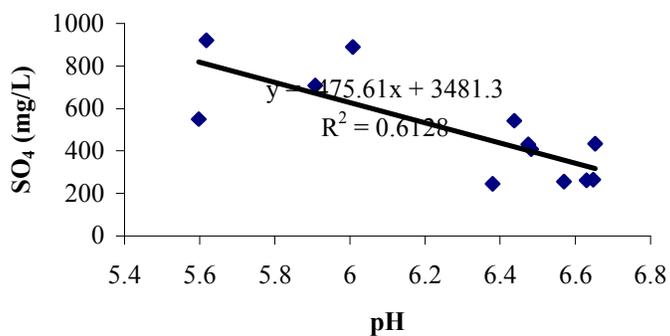


Gambar 46. Hubungan antara SO_4 dan waktu inkubasi abu batubara (AB), serbuk gergaji (SG), pupuk kandang (PK) dalam AAT

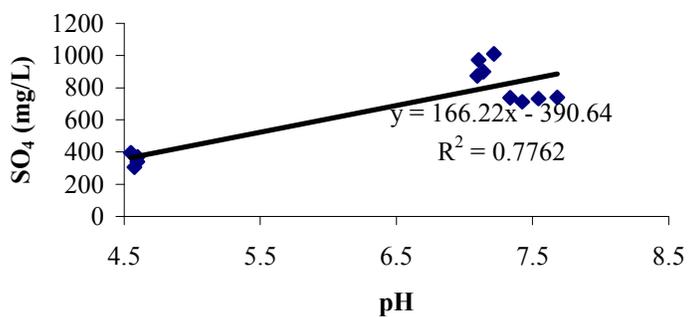
Hubungan antara sulfat dan pH suspensi air asam tambang-limbah organik disajikan dalam Gambar 47 sampai dengan 49. Logam-logam sulfida melepaskan ion logam ke dalam larutan, tetapi tidak menghasilkan asam (Younger et al. 2002 dalam Costello, 2003) dengan alasan yang tidak diketahui. Logam sulfida sangat lambat larut dari proses pelapukan batuan yang berlangsung sangat lama. Proses pelarutan meningkat ketika pH air meningkat mendekati netral (Younger et al, 2002, Blowes et al 2000, dalam Costello, 2003). Dalam kasus pelarutan sulfat di dalam air asam tambang ini yang ditunjukkan dalam Gambar 47 terjadi pelarutan sulfat yang sangat cepat sehingga kadar sulfat meningkat dengan bertambahnya pH suspensi. Hal yang serupa terjadi pada Gambar 49, tetapi beda halnya dengan kasus pada Gambar 48 terjadi penurunan sulfat dengan bertambahnya pH suspensi.



Gambar 47. Hubungan antara SO₄ dan pH pada perlakuan kelompok kulit kayu (KK, KmKK, KmLK) dalam AAT



Gambar 48. Hubungan antara SO₄ dan pH pada perlakuan kelompok janjang sawit (JS, KmJS, KmLS) dalam AAT

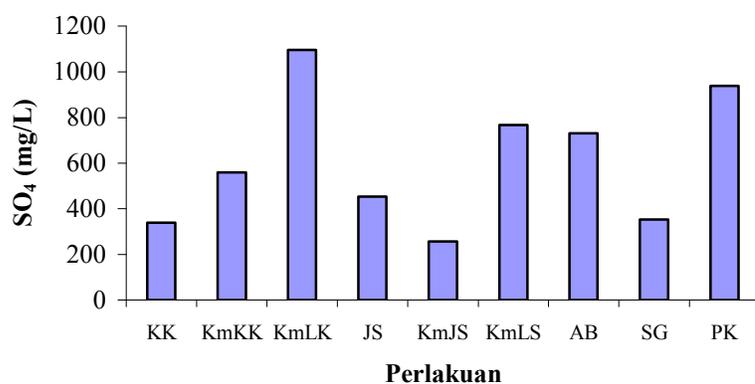


Gambar 49. Hubungan antara SO₄ dan pH pada perlakuan kelompok abu batubara (AB, SG, PK) dalam AAT

Secara keseluruhan dapat dilihat kadar sulfat di dalam suspensi air asam tambang-limbah organik disajikan dalam Gambar 50.

Distribusi sulfat masing-masing limbah organik dalam air asam tambang dari kadar tertinggi sampai dengan terendah sebagai berikut:

KmLK >PK>KmLS>AB>KmKK>JS>SG>KK>KmJS.



Gambar 50. Kadar SO₄ air asam tambang pada perlakuan limbah organik yang diinkubasi dalam AAT selama 14 hari (rata-rata dari 4 ulangan dan 4 kali pengamatan inkubasi)

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah dikemukakan dapat disimpulkan bahwa:

a) Karakteristik limbah organik yang digunakan untuk remediasi air asam tambang sebagai berikut:

- keasaman (pH) limbah organik mendekati netral (7) kecuali kulit kayu dan serbuk gergaji,
- daya hantar listrik (DHL) sangat beragam dari sangat rendah sampai dengan sangat tinggi, DHL sangat rendah terdapat pada serbuk gergaji, abu batubara; DHL sedang pada kulit kayu; DHL tinggi pada kompos kulit kayu, kompos lumpur kayu, kompos lumpur sawit, kompos janjang sawit, pupuk kandang, dan janjang sawit,
- bahan organik (C-organik) limbah organik sangat tinggi, kecuali abu batu bara rendah
- nitrogen total limbah organik rendah kecuali kompos lumpur sawit (sedang),
- fosfor total limbah organik termasuk rendah kecuali pupuk kandang (sedang),
- kapasitas tukar kation (KPK) limbah organik tinggi kecuali abu batubara,
- jumlah basa tertukar (K, Na, Ca, Mg) termasuk rendah kecuali kompos kulit kayu dan kompos lumpur kayu,
- unsur mikro (Fe, Mn, Zn) limbah organik sangat beragam paling rendah terdapat pada abu batubara, sedangkan paling tinggi pada kompos lumpur kayu.

b) Karakteristik air asam tambang yang diambil dari mainsump Banko Barat Pit PTBA Tanjung Enim Sumatera Selatan sebagai berikut:

- keasaman (pH) rerata 2.5; DHL rerata 1394 $\mu\text{S}/\text{cm}$; kalsium (Ca) 33.73 ppm; magnesium (Mg) 83.31 ppm; Fe^{3+} 4,45 ppm; Fe^{2+} 0.06 ppm; aluminium (Al) 7.36 ppm; mangan (Mn) 4.42 ppm; alkalinitas (CaCO_3) 84.21 ppm; dan sulfat (SO_4) 407.28 ppm.
- Contoh air asam tambang yang diberi asam nitrat dianalisis di laboratorium menghasilkan karakteristik: ; Fe^{3+} 7,48 ppm; Fe^{2+} <0.1 ppm.

c) Uji mekanisme/reaksi-reaksi dan kemampuan remediasi bahan organik terhadap air asam tambang diperoleh kesimpulan bahwa,

- keasaman (pH) suspensi air asam tambang – limbah organik meningkat dari 2.5 (pH awal) menjadi mendekati netral (7),
- potensial redoks (Eh) suspensi air asam tambang – limbah organik sebagian bernilai positif rendah (reduksi-oksidasi) dan sisanya bernilai negatif (reduksi). Limbah organik yang memberikan nilai Eh negatif berurutan dari negatif besar ke negatif kecil adalah PK, JS, KmJS, KmLS, KmKK, sedangkan yang memberikan nilai Eh positif rendah secara berurutan dari tertinggi sampai terendah adalah AB, SG, KmLK, KK,
- daya hantar listrik (DHL) suspensi air asam tambang – limbah organik sangat beragam mulai dari rerata terendah 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sampai dengan tertinggi 9000 $\mu\text{S}/\text{cm}$,
- kadar besi larut (Fe) suspensi air asam tambang – limbah organik menurun menjadi sangat rendah, terjadi penurunan kadar besi dari 4.45 ppm menjadi < 1 ppm pada suspensi air asam tambang – kulit kayu, kompos kulit kayu, kompos lumpur kayu, abu batu bara, dan serbuk gergaji. Penurunan kadar besi sampai < 2 ppm terjadi pada suspensi air asam tambang – kompos lumpur sawit. Sedangkan terjadi peningkatan kadar besi suspensi air asam tambang – kompos lumpur sawit, pupuk kandang, dan janjang sawit,
- sulfat (SO_4) air asam tambang – limbah organik terjadi penurunan pada kulit kayu, kompos janjang sawit, dan serbuk gergaji, sedangkan limbah organik lainnya terjadi peningkatan kadar sulfat.

Saran yang dikemukakan bahwa hasil penelitian dasar ini dapat dijadikan dasar ilmiah bagi praktek pengendalian air asam tambang di lapangan dengan menggunakan berbagai limbah organik seperti kulit kayu, kompos kulit kayu, dan serbuk gergaji dalam mekanisme pengendalian pasif (*passive treatment*) air asam tambang.

DAFTAR PUSTAKA

- Bohn, H.L., B. L. McNeal, G. A. O'Connor. 1979. Soil chemistry. Wiley-Interscience Publ. John Wiley & Sons, New York.
- Costello, C. 2003. Acid mine drainage: Innovative treatment technologies. U.S. Environmental Protection Agency Office of Solid Waste and Emergency Response Technology Innovative Office Washington, DC [www,clu-in.org](http://www.clu-in.org)
- Ditch, D.C., and A.D. Karathanasis. 1994. Wetlands: Mechanisms for Treating Acid Mine Drainage, Agronomy Notes. University of Kentucky, Kentucky State University, U.S. Department of Agriculture, and Kentucky Counties Cooperating.
- Drury, W. J. 1999. Treatment of acid mine drainage with anaerobic solid substrate reactors. A research note prepared for: Water Environment Research, February 19, 1999.
- Evangelou, V.P. (Bill). 1995. Pyrite oxidation and control. CRC Press, Boca Raton. 285p+.
- Foth, H. 1984. Fundamentals of soil science 7th edition. John Wiley & Sons, New York.
- Kem, 2004. Informasi air asam tambang. Lembar Fakta. <http://www.keliangold.com>.
- Macalady, Donald L. (Ed). 1998. Passive bioremediation of metals and inorganic contaminants. Perspectives in Environmental Chemistry. New York: Oxford University Press, p 473-495.
- Munawar, A. 2006. Pemanfaatan sumberdaya biologis local untuk pengendalian pasif air asam tambang: Lahan Basah Buatan. Paper disampaikan pada Seminar Nasional "*Rehabilitasi Lahan Bekas Tambang Menuju Pemanfaatan Lahan yang Berkelanjutan*" diselenggarakan oleh Pusat Kajian Rehabilitas Lahan Tambang, (PKRLT) Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 11 Maret 2006.
- Skousen, J., A. Sexstone, K. Garbutt, and J. Sencinder. 1996. Passive treatment of acid mine drainage. In J. G. Skousen and P. F. Ziemkiewicz. (Comp.). Acid mine drainage control and treatment. 2nd ed. West Virginia University and the National Mine Land Reclamation Center, Morgantown, WV. p: 249-260.
- Skousen, J.G., and P. Ziemkiewicz. 1996. Acid mine drainage control and treatment. 2nd ed. West Virginia and National Mine Land Reclamation Center, Morgantown, West Virginia. 362p+

- Skousen, J. 1998. Overview of passive systems for treating acid mine drainage. The second section in "Acid Mine Drainage Control and Treatment, a chapter in "Reclamation of Drastically Disturbed Lands". American Soc. for Agronomy and American Soc. for Surface Mining and Reclamation. West Virginia University Ext. Service. USA.
- Skousen, J., A. Sexstone, J. Cliff, P. Sterner, J. Calabrese, and P. Ziemkiewicz. 1999. Acid mine drainage treatment with a combined wetland/anoxic limestone drain: Greenhouse and Field Systems. In 1999 Proceedings of American Society for Surface Mining and Reclamation (ASSMR) 16th Annual Meeting in Conjunction with Western Region Ash Group 2nd Annual Forum: Mining and Reclamation for the Next Millennium, Scottsdale, Arizona, August 13-19, 1999. Volume 2:621-633.
- Sexstone, J., J.G. Skousen, J. Calabrese, D.K. Bhumbra, J. Cliff, J.C. Sencindiver, and G.K. Bissonnette. 1999. Iron removal from acid mine drainage by wetland. In 1999 Proceedings of American Society for Surface Mining and Reclamation (ASSMR) 16th Annual Meeting in Conjunction with Western Region Ash Group 2nd Annual Forum: Mining and Reclamation for the Next Millennium, Scottsdale, Arizona, August 13-19, 1999. Volume 2:609-620.
- Skousen J. G., A. Sexstone, and P. F. Ziemkiewicz. 2000. Acid mine drainage control and treatment. In J. Bartels (Ed.). Reclamation of Drastically Disturbed Lands. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America. Madison, WI, USA. p.131-168
- US EPA, 1994. Technical document acid mine drainage prediction. Office of Solid Waste Special Waste Branch 401 M Street, SW Washington, DC 20460.
- Vepraska, M.J. 2002. Redox potential measurements.
- Younger, Paul, Banwart, Steven A, Hedin, Robert, S. 2002. Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation. The Netherlands: Kluwer Academic Press.
- Widdowson, J.P. 1990. The impacts of surface mining activities on soil and water. In T. F.Rijnberg (Ed.). Proceedings of the Joint Seminar on Environmental Impacts of Mining in Watershed Management. Bogor and Tanjung Enim, November 5-14th., 1990. p: 34-58
- Zaluski, Marek, trudnowski, John, Canty, Marietta, Baker, Mary Ann Harrington (MSE Technology Applications, Inc. Butte, Montana). Performance of field-Bioreactors with Sulfate-Reducing Bacteria to Control Acid Mine Drainage. Fifth International Conference on Acid Rock Drainage, 20-26 May, 2000, Denver, CO Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), Littleton, CO. ISBN: 0-87335-182-7. Vol 2, p 1169-1175.

Zipper, C, C. Jage. 2000. Passive treatment of acid-mine drainage with vertical-flow systems. Virginia Tech Virginia Polytechnic Institute and State University. <http://www.ext.vt.edu/pubs/mines/460-133/figure1.html>

Instrumen Penelitian

1. Laboratorium: Lab Ilmu Tanah Fakultas Pertanian UNIB dan Lab Kimia Tanah Fakultas Pertanian UGM, Lab Kimia Tanah Balai Penelitian Tanah (BALITTANAH) Bogor.
2. Peralatan utama: pH meter dilengkapi dengan electrode platinum, conductivity-meter tersedia di Lab Ilmu Tanah dan Lab Kehutanan Fakultas Pertanian UNIB
3. Terdapat cukup ruangan untuk inkubasi di Lab Ilmu Tanah UNIB.
4. PT BA menyediakan transportasi dan logistik di lokasi tempat pengambilan limbah organik maupun AAT.
5. Personalia peneliti terdiri dari 2 orang peneliti dibantu oleh 3 orang mahasiswa (Wijayanti, Vefthy V.H, dan Lea A.) tingkat sarjana program Ilmu Tanah yang sedang menyelesaikan skripsinya (data penelitian ini dijadikan bahan skripsi mahasiswa dengan bimbingan peneliti). Di samping itu, 2 laboran yang juga membantu dalam persiapan penelitian (saudara Mansyur dan Suroto), dan dibantu satu orang tenaga lapangan (saudara Dedi).

Riwayat Hidup Peneliti

Peneliti Utama

a. Nama Lengkap dan Gelar

Dr. Ir. Riwandi, MS.

Tempat, tanggal lahir

Batusangkar, 19 Agustus 1956

b. Pendidikan:

Universitas/Institut/Lokasi	Gelar	Tahun Selesai	Bidang Studi
Univ. Gadjah Mada, Yogyakarta	Ir	1983	Ilmu Tanah
Univ. Gadjah Mada, Yogyakarta	MS.	1992	Ilmu Tanah
Institut Pertanian Bogor, Bogor	Dr.	2001	Ilmu Tanah

c. Pengalaman kerja dalam penelitian dan pengalaman professional serta kedudukan saat ini

INSTITUSI	JABATAN	PERIODE KERJA
Lembaga Penelitian UNIB	Anggota Tim Pertimbangan Penelitian	2007-sekarang
Fak. Pertanian UNIB	Ketua Lab. Ilmu Tanah	2006-sekarang
Lembaga Penelitian UNIB	Anggota Tim Pertimbangan Penelitian	2004-2005
Fak. Pertanian UNIB	Peneliti Utama Hibah Bersaing IX	2002/03-2004/05
Fak Pertanian UNIB	Anggota Komisi Penelitian	2003-2006

d. Daftar publikasi yang relevan dengan proposal

1. Pengendalian kadar air kritis gambut akibat terjadinya kering tidak balik: persyaratan dasar pengembangan gambut asal bengkulu. *Dalam* Seminar Nasional Hibah Bersaing Ke IX di Jakarta, 15 sd 17 Juni 2005.
2. Pengaruh pengeringan dan pemberian bahan kapur terhadap beberapa sifat

kimia tanah gambut. *Dalam* Seminar & Lokakarya Nasional Hasil Penelitian dan Pengkajian Teknologi Pertanian Spesifik Lokasi di Palembang, 28 sd 29 Juni 2004.

3. The effect of drying on critical moisture and peat soil chemical properties. *In* International and Exhibition on Prospectus of Lowland Development in Indonesia at Palembang, Dec. 8 until 10, 2003.
4. Hubungan antara kandungan besi dengan tingkat humifikasi dan derivat asam fenolat dalam gambut Jambi dan Kalimantan Tengah. *Jurnal Agrista* Vol. 4 No. 1, April 2000 (Terakreditasi Nasional).
5. Membandingkan ekstraksi humat dan fulvat gambut asal Bengkulu dengan menggunakan larutan NaOH dan Na-Pirofosfat. *Dalam* Seminar Internasional BPPT Jakarta, tahun 1994.

Anggota Peneliti**a. Nama Lengkap dan Gelar**Ir. Ali Munawar, MSc., PhD.**Tempat, tanggal lahir**Sukoharjo, 18 Mei 1959**b. Pendidikan:**

Universitas/Isntitut/ Lokasi	Gelar	Tahun Selesai	Bidang Studi
Univ. Gadjah Mada, Yogyakarta	Ir	1983	Ilmu Tanah
Univ. of Kentucky, Lexington, USA	MSc.	1987	Ilmu Tanah
Univ. of Kentucky, Lexington, USA	PhD.	1991	Ilmu Tanah

c. Pengalaman kerja dalam penelitian dan pengalaman professional serta kedudukan saat ini

Institusi	Jabatan	Periode Kerja
Fak Pertanian UNIB	Ketua Lab Ilmu Tanah	1991-1992
Fak Pertanian UNIB	Ketua Jur Budidaya Pertanian	1993-1996
UNIB	Dir. Eksekutif LPIU DUE Project	1997-2000
Fak Pertanian UNIB	Peneliti Utama Hibah Bersaing V	1996/97 – 2000/01
FAO Indonesia	Konsultan Nasional	1998
Fak Pertanian UNIB	Dekan	2000-2004
Fak Pertanian UNIB	Peneliti Utama Riset Unggulan Terpadu XI	2004-2005

d. Daftar publikasi yang relevan dengan proposal

- Changes in soil properties due to coal mining activities in Bengkulu.
In Prosiding International Symposium on Asia Tropical Rain Forest Management, December 9-11, Pusrehut, UNMUL, Samarinda.
- Possible agricultural uses of coal-mine soils in Bengkulu
In Prosiding Internationla Seminar Toward Sustainable Agriculture in

Humid Tropics Facing 21st Century. Bandar Lampung, Indonesia, September 27-28, 1999.

3. Pemanfaatan sumberdaya biologis local untuk pengendalian pasif air asam tambang: Lahan Basah Buatan. Makalah disampaikan pada Seminar Nasional “*Rehabilitasi Lahan Bekas Tambang Menuju Pemanfaatan Lahan yang Berkelanjutan*” diselenggarakan oleh Pusat Kajian Rehabilitas Lahan Tambang, (PKRLT) Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 11 Maret 2006. (*in press*)

Tabel Lampiran 1. Hasil pengukuran sifat limbah organik (perlakuan limbah organik dalam air suling)

No.	Perlakuan	01-Sep-07						07-Sep-07						14-Sep-07						30-Sep-07						
		pH	Eh* (mV)	Eh ref mV	Eh s mV	DHL uS/cm	pH	Eh* (mV)	Eh ref mV	Eh s mV	DHL uS/cm	pH	Eh* (mV)	Eh ref mV	Eh s mV	DHL uS/cm	pH	Eh* (mV)	Eh ref mV	Eh s mV	DHL uS/cm	pH	Eh* (mV)	Eh ref mV	Eh s mV	DHL uS/cm
1.	KK(0)1	5.27	71	222	293	680	6.19	-220	222	2	694	6.04	-149	222	73	587	6.43	-134	222	88	670	6.43	-134	222	88	670
2.	KK(0)2	5.35	64	222	286	635	6.24	-216	222	6	696	6.51	-142	222	80	572	6.45	-100	222	122	640	6.45	-100	222	122	640
3.	KK(0)3	5.09	78	222	300	745	6.09	-211	222	11	711	6.63	-164	222	58	570	6.35	-82	222	140	500	6.35	-82	222	140	500
4.	KK(0)4	5.36	71	222	293	776	6.10	-182	222	40	708	6.48	-153	222	69	547	6.70	-90	222	132	590	6.70	-90	222	132	590
5.	KmKK(0)1	7.69	-185	222	37	1800	7.32	-319	222	-97	4230	7.36	-344	222	-122	4960	7.55	-258	222	-36	5080	7.55	-258	222	-36	5080
6.	KmKK(0)2	7.95	-308	222	-86	1861	7.39	-318	222	-96	4450	7.71	-311	222	-89	4930	7.57	-89	222	133	4080	7.57	-89	222	133	4080
7.	KmKK(0)3	8.00	-296	222	-74	1813	7.54	-320	222	-98	4060	7.73	-306	222	-84	4660	7.61	-85	222	137	4560	7.61	-85	222	137	4560
8.	KmKK(0)4	7.95	-300	222	-78	1770	7.53	-328	222	-106	4180	7.30	-324	222	-102	4720	7.58	-102	222	120	4120	7.58	-102	222	120	4120
9.	KmLK(0)1	7.46	-99	222	123	1500	7.68	-172	222	50	5770	7.71	-62	222	160	3960	7.92	-46	222	176	3730	7.92	-46	222	176	3730
10.	KmLK(0)2	7.69	-162	222	60	1055	7.84	-265	222	-43	3790	7.77	-64	222	158	4110	8.00	-49	222	173	3330	8.00	-49	222	173	3330
11.	KmLK(0)3	7.83	-228	222	-6	1041	7.80	-269	222	-47	3620	7.79	-59	222	163	4001	7.64	-25	222	197	3680	7.64	-25	222	197	3680
12.	KmLK(0)4	7.83	-172	222	50	1104	7.77	-283	222	-61	3590	7.75	-55	222	167	4000	7.96	-32	222	190	3640	7.96	-32	222	190	3640
13.	JS(0)1	7.16	-342	222	-120	1125	6.40	-250	222	-28	6580	5.90	-255	222	-33	5700	7.08	-310	222	-88	10890	7.08	-310	222	-88	10890
14.	JS(0)2	6.98	-338	222	-116	1097	6.68	-280	222	-58	7310	5.63	-244	222	-22	5600	7.21	-280	222	-58	11830	7.21	-280	222	-58	11830
15.	JS(0)3	6.94	-338	222	-116	1175	6.36	-242	222	-20	7780	6.01	-276	222	-54	5450	6.90	-305	222	-83	10920	6.90	-305	222	-83	10920
16.	JS(0)4	7.20	-349	222	-127	1099	6.39	-282	222	-60	6830	5.64	-261	222	-39	5550	7.19	-313	222	-91	10630	7.19	-313	222	-91	10630
17.	KmJS(0)1	6.88	-243	222	-21	1510	7.30	-217	222	5	8500	6.89	-234	222	-12	6120	6.80	-230	222	-8	6370	6.80	-230	222	-8	6370
18.	KmJS(0)2	7.00	-283	222	-61	1114	6.90	-163	222	59	4490	6.54	-219	222	3	4660	6.99	-244	222	-22	5590	6.99	-244	222	-22	5590
19.	KmJS(0)3	6.88	-254	222	-32	1199	6.95	-134	222	88	4590	5.90	-191	222	31	4440	6.95	-201	222	21	4750	6.95	-201	222	21	4750
20.	KmJS(0)4	6.80	-280	222	-58	1224	6.84	-167	222	55	4480	5.77	-199	222	23	4110	7.08	-208	222	14	5580	7.08	-208	222	14	5580
21.	KmLS(0)1	5.81	-279	222	-57	3440	5.86	-301	222	-79	3680	6.34	-332	222	-110	7850	6.66	-273	222	-51	8010	6.66	-273	222	-51	8010
22.	KmLS(0)2	5.50	-247	222	-25	1543	5.93	-280	222	-58	6160	5.51	-230	222	-8	5670	6.68	-200	222	22	10020	6.68	-200	222	22	10020
23.	KmLS(0)3	5.71	-250	222	-28	1549	5.64	-261	222	-39	5550	5.69	-208	222	14	5900	6.71	-254	222	-32	9550	6.71	-254	222	-32	9550
24.	KmLS(0)4	5.84	-258	222	-36	1665	5.83	-268	222	-46	5960	5.77	-217	222	5	5220	6.65	-258	222	-36	9540	6.65	-258	222	-36	9540
25.	AB(0)1	7.88	29	222	251	340	8.03	-24	222	198	510	7.88	-57	222	165	520	8.05	22	222	244	610	8.05	22	222	244	610
26.	AB(0)2	7.54	40	222	262	435	7.99	-73	222	149	678	8.24	-71	222	151	664	8.34	-42	222	180	640	8.34	-42	222	180	640
27.	AB(0)3	7.64	52	222	274	436	8.23	-81	222	141	667	8.23	-78	222	144	620	8.40	-31	222	191	640	8.40	-31	222	191	640
28.	AB(0)4	7.74	60	222	282	469	8.32	-94	222	128	657	8.43	-76	222	146	622	8.41	-38	222	184	600	8.41	-38	222	184	600
29.	SG(0)1	5.56	88	222	310	95	4.90	-102	222	120	123	6.15	-147	222	75	103	5.45	76	222	298	110	5.45	76	222	298	110
30.	SG(0)2	5.46	90	222	312	92	5.26	-107	222	115	120	5.50	-140	222	82	105	5.06	78	222	300	130	5.06	78	222	300	130
31.	SG(0)3	5.22	83	222	305	89	4.90	-111	222	111	131	5.76	-136	222	86	108	5.13	98	222	320	110	5.13	98	222	320	110

32.	SG(0)4	5.21	81	222	303	99	5.04	-122	222	100	127	5.38	-122	222	100	101	5.24	84	222	306	120
33.	PK(0)1	7.51	-392	222	-170	559	6.91	-387	222	-165	7790	6.87	-373	222	-151	9800	7.22	-356	222	-134	15130
34.	PK(0)2	7.61	-346	222	-124	583	6.91	-380	222	-158	6550	6.85	-369	222	-147	9600	7.33	-329	222	-107	14680
35.	PK(0)3	7.66	-394	222	-172	685	6.87	-386	222	-164	6980	6.90	-383	222	-161	9000	7.35	-350	222	-128	14140
36.	PK(0)4	7.03	-307	222	-85	703	6.88	-388	222	-166	7080	6.99	-382	222	-160	9560	7.45	-332	222	-110	1475

Keterangan: *) Eh baca

Tabel Lampiran 2. Hasil pengukuran sifat-sifat air asam tambang dengan perlakuan limbah organik

No.	Perlakuan	01-Sep-07					07-Sep-07					14-Sep-07					30-Sep-07				
		pH	Eh*) mV	Eh ref mV	Eh s mV	DHL (uS/cm)	pH	Eh*) mV	Eh ref mV	Eh s mV	DHL (uS/cm)	pH	Eh*) mV	Eh ref mV	Eh s mV	DHL (uS/cm)	pH	Eh*) mV	Eh ref mV	Eh s mV	DHL (uS/cm)
1.	KK(-)1	4.64	97	222	319	1935	5.37	-248	222	-26	1630	5.94	-148	222	74	1089	6.87	-202	222	20	860
2.	KK(-)2	4.71	101	222	323	1856	5.57	-256	222	-34	1570	6.17	-184	222	38	960	6.78	-177	222	45	830
3.	KK(-)3	4.84	115	222	337	1803	5.66	-217	222	5	1590	6.29	-183	222	39	915	6.84	-189	222	33	770
4.	KK(-)4	4.83	109	222	331	1842	5.61	-209	222	13	1680	6.25	-157	222	65	1042	6.95	-229	222	-7	800
5.	KmKK(-)1	7.60	-154	222	68	1686	7.43	-319	222	-97	1640	7.35	-322	222	100	2850	7.80	-123	222	99	3700
6.	KmKK(-)2	7.68	-146	222	76	1595	7.48	-322	222	100	2250	7.38	-306	222	-84	2130	7.78	-118	222	104	4010
7.	KmKK(-)3	7.65	-163	222	59	1658	7.54	-312	222	-90	2270	7.35	-319	222	-97	2530	7.70	-237	222	-15	1980
8.	KmKK(-)4	7.53	-140	222	82	1659	7.56	-267	222	-45	2150	7.38	-307	222	-85	2640	7.76	-148	222	74	1970
9.	KmLK(-)1	7.36	-72	222	150	1990	7.75	-255	222	-33	2340	7.69	-103	222	119	2160	7.85	-68	222	154	4080
10.	KmLK(-)2	7.42	-69	222	153	1577	7.69	-260	222	-38	2080	7.62	-83	222	139	2720	7.77	-51	222	171	4010
11.	KmLK(-)3	7.39	-63	222	159	1681	7.65	-262	222	-40	2300	7.62	-97	222	125	2490	7.43	-24	222	198	4480
12.	KmLK(-)4	7.35	-74	222	148	1504	7.72	-276	222	-54	2120	7.69	-89	222	133	2680	7.84	-33	222	189	4460
13.	JS(-)1	7.09	-279	222	-57	1875	6.05	-316	222	-94	2800	6.23	-321	222	-99	2520	6.53	-305	222	-83	14670
14.	JS(-)2	7.15	-340	222	-118	1830	6.20	-320	222	-98	2770	5.82	-308	222	-86	2580	6.76	-340	222	-118	14520
15.	JS(-)3	7.17	-353	222	-131	1822	6.32	-326	222	104	3240	6.44	-334	222	112	2000	6.68	-335	222	-113	12030
16.	JS(-)4	7.10	-355	222	-133	1840	6.20	-314	222	-92	3120	5.51	-313	222	-91	2820	6.94	-355	222	-133	10200
17.	KmJS(-)1	6.49	-185	222	37	1849	6.44	-321	222	-99	2300	6.65	-320	222	-98	1886	7.01	-288	222	-66	2380
18.	KmJS(-)2	6.38	-197	222	25	1975	6.62	-339	222	117	2610	6.33	-305	222	-83	1892	6.95	-307	222	-85	1570
19.	KmJS(-)3	6.71	-254	222	-32	1927	6.17	-323	222	101	2310	6.76	-317	222	-95	1891	6.88	-298	222	-76	5330
20.	KmJS(-)4	6.32	-236	222	-14	1868	6.07	-310	222	-88	2290	6.26	-319	222	-97	1825	6.87	-296	222	-74	4790
21.	KmLS(-)1	5.50	-379	222	-157	1538	5.87	-295	222	-73	3410	5.52	-301	222	-79	3450	5.58	-227	222	-5	12840
22.	KmLS(-)2	5.43	-342	222	-120	1392	5.75	-300	222	-78	2880	5.66	-285	222	-63	3430	5.55	-262	222	-40	11890
23.	KmLS(-)3	5.53	-301	222	-79	1493	5.64	-286	222	-64	3140	5.82	-276	222	-54	3730	6.64	-283	222	-61	10520
24.	KmLS(-)4	5.73	-320	222	-98	1588	5.60	-266	222	-44	3680	5.96	-288	222	-66	3560	6.74	-198	222	24	10030
25.	AB(-)1	6.00	81	222	303	1342	7.81	-125	222	97	1770	7.80	-74	222	148	1575	7.74	-52	222	170	1690
26.	AB(-)2	6.38	87	222	309	1567	7.72	-143	222	79	1710	7.52	-62	222	160	1668	8.08	-34	222	188	1650
27.	AB(-)3	6.69	89	222	311	1554	7.89	-105	222	117	1700	7.94	-64	222	158	1577	8.21	-34	222	188	1680
28.	AB(-)4	6.66	107	222	329	1500	7.30	-121	222	101	1780	8.01	-59	222	163	1550	8.21	-32	222	190	1670

29.	SG(-)1	3.73	189	222	411	1112	4.02	-86	222	136	1170	4.49	-185	222	37	549	6.14	-156	222	66	230
30.	SG(-)2	3.69	199	222	421	1208	4.20	-104	222	118	1130	4.66	-178	222	44	436	5.84	-140	222	82	230
31.	SG(-)3	3.75	199	222	421	1250	4.29	-95	222	127	1150	4.36	-169	222	53	553	5.80	-139	222	83	220
32.	SG(-)4	3.89	203	222	425	1301	4.13	-83	222	139	1110	4.59	-175	222	47	480	5.69	-160	222	62	240
33.	PK(-)1	7.46	-360	222	-138	1754	6.87	-389	222	-	8540	7.08	-378	222	156	12270	7.46	-375	222	-153	11920
34.	PK(-)2	7.47	-354	222	-132	1733	6.77	-385	222	-	8470	6.82	-379	222	157	12870	7.32	-395	222	-173	13420
35.	PK(-)3	7.52	-376	222	-154	1786	6.86	-383	222	-	8100	6.88	-375	222	153	12500	7.30	-394	222	-172	16090
36.	PK(-)4	7.46	-334	222	-112	1734	6.75	-391	222	-	9970	6.95	-374	222	152	12300	7.26	-380	222	-158	16390

Keterangan: *) Eh baca

Tabel Lampiran 3. Hasil analisis laboratorium kadar besi dan sulfat larut dalam air asam tambang setelah perlakuan dengan limbah organik pada pengukuran tanggal 1, 7, 14, dan 30 September 2007

Nomor Contoh			Air Bebas Lumpur	
			Fe	SO ₄
Urut	Laboratorium	Pengirim	----- mg/L -----	
01-Sep-07			Kode	
1	A. 649	KK(-)d1	0,65	370
2	650	KK(-)d2	0,65	360
3	651	KK(-)d3	1,31	345
4	652	KK(-)d4	1,78	330
5	653	KmKK(-)d1	0,19	522
6	654	KmKK(-)d2	0,21	503
7	655	KmKK(-)d3	0,22	493
8	656	KmKK(-)d4	0,22	512
9	657	KmLK(-)d1	0,18	414
10	658	KmLK(-)d2	0,13	409
11	659	KmLK(-)d3	0,16	434
12	660	KmLK(-)d4	0,16	443
13	661	JS(-)d1	3,09	370
14	662	JS(-)d2	3,25	365
15	663	JS(-)d3	3,50	399
16	664	JS(-)d4	4,37	463
17	665	KmJS(-)K1	2,64	207
18	666	KmJS(-)K2	1,73	256
19	667	KmJS(-)K3	2,47	296
20	668	KmJS(-)K4	2,35	128
21	669	KmLS(-)d1	12,56	532

22	670	KmLS(-)d2	24,71	222
23	671	KmLS(-)d3	20,93	355
24	672	KmLS(-)d4	23,27	409
25	673	AB(-)d1	0,82	355
26	674	AB(-)d2	1,52	330
27	675	AB(-)d3	1,19	370
28	676	AB(-)d4	1,07	365
29	677	SG(-)d1	1,28	291
30	678	SG(-)d2	1,19	281
31	679	SG(-)d3	1,40	281
32	680	SG(-)d4	1,24	281
33	681	PK(-)d1	5,40	493
34	682	PK(-)d2	5,64	514
35	683	PK(-)d3	5,52	455
36	684	PK(-)d4	6,63	526

Nomor Contoh			Air Bebas Lumpur	
			Fe	SO ₄
Urut	Laboratorium	Pengirim	----- mg/L -----	
	07-Sep-07	Kode		
1	A. 721	KK(-)d1	0,35	530
2	722	KK(-)d2	0,39	604
3	723	KK(-)d3	0,61	520
4	724	KK(-)d4	0,72	491
5	725	KmKK(-)d1	0,11	864
6	726	KmKK(-)d2	0,16	962
7	727	KmKK(-)d3	0,11	830
8	728	KmKK(-)d4	0,11	1016

9	729	KmLK(-)d1	0,03	1384
10	730	KmLK(-)d2	0,07	1424
11	731	KmLK(-)d3	0,00	1483
12	732	KmLK(-)d4	0,03	1488
13	733	JS(-)d1	4,03	412
14	734	JS(-)d2	3,72	442
15	735	JS(-)d3	3,92	471
16	736	JS(-)d4	3,20	619
17	737	KmJS(-)K1	2,32	334
18	738	KmJS(-)K2	2,03	265
19	739	KmJS(-)K3	2,40	255
20	740	KmJS(-)K4	1,97	295
21	741	KmLS(-)d1	5,62	1031
22	742	KmLS(-)d2	97,36	903
23	743	KmLS(-)d3	10,96	1090
24	744	KmLS(-)d4	6,61	1178
25	745	AB(-)d1	0,04	967
26	746	AB(-)d2	0,00	918
27	747	AB(-)d3	0,04	987
28	748	AB(-)d4	0,00	967
29	749	SG(-)d1	0,53	569
30	750	SG(-)d2	0,46	569
31	751	SG(-)d3	0,72	560
32	752	SG(-)d4	0,60	589
33	753	PK(-)d1	3,88	1738
34	754	PK(-)d2	3,88	1404

35	755	PK(-)d3	4,30	1640
36	756	PK(-)d4	4,31	1581

Nomor Contoh			Air Bebas Lumpur	
Urut	Laboratorium	Pengirim	Fe	SO ₄
			----- mg/L -----	
	14-Sep-07	Kode		
1	A. 796	KK(-)d1	0,37	171
2	797	KK(-)d2	0,26	229
3	798	KK(-)d3	0,38	88
4	799	KK(-)d4	0,61	29
5	800	KmKK(-)d1	0,17	346
6	801	KmKK(-)d2	0,94	449
7	802	KmKK(-)d3	0,30	78
8	803	KmKK(-)d4	0,35	127
9	804	KmLK(-)d1	0,28	1405
10	805	KmLK(-)d2	0,77	1352
11	806	KmLK(-)d3	0,30	1425
12	807	KmLK(-)d4	0,33	1488
13	808	JS(-)d1	4,90	507
14	809	JS(-)d2	2,92	420
15	810	JS(-)d3	3,87	429
16	811	JS(-)d4	3,25	546
17	812	KmJS(-)d1	3,11	254
18	813	KmJS(-)d2	1,26	244
19	814	KmJS(-)d3	2,21	234
20	815	KmJS(-)d4	1,94	312
21	816	KmLS(-)d1	44,21	1200

22	817	KmLS(-)d2	7,95	527
23	818	KmLS(-)d3	9,03	683
24	819	KmLS(-)d4	60,44	1083
25	820	AB(-)d1	0,07	893
26	821	AB(-)d2	0,04	888
27	822	AB(-)d3	0,10	864
28	823	AB(-)d4	0,09	864
29	824	SG(-)d1	0,51	156
30	825	SG(-)d2	0,65	259
31	826	SG(-)d3	0,39	346
32	827	SG(-)d4	1,17	49
33	828	PK(-)d1	3,78	800
34	829	PK(-)d2	4,43	703
35	830	PK(-)d3	3,58	605
36	831	PK(-)d4	3,87	810

Nomor Contoh			Air Bebas Lumpur	
Urut	Laboratorium	Pengirim	Fe	SO ₄
			----- mg/L -----	
	30-Sep-07	Kode		
1	A. 934	KK(-)d1	0,50	14
2	935	KK(-)d2	0.60	19
3	936	KK(-)d3	0.83	19
4	937	KK(-)d4	1,11	22
5	938	KmKK(-)d1	0,41	13
6	939	KmKK(-)d2	0,86	20
7	940	KmKK(-)d3	0,69	25
8	941	KmKK(-)d4	0,56	20
9	942	KmLK(-)d1	0,06	981
10	943	KmLK(-)d2	0,12	801
11	944	KmLK(-)d3	0,08	1041
12	945	KmLK(-)d4	0,05	1139
13	946	JS(-)d1	3,04	185
14	947	JS(-)d2	3,19	240
15	948	JS(-)d3	4,41	436
16	949	JS(-)d4	6,93	523
17	950	KmJS(-)d1	2,70	294
18	951	KmJS(-)d2	1,79	240
19	952	KmJS(-)d3	2,50	240
20	953	KmJS(-)d4	2,12	262
21	954	KmLS(-)d1	3,24	185
22	955	KmLS(-)d2	6,19	272
23	956	KmLS(-)d3	9,04	240

24	957	KmLS(-)d4	4,51	163
25	958	AB(-)d1	0,06	856
26	959	AB(-)d2	0,00	861
27	960	AB(-)d3	0,01	883
28	961	AB(-)d4	0,03	845
29	962	SG(-)d1	1,01	38
30	963	SG(-)d2	0,78	38
31	964	SG(-)d3	0,71	44
32	965	SG(-)d4	0,85	38
33	966	PK(-)d1	4,64	730
34	967	PK(-)d2	6,49	643
35	968	PK(-)d3	4,79	621
36	969	PK(-)d4	5,82	774