

Pengaruh Aerasi Tanah Sulfat Masam Potensial Terhadap Pelepasan SO_4^{2-} , Fe^{2+} , H^+ , dan Al^{3+}

The Aeration Effect of Potential Acid Sulfate Soil in Releasing SO_4^{2-} , Fe^{2+} , H^+ and Al^{3+}

Yuli Lestari*¹, Azwar Ma'as², Benito Heru Purwanto², Sri Nuryani Hidayah Utami²

¹ Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa (BALITTRA), Jl. Kebun Karet, Lok Tabat Kotak Pos 31. Banjarbaru 70712, Kalimantan Selatan

² Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada Jl. Flora, Bulaksumur, Yogyakarta 55281, D.I. Yogyakarta

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diterima: 16 November 2015

Direview: 27 November 2015

Disetujui: 26 Maret 2016

Katakunci:

Tanah sulfat masam potensial
Aerasi
Pirit
Pelindian

Keywords:

Potential acid sulfate soil
Aeration
Pyrite
Leaching

Abstrak. Tanah sulfat masam potensial dicirikan oleh adanya lapisan pirit (FeS_2) pada kedalaman 0-50 cm yang stabil pada kondisi anaerobik. Pada kondisi aerobik pirit tersebut teroksidasi menghasilkan kemasaman yang tinggi. Percepatan penurunan kadar pirit melalui proses oksidasi yang dilanjutkan dengan pelindian asam yang dihasilkan. Penelitian ini bertujuan untuk mengukur penurunan kadar pirit sejalan dengan pelepasan SO_4^{2-} , Fe^{2+} , H^+ dan Al^{3+} akibat aerasi tanah sulfat masam potensial. Penelitian dilaksanakan di laboratorium tanah pada bulan September hingga Desember 2013 menggunakan Rancangan Acak Lengkap yang disusun secara faktorial dengan 3 ulangan. Faktor I adalah tingkat aerasi: (a) kontrol/tanpa aerasi (tinggi muka air 1 cm), (b) aerasi dengan pengeringan selama 2 hari pada suhu 45°C , dan (c) aerasi dengan pengeringan selama 4 hari pada suhu 45°C . Faktor II adalah kadar pirit: (i) 0,70 %, (ii) 1,96 % dan (iii) 4,39 % yang diambil dari contoh tanah langsung di lapangan. Kadar SO_4^{2-} , Fe^{2+} , H^+ dan Al^{3+} yang terlepas diamati setiap minggu sebanyak 8 kali, sedangkan penurunan kadar pirit diamati pada akhir penelitian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin lama pengeringan dan semakin tinggi kadar pirit awal maka semakin banyak SO_4^{2-} , Fe^{2+} , sumber kemasaman (H^+ , dan Al^{3+}) yang dihasilkan. Konsentrasi SO_4^{2-} , Fe^{2+} , H^+ , dan Al^{3+} paling banyak dilepaskan adalah 49,68 $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$, 7,33 $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$, 29,97 $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ dan 40,66 $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ diperoleh pada perlakuan aerasi dengan pengeringan selama 4 hari pada 45°C dan kadar pirit 4,39 %. Ini sejalan dengan penurunan kadar pirit sebesar 2,08 % (47,45 % dari kadar pirit awal). Bila kadar pirit rendah (0,7 %), selama 8 kali ekstraksi terjadi penurunan sangat sedikit dengan variasi 0,64-0,67 % yang tidak berbeda nyata antar perlakuan aerasi. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan aerasi dengan pengeringan dapat mempercepat oksidasi pirit bila dilanjutkan dengan pelindian untuk membuang produk oksidasi pada kadar pirit yang cukup tinggi (4,39 %).

Abstract. Potential acid sulfate soils are characterized by the presence of pyrite (FeS_2) at a depth of 0-50 cm, that is stable in anerobic condition. In aerobic condition the pyrite is oxidised and causing acidity. Efforts to accelerate the oxidation of pyrite and followed by the leaching of acids is the target of this experiment. This study was aimed to observe the release of SO_4^{2-} , Fe^{2+} , H^+ and Al^{3+} and the decrease of pyrite content. The research was conducted at a soil laboratory from September until December 2013 arranged in a factorial completely randomized design with three replications. The first factor was the degree of aeration, namely: (a) control (saturated with 1 cm of water above soil surface); (b) aeration by drying for 2 days at 45°C ; and (c) aeration by drying for 4 days at 45°C . The second factor was the concentration of pyrite; (i) 0.70 %, (ii) 1.96 % and (iii) 4.39 %. Soluble concentration of SO_4^{2-} , Fe^{2+} , H^+ and Al^{3+} were observed every week for 8 times, while the the levels of pyrite was observed at the end of the study. The results show that the sources of acidity (H^+ and Al^{3+}), SO_4^{2-} , and Fe^{2+} increased with the length of drying time and the initial concentration of pyrite. The highest concentration of SO_4^{2-} , Fe^{2+} , H^+ , and Al^{3+} released were 49.68 $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$, 7.33 $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$, 29.97 $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ and 40.66 $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. The decline of initial pyrite content was 47.45 % under the 4 day drying of 4.39 % pyrite content treatment. Under the low pyrite contents (0.7 %), the acidity decrease was not significantly different among treatments with a variation of 0.64-0.67 %. This suggests that aeration by drying speeds up of the pyrite oxidation if followed by leaching at the high pyrite contents (4.39 %).

Pendahuluan

Tanah sulfat masam adalah istilah umum tanah/sedimen yang mengandung besi sulfida (pirit) (Manders *et al.* 2002). Menurut Powell dan Ahern (2000), bahwa tanah sulfat masam yang mengandung pirit belum teroksidasi disebut tanah sulfat masam potensial tetapi apabila pirit telah teroksidasi sehingga menghasilkan asam sulfat disebut tanah sulfat masam aktual. Di Indonesia, jenis

tanah ini terutama tersebar di empat pulau besar yaitu Kalimantan, Sumatera, Sulawesi dan Papua (Tim Sintesis Kebijakan, 2008) yang luasnya mencapai 6,71 ha sehingga mempunyai potensi yang besar untuk dikembangkan menjadi lahan pertanian.

Pemanfaatan tanah sulfat masam untuk tanaman non padi menghadapi kendala seperti rendahnya pH tanah (<3.5), keracunan aluminium (Shamshuddin *et al.* 2004), rendahnya basa-basa dapat dipertukarkan seperti K-dd,

*Corresponding author: Email: yulibalitra70@yahoo.com

Na-dd, dan Ca-dd dan rendahnya ketersediaan fosfor (Najib dan Haerani, 2008). Demikian juga untuk budidaya padi sawah produksinya juga rendah karena keracunan ion besi fero (Suswanto *et al.* 2007) dan kahat hara P (Purnomo *et al.* 2005; Hayati, 2013). Permasalahan-permasalahan tersebut di atas, terjadi karena pirit yang terkandung dalam tanah sulfat masam terpapar ke udara dan mengalami oksidasi. Oksidasi satu mol pirit oleh O_2 menghasilkan 2 mol H^+ , 1 mol Fe^{2+} dan 2 mol SO_4^{2-} , namun apabila Fe^{3+} yang bertindak sebagai oksidator maka akan dibebaskan 16 mol H^+ , 15 mol Fe^{2+} dan 2 mol SO_4^{2-} (van Breemen, 1973). Adanya ion H^+ yang terikat dengan sulfat merupakan asam kuat yang mampu menghancurkan silikat dengan menghasilkan Al^{3+} .

Kandungan pirit di tanah rawa pasang surut umumnya sekitar 0-5% (Subagyo, 2006). Bila keberadaan pirit pada lapisan olah cukup tinggi akan dapat membatasi pemanfaatan lahan rawa untuk pertanian karena merupakan sumber pemasaman, yang memerlukan amelioran cukup banyak sehingga tidak ekonomis lagi. Secara teoritis kandungan pirit 1% di zona perakaran menghasilkan kemasaman tanah lebih dari 30 me yang berarti kebutuhan bahan penetral (misalnya kapur) > 40 ton/ha (Maas, 2003).

Kadar pirit yang tinggi umumnya reaktif. Bila mengalami pengeringan dan pembasahan yang diikuti oleh pelindian, akan melindi asam yang sangat tinggi di awal dan menurun dengan waktu (Ma'as, 1989; Lapako dan Antonson, 2006). Sebaliknya semakin rendah kadar pirit akan semakin kecil perannya dalam pemasaman tanah. Walaupun kandungan pirit menurun dengan waktu setelah proses pengeringan dan pembasahan, namun karena kondisi lahan yang selalu berair maka pengurangan kandungan pirit berjalan lambat (Maas, 2000).

Oleh karena itu untuk mengurangi potensi kemasaman yang ditimbulkan akibat dari oksidasi pirit adalah menurunkan kadar pirit melalui percepatan oksidasi. Percepatan oksidasi pirit dapat dilaksanakan dengan menurunkan kelengasan tanah untuk peningkatan aerasi (sirkulasi udara), pelindian berkesinambungan dan pengulangan kondisi basah-kering secara berkelanjutan (Maas, 2000). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh aerasi pada tanah sulfat masam potensial yang mempunyai kadar pirit berbeda terhadap pelepasan SO_4^{2-} , Fe^{2+} , H^+ dan Al^{3+} serta penurunan kadar pirit.

Bahan dan Metode

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Tanah, Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa (BALITTRA),

Banjarbaru pada bulan September hingga Desember 2013.

Tanah sulfat masam potensial yang digunakan pada penelitian dipilih dari 24 contoh yang diambil dari 10 lokasi di Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah serta telah diuji di lapangan dan di laboratorium. Pengujian di lapangan diawali dengan mengambil contoh tanah menggunakan bor Belgie, kemudian setiap lapisan ditetesi H_2O_2 30%. Apabila terbentuk buih yang merupakan indikator adanya bahan sulfidik (pirit), maka masing-masing lapisan tanah dilanjutkan analisis laboratorium. Berdasarkan hasil analisis kadar pirit di Laboratorium maka ditetapkan tanah yang digunakan pada penelitian ini diambil dari Kebun Percobaan (KP) Belandean, Desa Tanjung Harapan, Kecamatan Alalak Kabupaten Barito Kuala pada koordinat S 03°17'01,46"; E 114°60'19,9", Desa Handil Maluka, Kecamatan Bumi Makmur, Kabupaten Tanah Laut pada S 03° 34'38,1", E 114° 35' 54,6", dan Desa Jelapat, Kecamatan Tamban, Kabupaten Barito Kuala pada S 03° 14' 16,1", E 114° 31' 02" masing-masing diambil pada kedalaman 30-40 cm, 70-100 cm dan 35-65 cm. Percobaan ini menggunakan Rancangan Acak Lengkap yang disusun secara faktorial dengan 3 ulangan. Perlakuan terdiri dari dua faktor. Faktor I adalah tingkat aerasi yaitu (a) kontrol/tanpa aerasi (tinggi muka air 1 cm di atas permukaan tanah), (b) aerasi dengan pengeringan selama 2 hari pada 45°C, dan (c) aerasi dengan pengeringan selama 4 hari pada 45°C. Faktor II adalah kadar pirit: 0,70% (rendah), 1,96% (sedang) dan 4,39% (tinggi). Jumlah keseluruhan perlakuan adalah 3x3x3=27 unit.

Percobaan diawali dengan menimbang masing-masing contoh tanah sebanyak 8 gram, kemudian dimasukkan ke dalam tabung sentrifus berukuran 10 ml. Untuk mendapatkan jumlah contoh air dan tanah yang cukup untuk analisis maka setiap ulangan terdiri dari 4 tabung (tanah 32 g). Pada perlakuan kontrol/tanpa aerasi, ditambah akuades sampai tinggi muka air 1 cm diatas permukaan tanah, sedangkan pada perlakuan aerasi dengan pengeringan menggunakan oven pada 45°C selama 2 hari atau 4 hari. Inkubasi dilakukan pada suhu ruang. Pelindian dilakukan setiap minggu sebanyak 8 kali. Mula-mula setiap tabung sentrifus ditambah air akuades dengan perbandingan tanah dan air 1:2,5 kemudian digojok menggunakan shaker dengan kecepatan 180 rpm (Noor, 2004) selama 1 jam (Rhoades, 1982) lalu disentrifus selama 10 menit. Setelah dilakukan pelindian sisa tanah dibuat kondisi seperti semula yaitu menambahkan air akuades sampai tinggi muka air 1 cm di atas permukaan tanah pada perlakuan tanpa aerasi, dan pengeringan menggunakan oven pada suhu 45°C selama 2 dan 4 hari

untuk perlakuan aerasi kemudian diinkubasi pada suhu ruang.

Pengamatan terhadap air lindian (supernatan) yang dilakukan setiap minggu selama 8 minggu meliputi; pH, DHL, SO_4^{2-} , Fe^{2+} , H^+ , Al^{3+} terlarut dan kadar pirit tanah setelah pelindian. Analisis pH menggunakan pH meter HORIBA elektroda gelas Model 9625 dan analisis DHL menggunakan DHL-meter WTW elektroda gelas Model Cond 3110. SO_4^{2-} diukur menggunakan spektrofotometer Model Spectronic 20 ($\lambda=432$ nm) dan Fe^{2+} diukur menggunakan Atomic Absorption Spectrometer Model GBC 933 plus. Analisis H^+ dan Al^{3+} dengan titrasi.

Analisis data meliputi analisis sidik ragam (ANOVA) untuk mengetahui pengaruh perlakuan, kemudian dilanjutkan dengan Uji Jarak Ganda Duncan terhadap perlakuan yang berpengaruh nyata menggunakan perangkat lunak SAS Portable 9.1.3.

Hasil dan Pembahasan

Sifat kimia tanah awal

Penelitian ini menggunakan tanah sulfat masam potensial yang kandungan piritnya tergolong Rendah (0,70%), Sedang (1,96%) dan Tinggi (4,39%) yang masing-masing diambil pada kedalaman 30-40 cm, 70-100 cm dan 35-65 cm mempunyai nilai pH berkisar 4,07-7,53 dalam suasana reduktif (Tabel 1). Berdasarkan Soil Survey Staff (2010), tanah sulfat masam potensial yang digunakan pada penelitian ini tergolong Typic Sulfaquent yang dicirikan dengan adanya bahan sulfidik pada kedalaman 0-50 cm dan pH >4. Tabel 1 menunjukkan bahwa tanah sulfat masam dengan kadar pirit yang tergolong sedang

dan tinggi, nilai DHL >1000 $\mu\text{mhos/cm}$ dan pH >4 diduga tanah tersebut mendapat susupan air laut (Utami *et al.* 2000). Terjadinya susupan air laut pada kedua tanah tersebut dapat dilihat dari dominasi kation Mg dan Na yang tergolong sangat tinggi yaitu >8 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ dan >1 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$. Kation asam yang dominan pada tanah sulfat masam yang tergolong rendah dan tinggi adalah Al^{3+} dan H^+ , sedangkan pada tanah sulfat masam yang tergolong sedang hanya didominasi ion H^+ . Menurut Havlin *et al.* (2005), bahwa aluminium menjadi sangat larut pada pH <5 dan semakin besar sejalan dengan semakin rendahnya pH. Pada pH >5 umumnya aluminium terjonjot menjadi $\text{Al}(\text{OH})_3$, terlihat pada pH 7,53 tidak dijumpai Al^{3+} (kadar pirit sedang).

Derajat Kemasaman (pH)

Kemasaman yang merupakan ciri tanah sulfat masam, disebabkan terutama oleh oksidasi pirit. Perlakuan aerasi dengan mengeringkan tanah sulfat masam potensial menyebabkan penurunan pH air lindian baik pada kadar pirit awal yang rendah, sedang maupun tinggi (Gambar 1 A, B dan C). Pada perlakuan tanpa aerasi, pH air lindian cenderung meningkat terus baik pada kadar pirit awal tergolong rendah, sedang dan tinggi. Pada umumnya aerasi dengan pengeringan selama 4 hari pada 45°C menyebabkan penurunan pH air lindian lebih besar dibandingkan aerasi dengan pengeringan selama 2 hari pada 45°C . Hal yang sama juga diperoleh pada penelitian Manders *et al.* (2002), yaitu pengeringan dan pembasahan tanah sulfat masam potensial menyebabkan turunnya pH tanah dan air tanah. Selanjutnya menurut Boyd (1995), bahwa turunnya pH tanah yang diakibatkan oleh

Tabel 1. Karakteristik tanah sulfat masam potensial yang digunakan dalam penelitian

Table 1. Characteristics of potential acid sulfate soil used in this experiment

Karakteristik	Kadar pirit		
	Rendah (0,7%)	Sedang (1,96%)	Tinggi (4,39%)
pH H ₂ O (lapangan)	4,07	7,53	4,81
pH KCl (lapangan)	3,60	5,86	4,14
DHL (μS)	0,44	2,39	1,57
C-organik (%)	9,43	3,92	10,88
Ca-tersedia ($\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$)	2,86	8,19	0,75
Mg-tersedia ($\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$)	5,12	24,71	8,84
K-tersedia ($\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$)	0,09	5,64	0,23
Na-tersedia ($\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$)	1,59	46,23	3,19
Al-dd ($\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$)	6,45	0	11,38
H-dd ($\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$)	0,86	2,45	4,39
Kadar pirit (%)	0,70	1,96	4,39

Keterangan: Tanah berkadar pirit rendah berasal dari KP Belandean pada kedalaman 30-40 cm, tanah berkadar pirit sedang berasal dari Desa Handil Maluka pada kedalaman 70-100 cm dan tanah berkadar pirit tinggi berasal dari Desa Jelapat pada kedalaman 35-65 cm.

meningkatnya produksi asam berkaitan dengan kadar pirit tanah sulfat masam potensial. Semakin tinggi kadar pirit tanah sulfat masam potensial, bila mengalami oksidasi-pelindian, kemasaman air lindiannya semakin meningkat (Kiswaloejo, 2002). Sebaliknya semakin rendah kadar pirit berarti semakin kecil perannya terhadap pemasaman tanah.

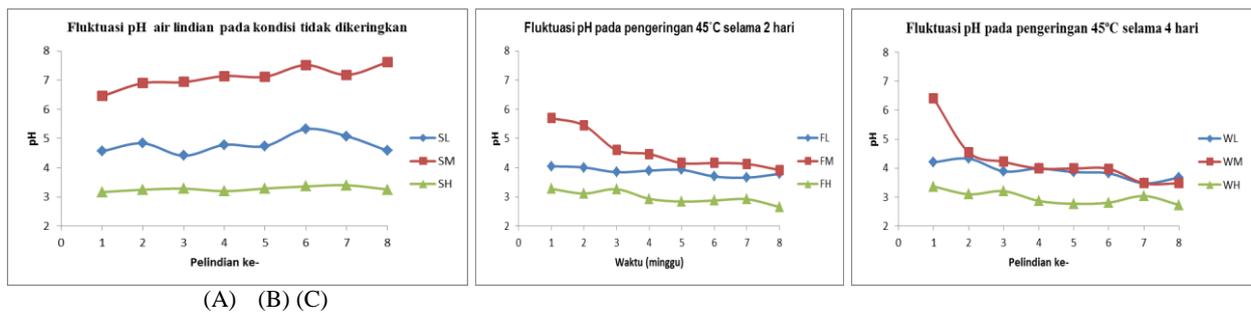
Daya hantar Listrik (DHL)

Pengaruh aerasi dengan pengeringan tanah sulfat masam potensial dengan kadar pirit rendah, sedang maupun tinggi terhadap DHL air lindiannya tersaji pada Gambar 2. Semakin tinggi kadar pirit pada perlakuan

aerasi yang sama maka DHL air lindiannya juga semakin tinggi. Hal ini disebabkan semakin tinggi kadar pirit maka apabila dikeringkan (teroksidasi) menghasilkan kemasaman yang semakin banyak sehingga pH tanah semakin rendah. Menurut Utami *et al.* (2000), bahwa semakin rendah pH maka semakin banyak ion H⁺ yang dapat menjadi penghantar listrik.

Pelepasan SO₄²⁻

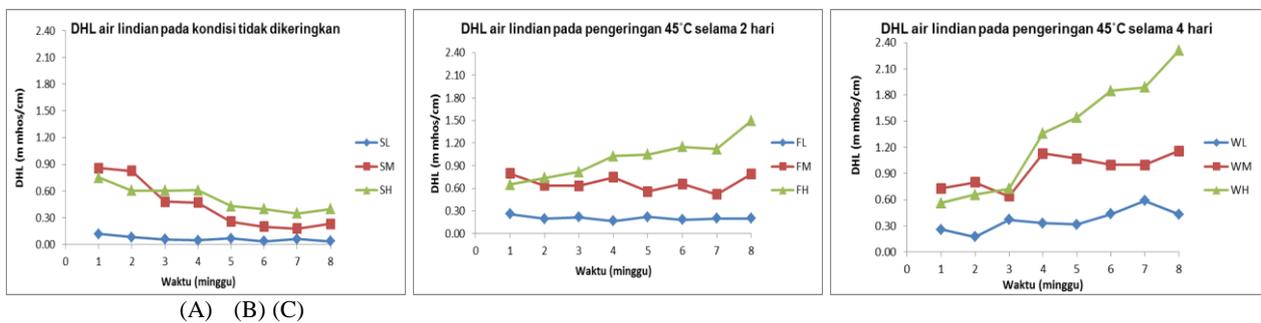
Tingkat aerasi, kadar pirit awal dan interaksinya berpengaruh sangat nyata terhadap pelepasan SO₄²⁻ (Tabel 2). Tabel 2 menunjukkan akumulasi sulfat yang terukur



Keterangan:
 S=Tidak dikeringkan L=Kadar pirit rendah (0,70%)
 F=Pengeringan selama 2 hari pada 45°C M=Kadar pirit sedang (1,96%)
 W=Pengeringan selama 4 hari pada 45°C H=Kadar pirit tinggi (4,39%)

Gambar 1. Pengaruh aerasi dengan pengeringan terhadap pH air lindiann dari berbagai kandungan pirit dalam tanah sulfat masam potensial (A=tanpa aerasi/tidak dikeringkan, B=aerasi dengan pengeringan 45°C selama 2 hari, C=aerasi dengan pengeringan pada 45°C selama 4 hari).

Figure 1. The effects of aeration by drying on leachate pH from various pyrite contents of potential acid sulfate soil (A = no aeration, B = aeration by drying for 2 days at 45°C, C = aeration by drying for 4 days at 45°C)



Keterangan:
 S=Tidak dikeringkan L=Kadar pirit rendah (0,70%)
 F=Pengeringan selama 2 hari pada 45°C M=Kadar pirit sedang (1,96%)
 W=Pengeringan selama 4 hari pada 45°C H=Kadar pirit tinggi (4,39%)

Gambar 2. Pengaruh aerasi dengan pengeringan terhadap DHL air lindiann dari berbagai kandungan pirit dalam tanah sulfat masam potensial (A=tanpa aerasi/tidak dikeringkan, B=aerasi dengan pengeringan 45°C selama 2 hari, C=aerasi dengan pengeringan pada 45°C selama 4 hari).

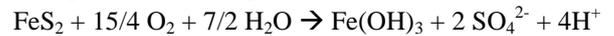
Figure 2. The effects of aeration by drying on electrical conductivity of leachate from various pyrite contents of potential acid sulfate soil (A=no aeration, B=aeration by drying for 2 days at 45°C, C=aeration by drying for 4 days at 45°C)

dari pelindian ke-1 sampai ke-8. Konsentrasi sulfat pada perlakuan aerasi dengan pengeringan selama 4 hari pada suhu 45°C, baik pada kadar pirit rendah (L), sedang (M) maupun tinggi (H), lebih tinggi dibandingkan pada aerasi dengan pengeringan selama 2 hari pada 45°C pada kadar pirit yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa semakin lama pengeringan maka ion SO₄²⁻ yang dilepaskan dari tanah sulfat masam semakin banyak. Penyebabnya adalah semakin lama pengeringan, maka lengas tanah semakin menurun sehingga aerasi menjadi lebih baik dan difusi oksigen semakin banyak. Menurut Indriati (1999) semakin banyak oksigen yang masuk ke dalam tanah, maka nilai potensial redoks (Eh) juga semakin meningkat. Pada nilai Eh >-100 maka pirit (besi sulfida) teroksidasi menjadi sulfat. Semakin meningkat flux oxygen maka laju oksidasi pirit juga semakin meningkat (Soil Water Conservation, 2006). Sebaliknya semakin rendah flux oksigen, laju oksidasi pirit menurun akibat meningkatnya kelengasan tanah karena difusi oksigen terhambat (Schmieder, *et al.* 2012).

Dari Tabel 2, juga terlihat bahwa semakin tinggi kadar pirit yang diuji, maka rata-rata akumulasi SO₄²⁻ terlarut (dalam air lindian) juga semakin banyak. Hasil yang sama juga diperoleh pada penelitian Lapako dan Antonson (2006), bahwa semakin tinggi kandungan sulfur (kadar pirit) maka jumlah sulfat yang dilepaskan setiap minggu juga semakin banyak. Rigby *et al.* (2006), yang meneliti kinetika reaksi oksidasi pirit *framboid* menunjukkan bahwa laju produksi sulfat pada percobaan yang menggunakan pirit dengan konsentrasi 1.44 g/l lebih besar dibandingkan pada konsentrasi pirit 0.48 g/l. Diduga semakin tinggi kadar pirit maka area spesifik dan reaktivitasnya semakin meningkat sehingga laju oksidasi pirit juga semakin meningkat. Akibatnya jumlah sulfat

yang dilepaskan semakin banyak yang pada gilirannya kandungan sulfat dalam air lindian konsentrasinya juga semakin tinggi.

Konsentrasi SO₄²⁻ paling besar diperoleh pada air lindian tanah sulfat masam potensial dengan kadar pirit yang tinggi dan aerasi dengan pengeringan selama 4 hari pada suhu 45°C yaitu 49,68 cmol(+).kg⁻¹. Menurut Maria *et al.* (2002), pirit stabil pada kondisi anaerobik, tetapi bila terpapar ke udara akan teroksidasi menjadi sulfat. Menurut van Breemen (1973), pembentukan SO₄²⁻ pada reaksi oksidasi pirit adalah sebagai berikut:



Dari persamaan tersebut terlihat bahwa SO₄²⁻ yang dihasilkan dari oksidasi pirit semakin banyak dengan meningkatnya kadar pirit dan pasokan oksigen (difusi oksigen dalam tanah). Setiap mol pirit yang teroksidasi dan 3.75 mol O₂ yang dikonsumsi (bereaksi) akan melepaskan 2 mol SO₄²⁻.

Pelepasan Fe²⁺

Besi (Fe) terlarut yang merupakan produk utama oksidasi pirit sangat nyata dipengaruhi oleh aerasi, kadar pirit awal dan interaksi antara kadar pirit awal dan aerasi tanah sulfat masam potensial (Tabel 3). Rata-rata kumulatif Fe terlarut, pada perlakuan tanpa aerasi tidak berbeda nyata dengan aerasi melalui pengeringan selama 2 hari pada 45°C. Namun keduanya berbeda nyata dibandingkan dengan perlakuan aerasi melalui pengeringan selama 4 hari pada 45°. Pada tanah sulfat masam potensial yang kadar pirit awalnya tergolong rendah (L), aerasi tidak berpengaruh terhadap akumulasi Fe²⁺ pada pelindian ke-1 sampai ke-8. Akumulasi Fe²⁺ pada tanah sulfat masam potensial yang tergolong sedang (M), pada perlakuan tanpa aerasi nyata lebih tinggi

Tabel 2. Pengaruh aerasi dengan pengeringan terhadap akumulasi SO₄²⁻ dari berbagai kandungan pirit dalam tanah sulfat masam potensial

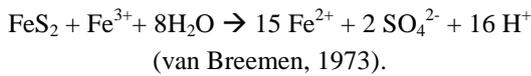
Table 2. The effects of aeration by drying on SO₄²⁻ accumulation from potential acid sulfate soils of various pyrite contents

Kadar pirit	Tingkat aerasi			Rata-rata
	Tanpa aerasi/tidak dikeringkan (S)	Pengeringan selama 2 hari pada 45°C (F)	Pengeringan selama 4 hari pada 45°C (W)	
	cmol(+).kg ⁻¹			
Rendah (0,70%)	4,89 g	9,46 f	15,17 e	9,84 C
Sedang (1,96%)	20,22 d	27,98 c	37,28 b	28,49 B
Tinggi (4,39%)	21,17 d	37,94 b	49,68 a	36,26 A
Rata-rata	15,43 R	25,12 Q	34,04 P	

Keterangan: Angka dalam 1 kolom dan baris yang diikuti huruf yang tidak sama berbeda sangat nyata menurut uji Duncan dengan tingkat kepercayaan 99%.

dibandingkan dengan perlakuan aerasi melalui pengeringan selama 2 hari dan 4 hari pada 45°C. Sebaliknya, pada tanah sulfat masam yang kadar pirit awalnya tergolong tinggi, aerasi dengan pengeringan selama 4 hari pada 45°C, menghasilkan besi terlarut nyata paling tinggi diikuti perlakuan aerasi dengan pengeringan selama 2 hari pada 45°C dan tanpa aerasi. Menurut Indrawati (2001) bahwa semakin tinggi kadar pirit awal dan semakin rendah lengas tanah (Tan, 1998) maka laju oksidasi pirit semakin cepat. Dengan demikian Fe yang terlarut semakin tinggi.

Berdasarkan hasil penelitian Lizama dan Suzuki (1989), yang meneliti laju oksidasi pirit dengan menggunakan *T. thiooxidan* dan tanpa *T. thiooxidan*, menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar pirit maka konsumsi oksigen per menit semakin meningkat. Berdasarkan hasil penelitian Lizama dan Suzuki (1989), yang meneliti laju oksidasi pirit dengan menggunakan oksidator Fe³⁺ pada kadar pirit yang berbeda, yaitu 0,625; 0,94; 1,25 dan 2,5% menunjukkan bahwa pada konsentrasi oksidator yang sama maka jumlah Fe²⁺ yang dilepaskan per menit berbeda, dimana semakin tinggi kadar pirit maka semakin banyak Fe²⁺ yang dilepaskan per menit. Hal ini sesuai dengan konsep suatu reaksi bahwa semakin meningkat konsentrasi reaktan yaitu kadar pirit dan besi feri (Fe³⁺) sebagai katalis (walaupun juga berfungsi sebagai reaktan) maka produk besi fero (Fe²⁺) juga semakin tinggi seperti reaksi berikut:



Pelepasan H⁺ dan Al³⁺

Kation H⁺ merupakan salah satu sumber pemasaman di tanah sulfat masam. Akumulasi ion H⁺ terlarut hasil

pelindian tanah sulfat masam sangat nyata dipengaruhi oleh aerasi, kadar pirit awal dan interaksi keduanya (Tabel 4). Rata-rata konsentrasi H⁺ terlarut tanah sulfat masam potensial dengan kadar pirit yang rendah tidak berbeda nyata dengan yang sedang. Sedangkan pada tanah sulfat masam potensial yang kadar piritnya tinggi, konsentrasi H⁺ yang dilepaskan lebih tinggi dibandingkan keduanya dan secara statistik berbeda nyata.

Konsentrasi H⁺ terakumulasi paling tinggi diperoleh pada kombinasi perlakuan kadar pirit awal yang tergolong tinggi (4,39%) dan aerasi dengan pengeringan selama 4 hari pada suhu 45°C yaitu 26,97 Cmol(+).kg⁻¹. Kenyataan ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar pirit awal maka apabila mendapat perlakuan aerasi dan pelindian akan semakin banyak melepaskan ion H⁺ dalam air lindian dan menyebabkan kemasaman air lindian semakin tinggi.

Tanah sulfat masam potensial yang dibiarkan mengalami pengudaraan bebas di dalam keadaan aerobik Al terkeluar ke dalam tanah akibat pemecahan mineral klei (Shamsudin dan Auxtero, 1991). Berdasarkan hasil analisis statistik menunjukkan bahwa Al³⁺ yang dilepaskan tanah sulfat masam potensial sangat nyata dipengaruhi oleh kadar pirit awal, tingkat aerasi dan interaksi keduanya. Perlakuan aerasi dengan pengeringan selama 4 hari pada suhu 45°C, akumulasi Al³⁺ pada tanah sulfat masam potensial yang kadar piritnya tergolong rendah konsentrasinya nyata-nyata lebih tinggi dibandingkan yang tidak dikeringkan maupun yang dikeringkan selama 2 hari pada suhu 45°C. Sedangkan pada tanah sulfat masam potensial yang tergolong sedang, aerasi dengan pengeringan tidak berpengaruh nyata terhadap akumulasi Al³⁺. Semakin lama dikeringkan maka konsentrasi Al³⁺ yang terlepas ke larutan tanah semakin tinggi terjadi pada tanah sulfat masam potensial yang kadar piritnya

Tabel 3. Pengaruh aerasi dengan pengeringan terhadap akumulasi Fe²⁺ terlarut dari berbagai kandungan pirit dalam tanah sulfat masam potensial

Table 3. The effects of aeration by drying on soluble Fe²⁺ accumulation from potential acid sulfate soils of various pyrite contents

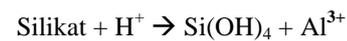
Kadar pirit	Tingkat aerasi			Rata-rata
	Tanpa aerasi/tidak dikeringkan (S)	Pengeringan selama 2 hari pada 45°C (F)	Pengeringan selama 4 hari pada 45°C (W)	
	cmol (+).kg ⁻¹			
Rendah (0,70%)	0,09 c	0,04 c	0,07 c	0,07 C
Sedang (1,96%)	2,26 b	0,24 c	0,24 c	0,92 B
Tinggi (4,39%)	0,31 c	1,94 b	7,33 a	3,19 A
Rata-rata	0,89 Q	0,74 Q	2,55 A	

Angka dalam 1 kolom dan baris yang diikuti huruf kecil atau huruf besar yang tidak sama, berbeda sangat nyata menurut uji Duncan dengan tingkat kepercayaan 99%.

tergolong tinggi (H). Menurut Shamsudin dan Auxtero (1991), bahwa hancurnya mineral klei yang akan melepaskan ion Al terjadi pada $\text{pH} < 3,5$. Selanjutnya menurut Subagyo (2006), bahwa oksidasi pirit akan menyebabkan turunnya $\text{pH} < 4$, jika produksi asamnya melebihi kapasitas netralisasi tanah. Kapasitas netralisasi tanah berkaitan dengan ketersediaan karbonat, basa dapat ditukar dan kemudahan melapuk silikat. Hanya tanah sulfat masam potensial yang kadar piritnya tergolong tinggi, jumlah konsentrasi Al^{3+} yang dilepaskan sangat nyata lebih besar dibandingkan dengan yang tergolong rendah dan sedang. Ditinjau dari interaksi keduanya konsentrasi Al^{3+} paling tinggi dijumpai pada kombinasi perlakuan kadar pirit yang tergolong tinggi dan aerasi dengan pengeringan selama 4 hari pada suhu 45°C yaitu $40,66 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ (Tabel 5). Dilihat dari pH air lindian terdapat korelasi yang sangat nyata ($r=-0,61$) yang berarti semakin rendah pH air lindian maka Al^{3+} yang dilepaskan juga semakin banyak.

Ion hidrogen (proton) yang dihasilkan dari oksidasi pirit menyebabkan kondisi tanah yang sangat masam. pH yang sangat rendah menyebabkan penghancuran kisi-kisi mineral liat sehingga silikat dan Al^{3+} terlepas. Di lapangan nilai pH tanah sulfat masam aktual berkisar antara 3.2 hingga 3.8 (Dent, 1986). Meningkatnya kandungan silika dan Al^{3+} terlarut mempengaruhi karakteristik tanah dan air tanah. Aktivitas Al^{3+} terlarut berkorelasi secara langsung dengan pH . Bila pH meningkat maka aluminium akan mengendap sebagai hidroksida atau basic sulfat (van Breemen, 1973).

Proses penghancuran kisi-kisi mineral liat oleh H^+ yang menghasilkan aluminium menurut Maas (1989) adalah sebagai berikut:



Dari persamaan tersebut terlihat bahwa secara teoritis terdapat hubungan yang lurus antara pelepasan Al^{3+} dengan H^+ terlarut. Ditinjau dari korelasi diantara

Tabel 4. Pengaruh aerasi dengan pengeringan terhadap akumulasi H^+ dari berbagai kandungan pirit dalam tanah sulfat masam potensial.

Table 4. The effects of aeration by drying on H^+ accumulation from potential acid sulfate soils of various pyrite contents

Kadar pirit	Tingkat aerasi			Rata-rata
	Tanpa aerasi/tidak dikeringkan (S)	Pengeringan selama 2 hari pada 45°C (F)	Pengeringan selama 4 hari pada 45°C (W)	
	$\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$			
Rendah (0,70%)	1,95 d	2,79 d	3,21 d	2,65 B
Sedang (1,96%)	2,38 d	2,45 d	5,02 cd	3,28 B
Tinggi (4,39%)	6,78 c	20,72 b	26,97 a	18,16 A
Rata-rata	3,70 R	8,65 Q	11,73 P	

Keterangan:

Angka dalam 1 kolom atau baris yang diikuti huruf yang tidak sama berbeda sangat nyata menurut uji Duncan dengan tingkat kepercayaan 99%.

Tabel 5. Pengaruh aerasi dengan pengeringan terhadap akumulasi produksi Al^{3+} dari berbagai kandungan pirit dalam tanah sulfat masam potensial

Table 5. The effects of aeration by drying on Al^{3+} accumulation from potential acid sulfate soils of various pyrite contents

Kadar pirit	Tingkat aerasi			Rata-rata
	Tanpa aerasi/tidak dikeringkan (S)	Pengeringan selama 2 hari pada 45°C (F)	Pengeringan selama 4 hari pada 45°C (W)	
	$\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$			
Rendah (0,70%)	0,23 d	0,77 d	3,28 cd	1,43 B
Sedang (1,96%)	0 d	0,16 d	0,46 d	0,20 B
Tinggi (4,39%)	9,76 c	18,84 b	40,66 a	23,09 A
Rata-rata	3,33 R	6,59 Q	14,80 A	

Keterangan:

Angka dalam 1 kolom dan baris yang diikuti huruf yang tidak sama berbeda sangat nyata menurut uji Duncan dengan tingkat kepercayaan 99%.

Angka dalam 1 kolom atau 1 baris yang diikuti huruf kapital yang tidak sama berbeda nyata menurut uji Duncan dengan tingkat kepercayaan 99%

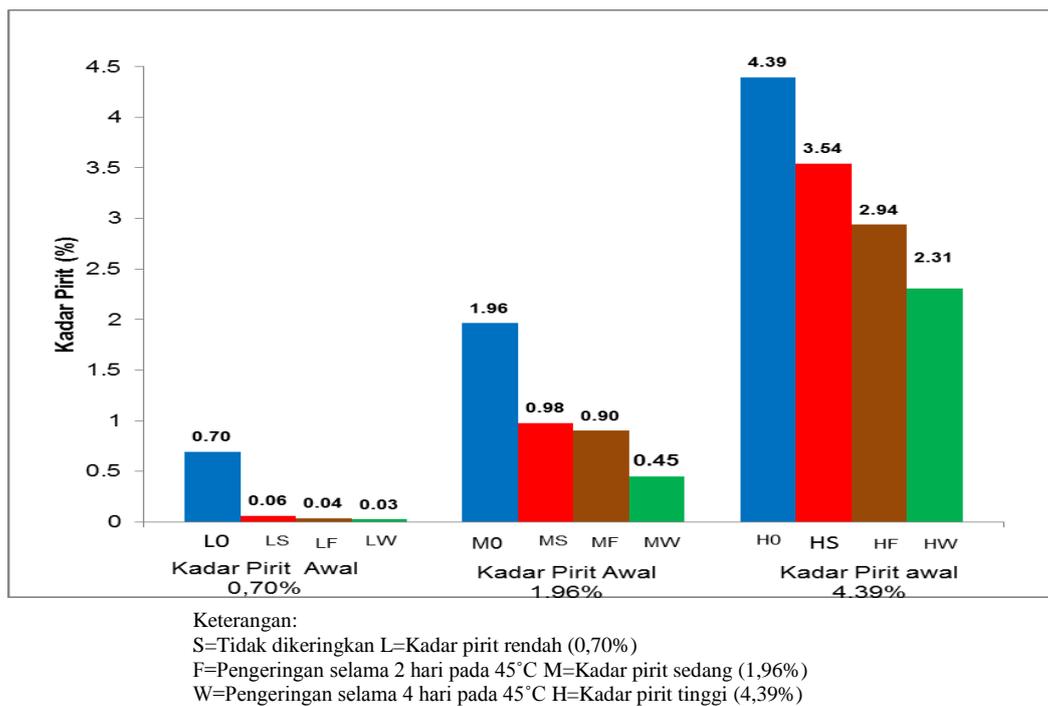
keduanya menunjukkan hubungan yang sangat erat dengan nilai korelasi 0,95. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa semakin tinggi konsentrasi H⁺ yang dihasilkan dari oksidasi pirit maka Al³⁺ yang dilepaskan juga semakin banyak. Menurut Doberzynski (1995) bahwa terjadinya proses pemasaman lingkungan akibat oksidasi pirit dapat meningkatkan laju proses dekomposisi mineral primer. Dekomposisi mineral primer sangat dipengaruhi oleh pH, Eh lingkungan dan sirkulasi air. Sebagai contoh mineral kaolinit menjadi tidak stabil pada air asam yang mengandung konsentrasi sulfat tinggi.

Penurunan kadar pirit

Pirit merupakan mineral primer yang sangat tidak larut dalam air (Kusel,2003). Penurunan kadar pirit dalam tanah sulfat masam terjadi akibat proses oksidasi. Dari Gambar 3, terlihat bahwa pada umumnya perlakuan aerasi dengan pengeringan mempercepat penurunan kadar pirit tanah sulfat masam potensial yang diuji dibandingkan tanpa aerasi. Pada perlakuan tanpa aerasi juga terjadi penurunan kadar pirit. Hal ini disebabkan walau tanpa aerasi, namun pelindian yang dilakukan setiap minggu menyebabkan masuknya oksigen ke dalam tanah sehingga terjadi oksidasi pirit yang mengakibatkan penurunan kadar pirit.

Berdasarkan hasil analisis statistik, menunjukkan bahwa penurunan jumlah pirit tanah sulfat masam

potensial yang diuji sangat nyata dipengaruhi oleh kadar pirit awal, tingkat aerasi dan interaksi keduanya (Tabel 6). Dari Tabel 6 terlihat bahwa penurunan kadar pirit paling cepat terjadi pada perlakuan kadar pirit yang tergolong tinggi dan aerasi dengan pengeringan selama 4 hari pada 45°C yaitu 2,08% (47,45% dari kadar pirit awal). Hal ini menunjukkan bahwa pengeringan selama 4 hari pada suhu 45°C dan dilakukan pelindian setiap minggu sebanyak 8 kali mampu menurunkan 47,45% dari kadar pirit awal. Penurunan kadar pirit ini lebih cepat dibandingkan penelitian Maas *et al.* (2000) mengenai oksidasi pelindian yang menggunakan lysimeter dengan kadar pirit >4% dan pemberian aerasi berupa penambahan pasir kuarsa sebanyak 25%, inkubasi selama 2 minggu dan pelindian sebanyak 8 kali, kadar pirit turun sekitar 2%. Hal ini menunjukkan bawa reklamasi selama 112 hari mampu menurunkan kadar pirit sebanyak 2%. Sedangkan pada penelitian ini aerasi dengan pengeringan tanah sulfat masam dengan kadar pirit awal 4,39% pada suhu 45°C selama 4 hari, maka reklamasi selama 56 hari, kadar pirit turun sebanyak 2,08%. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa perlakuan aerasi dengan menurunkan lengas tanah lebih efektif dalam menurunkan kadar pirit tanah sulfat masam potensial dibandingkan melonggarkan struktur tanah.



Gambar 3. Kadar pirit tanah sulfat masam potensial yang tersisa setelah perlakuan aerasi dengan pengeringan dan pelindian selama 8 minggu.

Figure 3. The remaining pyrite content of potential acid sulfate soil after aeration by drying and leaching for 8 weeks

- ICARD. ASMR, 3134 Montavesta Rd. Lexington, KY 40502. March 26-30, 2006.
- Maas, A. 1989. Genesis, Classification and Reclamation of Potential Acid Sulfate Soils in South Kalimantan, Indonesia. PhD. Thesis. State University of Ghent, Belgium.
- Maas, A., R. Sutanto dan T. Purwadi. 2000. Pengaruh air laut terhadap oksidasi pirit dan tahanan hara tanah sulfat masam. 2000. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*. 2(2):41-45.
- Maas, A. 2003. Peluang dan Konsekuensi Pemanfaatan Lahan Rawa Pada Masa Mendatang. Pidato Pengukuhan Jabatan Guru Besar pada Fakultas Pertanian. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Manders, J.A., C. D. Smith, K. M. Watling, J. J. Adams dan C. R. Ahern. 2002. An Investigation of Acid Sulfate Soils in the Logan-Coomera Area. Volume 1. Report on Acid Sulfate Soil Mapping. Department of Natural Resources and Mines, Indooroopilly, Queensland, Australia.
- Maria, E., C. Freeman dan R. David. 2002. Impact of pH and redox potential changes on acidic sulphate soils. Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering.
- Najib, M. dan A. Hairani. 2008. Pengaruh amelioran dan varietas terhadap pertumbuhan dan hasil kacang panjang di tanah sulfat masam aktual. Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Lahan Rawa, Banjarbaru 5 Agustus 2008.
- Noor, M. 2004. Upaya Perbaikan Produktivitas Tanah Sulfat Masam. Disertasi. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Purnomo, E., A. Mursyid, M. Syarwani, A. Jumberi, Y. Hashidoko, T. Hasegawa, S. Honma dan M. Osaki. 2005. Phosphorus solubilizing microorganisms in the rhizosphere of local rice varieties grown without fertilizer on acid sulphate soils. *Soil Sci. Plant Nutr.* 51(5):679-681.
- Powell, B dan C. R. Ahern. 2000. Nature, origin and distribution of acid sulfate soils: Issues for Queensland Acid Sulfate Soils Environmental. Issues, Assessment & Management. Technical Paper, Brisbane. 1:1-12.
- Rhoades, J. D. 1982. Soluble Salts. Dalam *Methods of Soil Analysis Part 2 Chemical and Microbiological Properties*. 2nd. Diedit oleh A. L. Page. American Society of Agronomy, Inc. dan Soil Sciences of America, Inc. Madison, Wisconsin USA.
- Rigby, P. A., S. K. Dobos, F. J. Cook dan A. Goonetille. 2006. Role of organic matter in framboidal pyrite oxidation. *Science of the Total Environment*. 367:847-854.
- Schmieder, P. J., J. R. Taylor dan N. Bourgeot. 2012. Oxygen consumption techniques to quantify acidity generation rates. 1st International Acid and Metalliferous Drainage Workshop in China-Beijing 2012.
- Shamshuddin, J. dan E. A. Auxtero. 1991. Soil solutions composition and mineralogy of some active acid sulfate soils in Malaysia as affected by laboratory incubation with lime. *Soil Science*. 152(5):365-375
- Shamshuddin, J., S. Muhrizal, I. Fauziah dan M. H. A. Husni. 2004. Effect of adding organic materials to an acid sulfate soil on the growth of cocoa (*Theobroma cacao* L.) seedlings. *Science of the Environmental*. 323:33-45.
- Soil Survey Staff. 2010. Keys to Soil Taxonomy. 11th. USDA.
- Soil Water Consultants. 2006. Theoretical Assessment of the Potential for Pyrite Oxidation Adjacent to the Proposed Cloverdale Minesite Following Groundwater Drawdown During Mining. www.epa.gov.au/epadoclib/b1233/appendices/appendix_10.pdf.
- Subagyo, H. 2006. Klasifikasi dan penyebaran lahan rawa. Dalam D. A. Suriadikarta, U. Kurnia, H. S. Mamat, W. Hartatik, D. Setyorni (Penyunting). Karakteristik dan pengelolaan lahan rawa. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan pertanian. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Departemen Pertanian.
- Stumm, W. dan J. J. Morgan. 1981. Aquatic chemistry, an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters. New York. John Wiley and Sons. Pp469-471. 2nd.
- Suswanto, T., J. Shamshuddin, S. R. Syed Omar, Peli Mat, dan C. B. S. Teh. 2007. Alleviating an acid sulfate soil cultivated to rice (*Oryza sativa*) using ground magnesium limestone and organic fertilizer. *Jurnal Tanah dan Lingkungan*. 9(1):1-9.
- Tan, K. H. 1998. Dasar-dasar Kimia Tanah. Penerjemah D. H. Goenadi. Gadjah Mada University Press, Yogyakarta. 295 hal.
- Tim Sintesis Kebijakan. 2008. Pemanfaatan lahan sulfat masam berwawasan lingkungan dalam mendukung peningkatan produksi beras nasional. *Pengembangan Inovasi Pertanian*. 1(2):129-131.
- Utami, S. N. H., A. Maas, A. Haerani dan K. Anwar. 2000. Uji Cepat Kualitas Air dan Tanah di Lahan Rawa. Laporan Hasil Penelitian. Lembaga penelitian Universitas Gadjah Mada bekerjasama dengan Bagian Proyek Pengkajian Teknologi Pertanian Partisipatif Pusat/PAATP, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- Van Breemen, N. 1973. Soil forming processes in acid sulphate soils. p.66-130. In Dost, H (ed). *Acid Sulphate Soils. I. Introductory Papers and Bibliography*. Proc. Intern. Symp., 13-20 August 1972. Wageningen, The Netherlands.
- , 1993. Environmental aspect of acid sulphate soils. In selected papers of the Ho Chi Minh City Symposium on Acid Sulphate Soil (eds). D. I. Dent and MEF van Mensvoort). International Institute for Land Reclamation and Improvement Publication No. 53. Pp. 391-402.