

# **LAHAN RAWA PASANG SURUT SULFAT MASAM TERDEGRADASI DAN UPAYA PEMULIHANNYA**

**Muhammad Alwi dan Linda Indrayati**

Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa  
Jln. Kebun Karet P.O.Box 31, Loktabat Utara,  
Banjarbaru, Kalimantan Selatan 70712

([Alwi\\_62@yahoo.co.id](mailto:Alwi_62@yahoo.co.id))

## **Ringkasan**

Lahan rawa pasang surut di Indonesia memiliki peranan semakin penting dan strategis bagi pengembangan pertanian terutama mendukung ketahanan pangan nasional. Hal ini disebabkan oleh potensi luas lahan, produktivitas lahan, dan teknologi pengelolaannya sudah tersedia. Luas lahan rawa pasang surut yang berpotensi untuk dijadikan lahan pertanian khususnya tanaman padi masih tersedia cukup luas. Berbagai kendala yang dihadapi dalam usahatani di lahan rawa pasang surut antara lain: (1) tingkat kesuburan lahan rendah, (2) infrastruktur yang masih belum berfungsi secara optimal, (3) tingkat pendidikan petani masih rendah, (4) indeks pertanaman masih rendah, dan (5) serangan organisme pengganggu tergolong tinggi. Ke depan kontribusi lahan rawa pasang surut terhadap produksi pertanian akan semakin besar mengingat: (1) lahan yang dapat dijadikan lahan usaha tani masih luas, dan (2) peningkatan produktivitas lahan melalui teknologi perbaikan pengelolaan usaha tani masih berpeluang. Lahan rawa pasang surut umumnya selalu mengalami proses degradasi dengan intensitas yang berbeda, tergantung pada perlakuan manusia dan faktor alam. Proses yang destruktif ini mengakibatkan penurunan kualitas tanah dan tingkat produktivitas lahan. Apabila dibiarkan, maka produktivitas lahan akan menurun, sehingga mencapai tingkat yang tidak produktif. Pengelolaan lahan rawa pasang surut yang salah dapat mengakibatkan perubahan karakteristik tanah dan penurunan produktivitasnya. Pada beberapa kasus, lahan rawa pasang surut yang telah mengalami degradasi berat, biasanya sangat sulit direhabilitasi karena memerlukan waktu lama dan biaya tinggi. Oleh karena itu, perlu dilakukan pencegahan melalui penerapan tindakan konservasi tanah dan air yang seharusnya merupakan bagian dari usaha budidaya pertanian, sehingga tingkat produktivitas lahan untuk usaha tani dapat ditingkatkan. Berbagai upaya pemulihan lahan sulfat masam terdegradasi telah dilakukan antara lain melalui: (1) pelindian, (2) penggenangan dan pengeringan, dan (3) ameliorasi dan pemupukan. Semua upaya ini dilakukan untuk membuang asam dan ion-ion seperti Fe-bebas,  $SO_4^{2-}$ ,  $Al^{3+}$  dan  $Mn^{2+}$  yang berada pada tingkat meracun bagi tanaman.

## Pendahuluan

Pengembangan pertanian di lahan rawa pasang surut semakin penting dan strategis dalam kaitannya dengan perkembangan penduduk, industri, dan berkurangnya lahan subur karena berbagai penggunaan non pertanian. Potensi lahan pasang surut di Indonesia sekitar 20,12 juta hektar, yang terdiri dari 2,07 juta hektar lahan potensial, 6,72 juta hektar lahan sulfat masam, 10,89 juta hektar lahan gambut, dan 0,44 juta hektar lahan salin (Nugroho *et al.*, 1992). Lahan pasang surut yang berpotensi untuk dijadikan areal pertanian sekitar 9,53 juta hektar, yang sudah direklamasi sampai tahun 2000 baru sekitar 4,186 juta hektar (Alihamsyah, 2002), sisanya masih merupakan lahan yang belum dimanfaatkan.

Karakteristik mineralogi tanah sulfat masam penting diketahui karena komposisi bahan kimianya memegang peranan penting dalam mengendalikan perilaku ion-ion dalam larutan tanah. Mulyanto *et al.* (1999) mengemukakan bahwa hasil analisis mineral liat dari semua contoh tanah sulfat masam yang diperlakukan dengan penjuanan  $K^+$  serta  $Mg^{2+}$  dan  $Mg^{2+}$  ditambah glycol menunjukkan bahwa tanah sulfat masam mengandung mineral kaolinit, mika, mineral liat campuran mika-smektit, mika-vermikulit, smektit-kaolinit dan smektit. Dent (1986) menyatakan bahwa selain mineral-mineral di atas, dijumpai juga mineral kuarsa dan markasit. Mineral markasit ( $FeS_2$ ) merupakan isotipe dari mineral pirit yang terbentuk sehubungan dengan lingkungan air payau.

Reaksi oksidasi pirit merupakan penyebab utama munculnya permasalahan di tanah sulfat masam. Menurut Mensvoort dan Dent (1998) proses reduksi pada tanah sulfat masam akan menghasilkan  $Fe^{2+}_{(aq)}$  dan  $H_2S_{(aq,g)}$ . Reduksi besi (Fe III menjadi Fe II) terjadi pada potensial redoks (Eh) -180 mV yang menyebabkan pH menjadi 7, dan reduksi sulfat ( $SO_{42(aq)}$  menjadi  $H_2S_{(aq,g)}$ ) terjadi pada Eh -220 mV yang juga menyebabkan pH naik mencapai 7. Pirit adalah bentuk umum dan sangat stabil yang merupakan produk akhir dari reduksi sulfat. Apabila pirit teroksidasi akan dihasilkan  $Fe(OH)_3 (s)$ ,  $SO_{42-(aq)}$ , dan  $H^+_{(aq)}$ . Oksidasi pirit secara kimia akan berlangsung lambat, tetapi reaksi yang dimediasi oleh bakteri pengoksidasi besi, khususnya *Thiobacillus ferrooxidans* menjadikan kondisi optimum untuk oksidasi pirit dengan konsentrasi oksigen >0,01 fraksi mol (1%), temperatur 5-55 °C (optimal 30 °C), dan pH 1,5-5,0 (optimal 3,2).

Hasil oksidasi pirit adalah mineral berwarna kuning yang dikenal sebagai jarosit yang mengendap. Keberadaan mineral ini umumnya pada kondisi oksidasi kuat ( $E_h > + 400$  mV) dan menyebabkan kondisi tanah menjadi sangat masam ( $pH < 3,7$ ). Pada pH lebih tinggi, jarosit terhidrolisis menjadi goetit ( $FeO.OH_{(s)}$ ),  $H_{+ (aq)}$ , dan  $SO_{42- (aq)}$ . Menurut Breemen (1993) pada pH sangat rendah ( $< 4$ ) kelarutan  $Al_{3+}$  cukup tinggi menyebabkan cukup besarnya mobilitas  $Al_{3+}$  dalam tanah.

Secara alami tanah sulfat masam dalam keadaan tergenang, namun masih terjadi oksidasi. Reklamasi lahan pasang surut bertanah sulfat masam untuk pertanian umumnya dimulai dengan pembuatan saluran drainase. Drainase berlebih dapat mempercepat proses oksidasi, oleh karena itu upaya pengelolaan tanah dan air di tanah sulfat masam lebih difokuskan pada upaya mempertahankan lapisan pirit tetap dalam kondisi reduksi (Multilaksono *et al.*, 2001). Jika terjadi oksidasi, maka air drainase pada tanah sulfat masam akan membawa unsur hara  $Ca_{2+}$ ,  $Mg_{2+}$  dan  $K^+$  serta hasil oksidasi dan reduksi seperti  $H^+$ ,  $SO_{42-}$ , dan  $Fe_{2+}$  dimana kondisi ini dapat mencemari lingkungan sekitarnya (Rachim *et al.*, 2000).

Pelindian, pengeringan dan pembasahan pada tanah sulfat masam merupakan upaya untuk membuang asam dan ion-ion seperti Fe-bebas,  $SO_{42-}$ ,  $Al_{3+}$ , dan  $Mn_{2+}$  yang berada pada tingkat meracun bagi tanaman. Subagyo *et al.* (1994) menyatakan bahwa pelindian tidak hanya mengurangi kemasaman, tetapi berdampak pada terlindinya basa-basa seperti  $Ca_{2+}$  dan  $Mg_{2+}$  yang diperlukan untuk pertumbuhan dan produksi tanaman. Keadaan ini terbukti dari kandungan  $Ca_{2+}$  dan  $Mg_{2+}$  di dalam tanah pada lahan yang dilindi lebih rendah dari pada lahan yang digenangi.

Tulisan ini bertujuan untuk memaparkan kepada pengguna bahwa pemanfaatan tanah sulfat masam sebagai lahan pertanian harus hati-hati. Kesalahan dalam pengelolaan akan mengakibatkan tanah ini berubah menjadi tanah bongkor dan untuk memperbaikinya kembali sebagai lahan pertanian produktif memerlukan waktu lama dan biaya mahal.

## **Lahan Rawa Pasang Surut Sulfat Masam**

### **Pembukaan lahan dan potensinya**

Pembukaan lahan rawa pasang surut dilakukan berkaitan dengan program transmigrasi yang dimulai tahun 1969 melalui Proyek Pembukaan Persawahan Pasang Surut (P4S). Pemanfaatan lahan pasang surut untuk

pertanian merupakan pilihan yang strategis untuk mengimbangi penciptaan lahan produktif akibat alih fungsi ke sektor nonpertanian. Ananto *et al.* (1998) menyatakan bahwa pengembangan lahan rawa pasang surut memerlukan perencanaan, pengelolaan dan pemanfaatan yang tepat serta penerapan teknologi yang sesuai, terutama pengelolaan tanah dan air. Melalui upaya seperti itu, diharapkan lahan rawa pasang surut dapat menjadi lahan pertanian yang produktif, berkelanjutan dan berwawasan lingkungan. Pengembangan lahan rawa pasang surut dimulai dari P4S tahun 1970-an dan dilanjutkan dengan proyek Swamp I, Swamp II, kerja sama dengan Belanda (LAWOO) tahun 1980-an, Proyek Penelitian Pengembangan Lahan Rawa Terpadu (ISDP) dan Proyek Pertanian PLG tahun 1990-an, telah menghasilkan berbagai teknologi pengelolaan lahan (Ananto *et al.*, 2000). Teknologi itu antara lain adalah pengelolaan tanah, tata air mikro, ameliorasi dan pemupukan, penggunaan varietas yang adaptif, pengendalian hama dan penyakit, dan model usahatani. Namun, umumnya teknologi tersebut tidak dapat diterapkan secara berkelanjutan karena adanya berbagai kendala, seperti modal petani yang rendah, infrastruktur yang terbatas, kelembagaan pedesaan yang kurang berkembang, dan perhatian pemerintah dalam pemeliharaan jaringan tata air masih kurang.

Kegiatan pertama yang dilakukan dalam pembukaan lahan rawa pasang surut di Indonesia adalah membangun saluran-saluran drainase berdimensi besar. Sebagai contoh, sistem drainase garpu yang diterapkan di Kalimantan Selatan memiliki panjang saluran primer 1-2 km yang bercabang menjadi dua saluran sekunder dengan panjang 8- 12 km. Di ujung saluran sekunder dilengkapi kolam berukuran 300 m x 300 m. Jarak antara dua saluran sekunder mencapai 3-4 km. Setiap saluran sekunder dilengkapi dengan saluran tersier yang berjarak 200 m. Hal ini mengakibatkan terjadinya drainase yang berlebih (*over drain*), sehingga sangat potensial untuk teroksidasinya pirit yang menyebabkan tanah menjadi masam.

Perubahan sifat kimia tanah di lahan rawa pasang surut berhubungan erat dengan dinamika senyawa pirit di dalam tanah (Prasetyo, 2007). Purnomo *et al.* (1999) menyatakan bahwa komposisi kimia dari air irigasi pada sistem garpu berubah-ubah baik secara spasial ataupun temporal. Kemudian Aribawa *et al.* (1993) memperlihatkan perubahan sifat kimia yang mencolok dari kualitas air di petakan sawah pada musim kemarau dan hujan. Perubahan sifat kimia tanah juga dapat dilihat dari jarak antara lahan

dengan sungai atau laut. Perubahan sifat kimia tanah menjadi lebih buruk jika semakin jauh jaraknya dari sungai atau laut (Priatmadi dan Purnomo, 2000).

Pengembangan pertanian di lahan rawa pasang surut sering menghadapi kendala seperti: (1) genangan air dan kondisi fisik lahan, (2) kemasaman tanah tinggi karena kelarutan aluminium ( $Al_{3+}$ ), besi ferri ( $Fe_{3+}$ ), dan sulfat ( $SO_{42-}$ ) yang tinggi, (3) ketersediaan unsur hara menurun dan pada kondisi tereduksi sering muncul masalah keracunan besi ferro ( $Fe_{2+}$ ), dihidrogen sulfida ( $H_2S$ ), karbon dioksida ( $CO_2$ ), dan asam-asam organik.

Beckers dan Ash (2005) menyatakan bahwa kebanyakan tanah mineral kaya besi, gejala keracunan besi dapat dilihat dari jaringan daun yang mengakibatkan penurunan hasil. Kejadian ini hanya terjadi pada kondisi lahan tergenang, sebagai akibat dari proses reduksi oleh mikroba yang merubah besi tidak larut ( $Fe_{3+}$ ) menjadi besi larut ( $Fe_{2+}$ ). Menurut Mehbaran *et al.* (2008) kondisi terjadinya keracunan besi pada tanaman seperti: (1) konsentrasi  $Fe_{2+}$  yang tinggi dalam larutan tanah karena kondisi reduksi yang kuat pada tanah, (2) status hara dalam tanah yang rendah dan tidak seimbang, (3) kurangnya oksidasi akar dan rendahnya daya oksidasi akar (*eksklusi*  $Fe_{2+}$ ) disebabkan defisiensi hara P (fosfor), Ca (kalsium), Mg (magnesium), dan K (kalium), (4) kurangnya daya oksidasi akar akibat terjadinya akumulasi bahan-bahan yang menghambat respirasi ( $H_2S$ ,  $FeS$ , dan asam-asam organik), (5) aplikasi bahan organik dalam jumlah besar yang belum terdekomposisi, dan (6) suplai Fe secara terus-menerus dari air bawah tanah atau rembesan secara lateral dari tempat yang lebih tinggi. Lahan rawa pasang surut yang berpotensi untuk dijadikan lahan pertanian sekitar 9,53 juta hektar (Alihamsyah, 2002). Menurut Direktorat Rawa dan Pantai (2006) lahan rawa pasang surut yang potensial untuk lahan pertanian di Indonesia tersebar di pulau Kalimantan, Sumatera, Sulawesi, Papua, dan Jawa dengan luas sekitar 8.535.708 ha. Luas lahan yang telah direklamasi baik oleh pemerintah maupun masyarakat sekitar 2.833.814 ha, sedang yang belum direklamasi seluas 5.701.894 ha, sebagian besar berada di Papua (Tabel 1).

**Tabel 1.** Luas lahan rawa pasang surut potensial yang sudah dan belum direklamasi, 2006

Pulau	Luas lahan sudah direklamasi (ha)			Belum direklamasi (ha)	Total (ha)
	Pemerintah	Masyarakat	Jumlah		
Kalimantan	500.228	551.980	1.052.208	445.630	1.497.838
Sumatera	814.582	623.765	1.438.347	573.340	2.011.687
Sulawesi	81.922	101.705	183.627	459.116	642.743
Papua	-	8.655	8.655	4.208.295	4.216.950
Jawa	36.369	114.608	150.977	15.513	166.490
<b>Total</b>	<b>1.433.101</b>	<b>1.400.713</b>	<b>2.833.814</b>	<b>5.701.894</b>	<b>8.535.708</b>

Sumber: Direktorat Rawa dan Pantai (2006)

Luas baku lahan sawah pasang surut di Indonesia berdasarkan hasil sensus pertanian (Biro Pusat Statistik, 2008) adalah sekitar 657.000 hektar. Luas dan sebaran lahan sawah pasang surut di tiga pulau besar (Sumatera, Kalimantan, dan Sulawesi) masing-masing 324.231 ha, 331.072 ha dan 1.584 ha. Berdasarkan hasil kesepakatan berbagai instansi/ lembaga terkait dengan luas dan sebaran lahan sawah diantaranya BPN, Kementan, PU, Bakosurtanal, dan Lapan yang selanjutnya dikoordinasikan oleh BPN, maka disepakati luas baku lahan sawah pasang surut 407.594 ha atau 5,03% dari luas lahan sawah di Indonesia (Tabel 2).

**Tabel 2.** Luas lahan sawah pasang surut di masing-masing provinsi pada tiga pulau besar (Sumatera, Kalimantan, dan Sulawesi) tahun 2011

Sumatera		Kalimantan		Sulawesi	
Provinsi	Luas (ha)	Provinsi	Luas (ha)	Provinsi	Luas (ha)
NAD	1.250	Kalteng	56.724	Sulbar	29
Sumatera Barat	1.358	Kalsel	125.644	-	-
Jambi	92.302	Kalbar	20.532	-	-
Sumatera Selatan	108.500	-	-	-	-
Bengkulu	309	-	-	-	-
Lampung	946	-	-	-	-
<b>Total</b>	<b>204.666</b>		<b>202.900</b>		<b>29</b>

Sumber: Ritung (2011)

Luas lahan sawah pasang surut di Indonesia pada tahun 2011 lebih rendah dibandingkan dengan data pada tahun 2008. Perbedaan tersebut terjadi karena data luas lahan sawah pasang surut tahun 2011 dihitung

berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan secara spasial, sedangkan data tahun 2008 merupakan hasil sensus yang diperoleh berdasarkan wawancara atau data tabular. Selain itu, selama selang waktu tiga tahun telah terjadi pencetakan sawah baru dan alih fungsi lahan sawah untuk non pertanian. Akhir-akhir ini lahan rawa pasang surut dijadikan sebagai wilayah pengembangan perkebunan kelapa sawit dan karet. Dalam waktu yang bersamaan banyak juga lahan rawa pasang surut yang ditinggalkan petani karena mengalami penurunan produktivitas akibat degradasi lahan. Berdasarkan data diatas, maka luas lahan rawa pasang surut yang masih tersedia adalah (sudah direklamasi sekitar 2.833.814 ha dan sudah dikembangkan sebagai lahan sawah 407.594 ha) berarti masih tersisa 2.426.220 ha untuk pengembangan sawah baru.

Berbagai kegagalan dan keberhasilan telah mewarnai kegiatan pengembangan lahan rawa pasang surut. Terjadinya lahan bongkor yang ditinggalkan petani karena telah mengalami oksidasi pirit sehingga produksinya sangat rendah, merupakan akibat dari reklamasi yang kurang tepat. Kegagalan ini dapat menjadi pelajaran dalam pengembangan lahan sulfat masam pada masa yang akan datang. Potensi lahan rawa pasang surut yang demikian besar dapat dimanfaatkan untuk menunjang program peningkatan ketahanan pangan dan agribisnis yang menjadi program utama sektor pertanian. Lahan rawa pasang surut dapat menjadi basis pengembangan ketahanan pangan untuk kepentingan jangka pendek, menengah maupun jangka panjang. Oleh karena itu, investasi pemerintah dan swasta dalam pemanfaatan lahan rawa seyogyanya dapat lebih ditingkatkan.

## **Pembentukan tanah sulfat masam**

Tanah sulfat masam adalah tanah liat rawa yang terbentuk dari bahan endapan marin yang kaya akan bahan organik, besi, dan belerang yang berada dalam kondisi tergenang sehingga terbentuk lapisan tanah yang mengandung pirit > 2 %. Pada kondisi alami, tanah ini umumnya memiliki: (a) lapisan bahan organik tipis (< 20 cm) di permukaannya dan (b) lapisan pirit yang belum teroksidasi (bahan sulfidik) atau sudah teroksidasi (bahan sulfurik) pada kedalaman sekitar 50 cm. Tanah sulfat masam yang memiliki bahan sulfidik disebut sebagai tanah sulfat masam potensial, sedangkan yang telah memiliki bahan sulfurik disebut sebagai tanah sulfat masam aktual (Soil Survey Staff, 1996). Sedangkan Widjaja-Adhi *et al.* (1992) mengemukakan bahwa tanah sulfat masam adalah tanah yang memiliki lapisan pirit atau

sulfidik pada kedalaman < 50 cm dan semua tanah yang memiliki horizon sulfurik walaupun lapisan sulfidik tanah tersebut lebih dalam dari 50 cm. Horizon sulfurik adalah horizon tanah yang terbentuk oleh adanya proses oksidasi lapisan bahan sulfidik yang pada umumnya dicirikan oleh adanya jarosit dan pH tanah < 3,5. Dent (1986) mendefinisikan tanah sulfat masam terbatas pada tanah-tanah yang memiliki horizon sulfurik saja. Selanjutnya Van Breemen dan Pons (1978) memberi batasan berdasarkan kemasaman dan tingkat kematangannya, tanah sulfat masam dibagi menjadi dua kelompok yaitu: (1) tanah sulfat masam potensial dan (2) tanah sulfat masam aktual. Tanah sulfat masam potensial digolongkan dalam great grup *Sulfaquent*, yang dicirikan oleh warna kelabu, masih mentah ( $n > 0,7$ ), dan tingkat kemasaman sedang sampai masam (pH 4,0). Sub grup dan great grup lain dari tanah sulfat masam potensial adalah *Sulfic Fluvaquent*, *Sulfic Hydraquent*, *Sulfihemist*, dan *Sulfisaprist*. Sedangkan tanah sulfat masam aktual digolongkan dalam great grup *Sulfaquept*, yang dicirikan oleh warna kecoklatan, cukup matang ( $n < 0,7$ ), dan sangat masam (pH < 3,5). Great grup lain dari tanah sulfat masam aktual adalah *Sulfohemist* dan *Sulfosaprist*.

Karakteristik mineralogi tanah sulfat masam merupakan hal penting yang perlu diketahui, karena komposisi bahan kimianya memegang peranan penting dalam mengendalikan perilaku ion-ion dalam larutan tanah. Mulyanto *et al.* (1999) mengemukakan bahwa hasil analisis mineral liat dari semua contoh tanah sulfat masam yang diperlakukan dengan penjenuhan  $K^+$  serta  $Mg^{2+}$ , dan  $Mg^{2+}$  ditambah glycol menunjukkan nilai-nilai puncak 3,33; 3,45; 3,56; 5; 7,15; 10; 14, dan puncak-puncak lain yang intensitasnya lebih kecil dengan nilai lebih besar dari 14 nm. Puncak sekitar 7,12 nm yang orde keduanya 3,56 nm bergeser ke 10 nm adalah petunjuk adanya mineral kaolinit. Sementara puncak 10 nm yang orde keduanya 5 nm dan puncak ini tetap pada semua perlakuan menunjukkan mineral mika. Selain kaolinit dan mika terdapat juga jenis mineral liat lain yang diindikasikan oleh puncak sekitar 14 nm atau lebih. Puncak 14 nm dan bergeser ke 10 nm pada perlakuan penjenuhan  $K^+$  dan pemanasan pada suhu 550 °C menunjukkan mineral liat yang mempunyai lapisan campuran mika-smektit, mika-vermikulit, smektit-kaolinit, dan smektit yang diperkirakan juga ada tetapi jumlahnya sedikit. Oleh karena itu, puncak refleksinya ditutupi oleh puncak-puncak mineral lain.

Dent (1986) mengatakan bahwa disamping mineral-mineral di atas, dijumpai pula mineral kuarsa yang terindikasi oleh puncak 3,33 dan 4,24 nm pada perlakuan penjenuhan  $K^+$  dan  $Mg^{2+}$  dan mineral markasit yang

ditunjukkan oleh puncak 3,44-3,47 nm. Mineral markasit ( $\text{FeS}_2$ ) merupakan isotipe dari mineral pirit yang terbentuk sehubungan dengan lingkungan pengendapan air payau.

## **Bahan sulfidik dan pembentukannya**

Soil Survey Staff (1996) mendefinisikan bahan sulfidik sebagai bahan tanah mineral atau organik yang tergenang, mengandung belerang  $^3$  0,75 % berdasarkan bobot kering dan sebagian besar dalam bentuk sulfida. Belerang yang berada dalam bentuk unsur sulfur (S) tidak lebih dari tiga kali kandungan karbonat dalam bahan tanah tersebut. Kemudian Soil Survey Staff (1999) mendefinisikan bahan sulfidik sebagai bahan tanah mineral atau organik yang mengandung senyawa belerang mudah teroksidasi, memiliki  $\text{pH} > 3,5$  dan jika diinkubasi dengan ketebalan 1 cm pada keadaan kapasitas lapang, aerob, dan suhu ruangan selama delapan minggu, akan mengalami penurunan  $\text{pH}^3$  0,5 satuan dan penurunan  $\text{pH}$  tersebut mencapai nilai  $\leq 4,0$ . Sedangkan Widjaja-Adhi *et al.* (1992) mendefinisikan bahan sulfidik sebagai bahan tanah yang mengandung pirit  $> 2$  %.

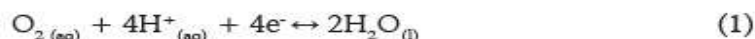
Bahan sulfidik yang keberadaannya merupakan salah satu penciri tanah sulfat masam dapat terbentuk pada beberapa kondisi lingkungan seperti di lembah berdrainase buruk dan mendapat aliran air yang mengandung sulfat tinggi, dasar danau, laguna, atau laut, atau dataran pantai dan rawa pasang surut berair salin atau payau. Dari beberapa kondisi lingkungan tersebut, lingkungan dataran pantai dan rawa pasang surut merupakan lingkungan yang paling sesuai untuk pembentukan bahan sulfidik (Pons dan Breemen, 1982).

Pirit merupakan senyawa sulfida utama dalam bahan sulfidik yang pembentukannya memerlukan kondisi lingkungan tergenang dan kaya bahan organik. Dekomposisi bahan organik dalam keadaan tergenang menciptakan kondisi tanah menjadi tereduksi tinggi. Dent (1986) menyatakan bahwa bahan organik merupakan sumber energi bagi bakteri pereduksi sulfat. Ion sulfat berperan sebagai penerima elektron hasil respirasi bakteri pereduksi sulfat, sehingga tereduksi menjadi sulfida. Sulfida yang terbentuk bereaksi cepat dengan besi ferro atau ferri oksida membentuk besi sulfida. Jika pada lingkungan tersebut terdapat senyawa atau ion yang berperan sebagai oksidator seperti  $\text{O}_2$  atau besi ferri, sebagian sulfida dapat teroksidasi menjadi unsur S atau ion polisulfida. Selanjutnya unsur S atau ion polisulfida tersebut bereaksi dengan FeS membentuk pirit ( $\text{FeS}_2$ ).

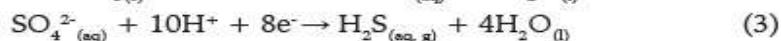
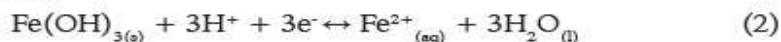
## Oksidasi dan reduksi pirit pada tanah sulfat masam

Oksidasi pirit yang ditandai oleh peningkatan potensial redoks pada tanah sulfat masam terjadi akibat drainase berlebih. Ritsema *et al.* (1992) menyatakan bahwa drainase selama seratus hari pada kolom tanah yang berasal dari Nieuwkoop, Netherland, meningkatkan Eh dari kondisi reduktif (-250-0 mV) menjadi kondisi oksidatif (500-700 mV). Pada kolom tanah dari Pulau Petak segera setelah drainase dimulai, Eh tanah meningkat dari -50 mV menjadi (500-800 mV). Aribawa *et al.* (1993) melakukan pengukuran terhadap Eh tanah dan memperoleh nilai yang berbeda-beda antarlokasi, kedalaman tanah, dan musim. Perbedaan nilai Eh tersebut terutama disebabkan adanya perbedaan kondisi drainase tanah. Nilai Eh pada tanah guludan yang berdrainase baik lebih tinggi dari pada tanah sawah, dan pada lapisan atas lebih tinggi dari pada lapisan bawah. Pada musim hujan lapisan atas tanah sawah di Unit Tatas (Kalteng), Barambai, dan Tabunganen (Kalsel), tereduksi kuat dengan nilai Eh < 0 mV, sedang pada musim kemarau menjadi teroksidasi kuat dengan nilai Eh > 400 mV. Selanjutnya dikatakan bahwa pada tanah sawah di Unit Tatas yang tidak didrainase, Eh > 200 mV hanya sampai pada kedalaman 65 cm, sedang pada tanah yang didrainase Eh tanah > 400 mV terjadi hingga kedalaman 105 cm.

Reaksi oksidasi merupakan penyebab utama munculnya permasalahan di tanah sulfat masam. Menurut Mensvoort dan Dent (1998) proses oksidasi pirit pada tanah sulfat masam terjadi dalam beberapa tahap dan melibatkan proses kimia serta mikroba. Energi yang dibebaskan dari dekomposisi bahan organik merupakan sumber elektron yang berasal dari molekul organik. Pada kondisi aerobik, oksigen yang mengalami reduks menjadi air merupakan sumber elektron:

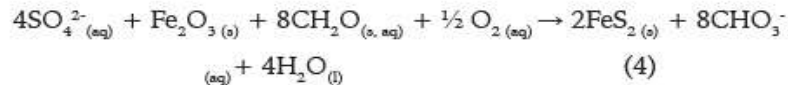


Jika tidak ada oksigen, sumber elektron lain adalah oksida atau hidroksida besi (melalui reduksi  $\text{Fe}^{2+}$ ) dan ion sulfat (melalui reduksi sulfida):



Pirit adalah bentuk umum dan sangat stabil merupakan produk akhir dari reduksi sulfat tetapi dijumpai juga sulfida lain dalam tanah dan endapan

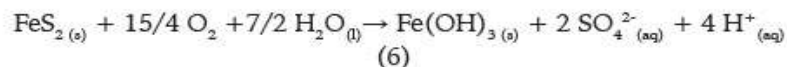
hitam monosulfida dari besi (FeS), greigit (Fe<sub>2</sub>S<sub>3</sub>), dan sulfida organik. Reaksi pembentukan pirit dari sulfat larut adalah sebagai berikut:



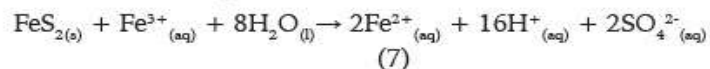
Redoks potensial dalam sistem ini berhubungan dengan muatan negatif yang berasal dari elektron dan dapat diukur melalui elektroda platinum yang dihubungkan dengan mV meter. Potensial relatif dari hidrogen dalam 1 mol larutan asam, ditetapkan pada mV nol:

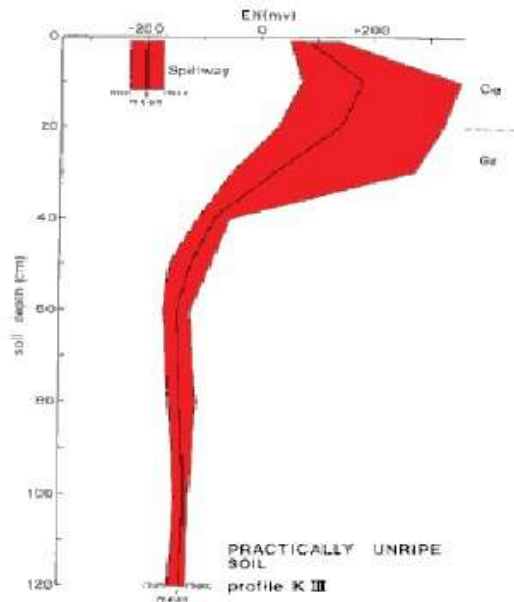


Reduksi besi (persamaan 2) terjadi pada pH 7 dan Eh -180 mV, dan reduksi sulfat (persamaan 3) terjadi pada pH 7 dan Eh -220 mV. Gambar 1 memperlihatkan hasil pengukuran Eh di lapang menggunakan elektroda platinum yang sangat berguna dalam menduga kemungkinan oksidasi atau reduksi dari besi dan sulfat. Sulfida stabil pada kondisi tergenang (anaerobik), tetapi bila ada oksigen masuk ke dalam sistem tersebut, maka sulfida akan teroksidasi menjadi asam sulfat. Oksidasi pirit terjadi mengikuti persamaan:



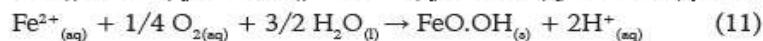
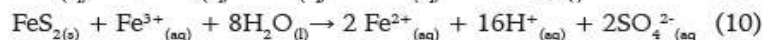
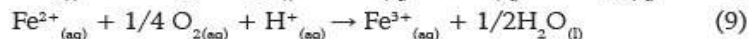
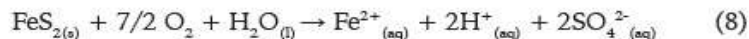
Oksidasi pirit secara kimia akan berlangsung lambat, tetapi reaksi yang dimediasi oleh bakteri pengoksidasi besi, khususnya *Thiobacillus ferrooxidans* menjadikan kondisi optimum untuk oksidasi sulfida dengan konsentrasi oksigen > 0.01 fraksi mol (1 %), temperatur 5-55 °C (optimal 30 °C), dan pH 1,5-5 (optimal 3,2). Berdasarkan reaksi di atas jika proses oksidasi pirit menghasilkan feri hidroksida Fe(OH)<sub>3</sub> dalam hal ini oksidasi 1 mol pirit akan menghasilkan 4 mol H<sup>+</sup>. Sedangkan Dent (1986) menyatakan apabila pH tanah turun hingga < 4, maka Fe<sup>3+</sup> melarut dan menjadi oksidator pirit dengan laju reaksi yang lebih cepat, setiap mol pirit akan menghasilkan 16 mol H<sup>+</sup>. Reaksi ini kelihatannya jauh lebih berperan dalam mengakibatkan proses pemasaman tanah sulfat masam dibanding reaksi di atas, namun reaksi di atas dapat dianggap sebagai pemicu reaksi berikutnya dengan persamaan reaksi sebagai berikut:





**Gambar 1.** Profil Eh liat sulfidik dalam kondisi reduksi kuat pada kedalaman 40 cm, variasi Eh terjadi di jaringan perakaran mangrof di atas 40 cm (Sumber: Mensvoort dan Dent, 1998)

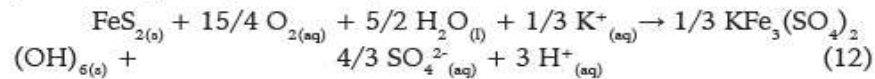
Moses dan Hermann (1991) menunjukkan beberapa tahapan penyebab kemasaman yang diringkas menurut reaksi: oksidasi pirit menjadi besi II dan sulfat, oksidasi besi II menjadi besi III, oksidasi pirit melalui besi III, dan akhirnya oksidasi dari sisa besi II menjadi goetit.



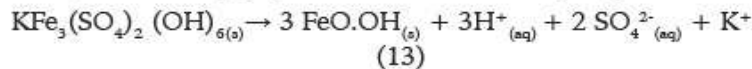
Oksidasi pirit (persamaan 1) berlangsung lambat,  $\text{Fe}^{3+}$  merupakan oksidan yang lebih efektif dan oksidasi pirit melalui  $\text{Fe}^{3+}$  (persamaan 3) akan berlangsung lebih cepat dari pada oksidasi pirit dengan oksigen, juga lebih cepat dibandingkan oksidasi  $\text{Fe}^{2+}$  menjadi  $\text{Fe}^{3+}$  (persamaan 2). Transformasi besi II menjadi besi III lebih potensial tetapi tahap kecepatannya terbatas.

Pembentukan  $\text{Fe}^{3+}$  yang dimediasi oleh bakteri *Thiobacillus ferrooxidans* (persamaan 3) tergantung pada pH yang cukup rendah untuk melarutkan Fe (pH < 4) disamping pengendapan goetit (persamaan 4) merupakan oksidasi  $\text{Fe}^{2+}$  yang hanya terjadi pada pH rendah (Wakao *et al.*, 1984).

Hasil intermediat dari oksidasi pirit yaitu mineral berwarna kuning jarosit yang mengendap dan terbentuk pada kondisi oksidasi kuat ( $E_h > +400$  mV) dan menyebabkan kondisi sangat masam (pH < 3,7). Pembentukan jarosit dari pirit diperlihatkan pada reaksi berikut:

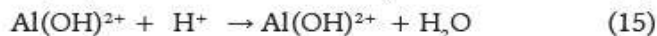


Pada pH lebih tinggi, jarosit terhidrolisis menjadi goetit



Jika dalam oksidasi pirit terbentuk jarosit, kemasaman yang dihasilkannya hanya 3 mol  $\text{H}^+$  setiap 1 mol pirit teroksidasi. Menurut Van Breemen (1993) kecepatan penurunan pH akibat oksidasi pirit ditentukan oleh jumlah pirit, kecepatan oksidasi, hasil oksidasi, dan kapasitas netralisasi.

Pembebasan aluminium dari matriks tanah dapat juga melalui reaksi hidrolisis untuk mengurangi kemasaman tanah. Reaksi ini berlangsung secara bertahap mengikuti reaksi:

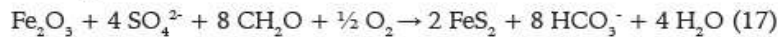


Persamaan ini menunjukkan rangkaian dari reaksi mineral penting pada oksidasi pirit. Pada pH sangat rendah (< 4) kelarutan Al cukup tinggi menyebabkan cukup besarnya mobilitas Al dalam tanah. Asam-asam organik seperti ferulat, fulvat, stearat, malonat dan sitrat merupakan pengkelat yang dapat mengikat Al, sehingga mobilitas Al menurun. Jika kebanyakan gugus karboksilat dan fenolat ditempati oleh Al dan Fe, maka kelarutan kompleks sangat berkurang dan kompleks dapat mengendap (Kollmeier *et al.*, 2001).

## Degradasi Tanah Sulfat Masam

### Proses degradasi

Tanah sulfat masam berkembang dari bahan induk besi sulfida yang kaya akan kandungan besi dan sulfur. Pirit ( $\text{FeS}_2$ ) terakumulasi pada tanah tergenang yang kaya kandungan bahan organik dan mendapat tambahan sulfur dari air laut (Dent, 1986). Pembentukan pirit digambarkan dengan reaksi sebagai berikut:



Pembentukan pirit membutuhkan unsur besi (bersumber dari sedimen), unsur sulfur (umumnya dari air laut), bakteri pereduksi (telah ada di kawasan pantai), sumber energi (bahan organik), dan pada kondisi pasang (Mensvoort dan Dent, 1998).

Degradasi pada tanah sulfat masam umumnya didominasi oleh: (a) proses pemasaman tanah dan air sebagai akibat dari oksidasi pirit, dan (b) pencucian basa-basa sebagai dampak dari pencucian asam. Pemasaman yang terjadi dapat dibedakan menjadi dua yaitu: (a) pemasaman *in-situ*, dan (b) pemasaman akibat aliran air.

### Pemasaman in-situ

Pirit dapat dipertahankan stabil pada kondisi tereduksi (saat tergenang air). Tetapi pada saat permukaan air bawah permukaan (*groundwater*) menurun hingga melebihi kedalaman lapisan pirit, akan terjadi teroksidasi pirit dan tanah menjadi masam. Kondisi ini dapat terjadi pada saat reklamasi dilakukan dengan menggali saluran-saluran drainase berdiameter besar, seperti saluran primer, sekunder, dan tersier.

Pemasaman akibat oksidasi pirit merupakan proses degradasi yang berakibat pada penurunan produktivitas lahan. Pada kondisi pH tanah  $< 4$ , aluminium akan terlarut dalam larutan tanah dan akan mencapai konsentrasi yang dapat meracuni tanaman (Moorman dan Breemen, 1978). Dent (1986) mereview beberapa penelitian sebelumnya mengenai masalah-masalah yang akan muncul jika tanah sulfat masam dikelola untuk tanaman lahan kering, yaitu: (a) kelarutan aluminium ( $\text{Al}^{3+}$ ), besi III ( $\text{Fe}^{3+}$ ), sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), dan ion hidrogen ( $\text{H}^+$ ) meningkat, (b) ketersediaan fosfat menurun akibat terbentuknya aluminium-fosfat yang tidak larut, (c) basa-basa bertukar menjadi menurun, dan (d) terjadi defisiensi hara.

Budidaya padi sawah dan kolam ikan di tanah sulfat masam melalui penggenangan, kemasaman biasanya dikurangi, tetapi akan muncul permasalahan baru yaitu keracunan besi ( $\text{Fe}_{2+}$ ), keracunan hidrogen sulfida ( $\text{H}_2\text{S}$ ), dan keracunan  $\text{CO}_2$  serta asam-asam organik jika bahan organik tanah tinggi. Keracunan besi pada lahan sawah umumnya akan memberikan pengaruh yang buruk terhadap pertumbuhan tanaman padi.

Tanah-tanah di daerah rawa pasang surut pada musim kemarau, secara fisik mengalami retakan (*cracking*) tergantung dari tipe mineral liat tanahnya. Meskipun tidak semua tanah sulfat masam mengandung mineral liat tipe 2 : 1 (*smectite*), tetapi jika proporsinya cukup tinggi maka pada kondisi kering tanah mudah menjadi retak. Retakan-retakan di permukaan (*top soil*) ini bisa mengakibatkan masuknya oksigen ke dalam lapisan tanah yang lebih dalam dan pirit akan teroksidasi. Menurut Hanhart dan Duong Van Ni (1993) pemasaman dapat disebabkan oleh tiga proses yaitu: (1) difusi, (2) retakan, dan (3) pencucian (*leaching*) asam-asam dari saluran air.

### **Pemasaman akibat aliran air**

Proses pemasaman di suatu tempat di kawasan lahan rawa pasang surut bertanah sulfat masam dapat disebabkan oleh aliran air masam yang berasal dari tempat-tempat lain yang telah mengalami pemasaman. Salah satu contoh proses pemasaman yang disebabkan oleh aliran air yang berasal dari hutan sekunder yang telah mengalami pemasaman akibat reklamasi dan aktivitas manusia di dalam hutan tersebut dijumpai di Unit Tatas, Kalimantan Tengah (Kselik, 1990). Pengaruh buruk dari aliran air masam tersebut dapat ditanggulangi dengan membangun saluran drainase intersepsi (*interceptor drained*) antara hutan sekunder dengan lahan yang dikelola.

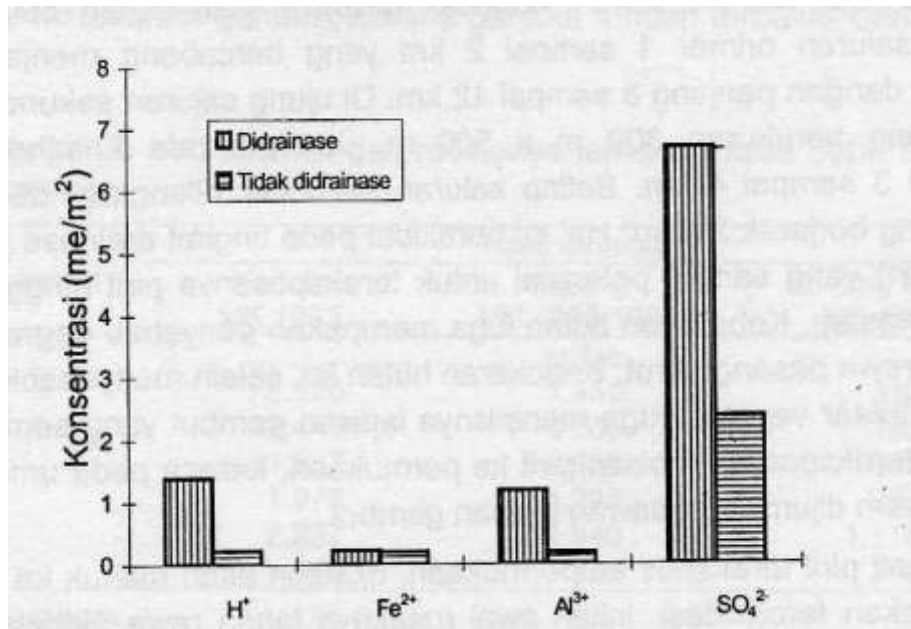
Saluran drainase intersepsi sangat nyata pengaruhnya dalam memperbaiki kualitas air di lahan pertanian. Konsentrasi sulfat ( $\text{SO}_{42-}$ ) pada lahan di dekat hutan sekunder jauh lebih tinggi dibandingkan dengan lahan yang dikelola untuk padi sawah, demikian juga halnya dengan konsentrasi besi II ( $\text{Fe}_{2+}$ ). Sebaliknya pH meningkat ke arah menjauh dari hutan sekunder. Hal ini disebabkan aliran air yang masam dengan konsentrasi  $\text{SO}_{42-}$  dan  $\text{Fe}_{2+}$  yang tinggi dari hutan sekunder terhalang oleh saluran drainase intersepsi. Air dari hutan sekunder yang masuk ke saluran drainase tersebut selanjutnya dibuang pada saat air surut.

## Upaya Pemulihannya

### Pelindian

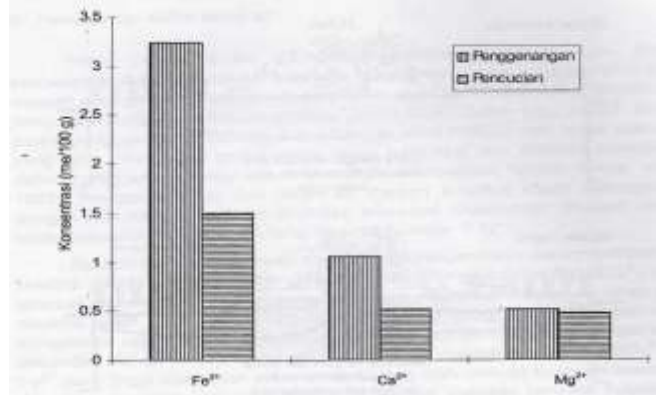
Reklamasi lahan rawa pasang surut di Indonesia telah dimulai sejak tahun 1970, dilaksanakan dengan membangun saluran-saluran drainase berdimensi besar. Hal ini mengakibatkan terjadinya drainase yang berlebih (*over drain*), sehingga sangat potensial menyebabkan tereksposnya pirit teroksidasi dan menyebabkan tanah masam.

Sekali pirit terekspose ke permukaan, oksigen akan masuk ke dalam tanah dan pirit akan teroksidasi. Inilah awal rusaknya lahan rawa pasang surut akibat kemasaman tanah dan air yang meningkat dan munculnya unsur-unsur yang bersifat racun ke lingkungan perairan. Kandungan besi ( $\text{Fe}^{2+}$ ), aluminium ( $\text{Al}^{3+}$ ), ion hidrogen ( $\text{H}^+$ ), dan sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) pada lahan yang didrainase lebih tinggi dibandingkan dengan yang tidak didrainase (Gambar 2). Hal ini memberikan implikasi bahwa setelah lahan direklamasi dengan membangun sistem dan jaringan drainase akan mengakibatkan turunnya kualitas lingkungan tanah dan air. Konsten *et al.* (1990) menunjukkan total  $\text{SO}_4^{2-}$  yang tercuci (*leached*) dari lahan yang didrainase adalah  $3,34 \text{ mol/m}_2/\text{tahun}$ , sebanding dengan  $1,17 \text{ mol FeS}_2/\text{m}_2/\text{tahun}$  atau  $140 \text{ g pirit/m}_2/\text{tahun}$ . Pada lahan yang tidak didrainase, total  $\text{SO}_4^{2-}$  yang tercuci  $1,18 \text{ mol pirit/m}_2/\text{tahun}$  yang sebanding dengan  $0,59 \text{ mol FeS}_2/\text{m}_2/\text{tahun}$  atau  $71 \text{ g pirit/m}_2/\text{tahun}$ .



**Gambar 2.** Konsentrasi  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{H}^+$ , dan  $\text{SO}_4^{2-}$  pada lahan rawa pasang surut yang didrainase dan tidak di drainase (Sumber: Subagyo *et al.*, 1994)

Kemasaman yang timbul akibat oksidasi pirit bisa dinetralkan dengan penambahan kapur (Smilde, 1990), tetapi kebutuhan kapur tergolong tinggi terutama jika kandungan pirit dalam tanah masih tinggi. Pelindian sebagai salah satu strategi pengelolaan air tidak hanya mengurangi kemasaman, tetapi berdampak pada tercucinya basa-basa yang diperlukan untuk pertumbuhan dan produksi tanaman. Subagyono *et al.* (1994) menemukan bahwa selain melindi asam-asam,  $\text{Ca}^{2+}$  dan  $\text{Mg}^{2+}$  juga ikut terlindi. Hal ini terbukti bahwa kandungan  $\text{Ca}^{2+}$  dan  $\text{Mg}^{2+}$  di dalam tanah pada lahan yang dilindi lebih rendah dari pada lahan yang digenangi (Gambar 3). Tanpa introduksi kapur dolomit sebagai sumber  $\text{Ca}^{2+}$  dan  $\text{Mg}^{2+}$ , tanah akan mengalami defisiensi



unsur hara tersebut.

**Gambar 3.** Dampak negatif pelindian terhadap konsentrasi  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , dan  $\text{Mg}^{2+}$  pada kedalaman tanah 0-20 cm yang berpotensi sebagai penyebab degradasi lahan (Sumber: Subagyono *et al.*, 1994)

Pengelolaan tanah dan air di tanah sulfat masam lebih difokuskan pada upaya mempertahankan lapisan pirit tetap dalam kondisi reduksi (Multilaksono *et al.*, 2001). Air drainase pada tanah sulfat masam akan membawa unsur hara  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , dan  $\text{K}^{+}$  serta hasil oksidasi dan reduksi pirit seperti  $\text{H}^{+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , dan  $\text{Fe}^{2+}$ . Keadaan ini dapat mencemari lingkungan sekitarnya (Rachim *et al.*, 2000). Untuk memperbaiki kualitas air tersebut dapat dilakukan dengan mengalirkan air melewati media biofilter berupa purun tikus (*Eleocharis dulcis*) dan bulu babi (*Eleocharis retroflaxa*) yang dapat menyerap unsur-unsur tersebut. Mulyanto *et al.* (1999) mengemukakan bahwa purun tikus (*Eleocharis dulcis*) dapat dijadikan biofilter karena

mampu menyerap unsur-unsur Fe dan S masing-masing 273,4 dan 4.500 ppm. Sedangkan Anwar (2006) mengemukakan bahwa selain purun tikus, rumput bulu babi (*Eleocharis retroflaxa*) dapat menyerap unsur-unsur Fe dan S masing-masing 884 dan 340 ppm.

## **Penggenangan dan pengeringan**

Penggenangan dan pengeringan tanah menyebabkan perubahan beberapa sifat kimia tanah antara lain peningkatan pH tanah, ketersediaan P meningkat, dan kadar  $Fe_{2+}$  makin berkurang. Perubahan sifat kimia tersebut berpengaruh positif terhadap pertumbuhan tanaman (Luki *et al.*, 1990). Takahashi *et al.* (1999) menyatakan bahwa pengeringan menyebabkan oksida besi ferri secara bertahap terkeristalisasi menjadi bentuk besi yang kurang reaktif. Penggenangan berkala merupakan cara yang paling efektif untuk menghilangkan pengaruh buruk yang timbul akibat penggenangan seperti: akumulasi  $CO_2$ ,  $H_2S$ , asam-asam organik, Fe, dan Mn tereduksi. Kondisi oksidasi dan reduksi secara bergantian dalam tanah dapat menyebabkan penambahan senyawa-senyawa besi ferro. Hasil penelitian Pujiastuti (1995) menunjukkan bahwa penggenangan berkala dengan masa genang-kering selama sepuluh hari menyebabkan penurunan semua bentuk besi dalam tanah. Nursyamsi *et al.* (2001) mengatakan bahwa penggenangan berkala seminggu diikuti seminggu pengeringan pada tanah sawah akan menurunkan konsentrasi Fe, Mn, dan unsur-unsur esensial lain seperti  $NH_4^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$  serta basa-basa seperti K, Ca, dan Mg.

Beckers dan Ash (2005) menginformasikan bahwa keracunan besi pada tanaman padi disebabkan tingginya konsentrasi besi terlarut dalam tanah. Kebanyakan tanah mineral kaya akan besi, gejala keracunan besi dapat dilihat dari jaringan daun yang mengakibatkan penurunan hasil. Kejadian ini hanya terjadi pada kondisi lahan tergenang, sebagai akibat dari proses reduksi oleh mikroba yang merubah besi tidak larut ( $Fe_{3+}$ ) menjadi besi larut ( $Fe_{2+}$ ). Dobermann dan Fairhurst (2000) mengemukakan tentang kondisi terjadinya keracunan besi pada tanaman seperti: (1) konsentrasi  $Fe_{2+}$  yang tinggi dalam larutan tanah karena kondisi reduksi yang kuat, (2) status hara dalam tanah yang rendah dan tidak seimbang, (3) kurangnya oksidasi akar dan rendahnya daya oksidasi akar (*eksklusi*  $Fe_{2+}$ ) yang disebabkan defisiensi hara P, Ca, Mg, dan K, (4) kurangnya daya oksidasi akar akibat terjadinya akumulasi bahan-bahan yang menghambat respirasi ( $H_2S$ , FeS, dan asam-asam organik), (5) aplikasi bahan organik dalam jumlah besar yang belum

terdekomposisi, dan (6) suplai Fe secara terus-menerus dari air bawah tanah atau rembesan secara lateral dari tempat yang lebih tinggi.

## **Ameliorasi dan pemupukan**

Pemberian bahan amelioran atau bahan pembenah tanah dan pupuk merupakan faktor penting untuk memperbaiki kondisi tanah dan meningkatkan produktivitas lahan. Bahan pembenah tanah tersebut dapat berupa kapur (kalsit atau dolomit) maupun bahan organik (abu sekam, serbuk kayu gergajian, pupuk kandang, kompos jerami, dan kompos) limbah pertanian lainnya. Hasil penelitian Anwar dan Noor (1994), Anwar dan Alwi (1994), menunjukkan bahwa pemberian kapur sebanyak 1-2 t/ha mampu meningkatkan hasil padi dari 2,5 menjadi 3,5 t GKG/ha, kedelai dari 0,8 menjadi 1,75 t/ha, jagung dari 3,5 menjadi 5,2 t/ha dan kacang tanah dari 1,67 menjadi 2,6 t/ha. Takaran bahan ameliorasi secara tepat selain tergantung kepada kondisi lahan terutama pH tanah dan kandungan Al, Fe,  $SO_4^{2-}$ , dan  $H^+$ , juga kepada tanaman yang akan ditanam. Untuk keperluan praktis, secara umum pemberian kapur dalam bentuk kalsit dan dolomit sebanyak 0,5-3,0 ton/ha untuk meningkatkan ketersediaan Ca dan Mg di lahan pasang surut sudah cukup memadai.

Pemanfaatan biomasa gulma dan limbah pertanian untuk sumber hara dan pembenah tanah merupakan salah satu cara murah dan mudah serta ramah lingkungan guna mengatasi masalah makin mahal dan langkanya pupuk serta sekaligus meningkatkan produktivitas lahan rawa, sehingga perlu digalakkan. Sejumlah gulma mempunyai potensi sebagai bahan organik karena selain kandungan haranya cukup tinggi, pertumbuhannya juga sangat cepat. Biomasanya sebanyak 1,85-2,76 ton bahan kering/ha. Kompos gulma berasal dari spesies *Eleocharis acutangula* (Purun), *Panicum repens* L (Bura-bura/Punyangan), *Rhynchospora corymbosa* L (Kerisan) mengandung 31,74 % C-organik; 1,96 % N; 0,68 % P, dan 0,64 % K.

Pemberian bahan organik dalam jangka panjang tidak saja mampu mempertahankan lahan dari proses degradasi, tetapi juga memperbaiki kualitasnya, sehingga produktivitasnya tidak menurun dari tahun ke tahun. Teknik pemberiannya dapat dengan cara dibusukkan kemudian diberikan sebagai pupuk organik atau diberikan sebagai mulsa. Hasil penelitian Jumberi *et al.* (1998) menunjukkan bahwa pemberian jerami padi sebanyak 4 t/ha yang dikompos dengan *Trichoderma reesei* di lahan sulfat masam dapat

mengurangi kandungan besi dan sulfat serta meningkatkan ketersediaan unsur K dan hasil padi. Pemberian kangkung liar rawa atau eceng gondok dan abu sekam di lahan sulfat masam sebanyak 1,8 t/ha setara dengan bila bahan organik tersebut dikombinasikan dengan pupuk buatan berupa 30 kg  $P_2O_5$ /ha dan 25 kg  $K_2O$ /ha dapat meningkatkan hasil jagung.

Salah satu upaya untuk meningkatkan efisiensi pemupukan pada lahan rawa adalah pemberian pupuk disesuaikan ketersediaan hara di dalam tanah dan varietas yang ditanam. Dari serangkaian kegiatan penelitian pengelolaan hara oleh Anwar dan Arifin (1993), Anwar *et al.* (1994), Alwi dan Arifin (1995), dan Anwar dan Alwi (1998), dapat disintesis takaran pupuk untuk tanaman padi dan palawija seperti dalam Tabel 3.

**Tabel 3.** Takaran amelioran dan pupuk pada tanaman padi dan palawija di lahan raw

Tanaman	Tipologi lahan	Takaran amelioran dan pupuk (kg/ha)			
		Kapur/abu gergajian	N	$P_2O_5$	$K_2O$
Padi	Potensial	0	45-90	22,5-45	50
	Sulfat masam	1000-3000	67,5-135	45-70	50-75
Kedelai	Potensial	500-1000	22,5 <sup>*)</sup>	22,5	30
	Sulfat masam	1000-2000	22,5 <sup>*)</sup>	45	50
Jagung	Potensial	0	67,5	45-90	50
	Sulfat masam	500	90	45-90	50
Kacang tanah	Potensial	500-1000	22,5	30	50
	Sulfat masam	1000-2000	22,5	60	50
Kacang hijau	Potensial	0	22,5	45	50

<sup>\*)</sup> Perlu diberi rhizobium sebanyak 15 g/kg benih.

Sumber: Anwar dan Arifin (1993), Anwar *et al.* (1994), Alwi dan Arifin (1995), dan Anwar dan Alwi (1998)

Kemudian dari hasil penelitian pemupukan pada tanaman hortikultura di lahan pasang surut oleh (Ismail *et al.*, 1993) merekomendasikan takaran pupuk untuk tanaman tersebut seperti dalam Tabel 4. Kedua tabel tersebut mengindikasikan bahwa ada keragaman takaran amelioran dan pupuk antar tipologi lahan maupun tanaman. Untuk efisiensi, penentuan jenis dan takaran pupuk maupun bahan amelioran yang tepat hendaknya dilakukan uji tanah.

Keseimbangan hara N, P, K dan Ca sangat penting dalam pengelolaan hara dan pemupukan di lahan pasang surut. Hasil penelitian Simatupang *et al.* (1994), Sarwani (1997), dan Ar-Riza *et al.* (2001) menunjukkan bahwa untuk memperoleh hasil optimal, unsur hara harus diberikan secara lengkap

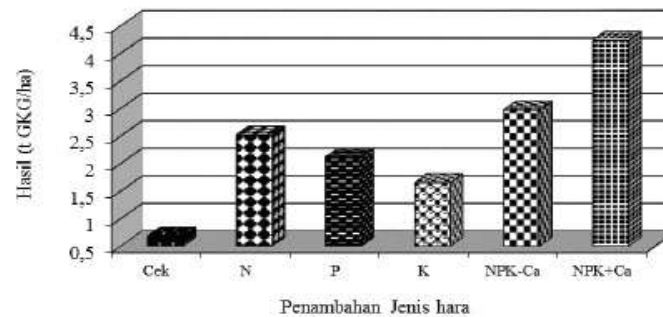
(N, P, K) dan Ca (Gambar 4). Dengan pemberian hara secara lengkap dapat meningkatkan hasil dari 0,64 menjadi 4,24 t/ha.

**Tabel 4.** Takaran pupuk pada tanaman hortikultura di lahan rawa pasang surut

Tanaman	Tipologi	Takaran amelioran dan pupuk (kg/ha)				
		Kapur	Pupuk kandang	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Cabai	Potensial	0	5000	67,5	90	50
	Sulfat masam	1000-2000	5000	67,5	112,5	50
Tomat	Potensial	500	5000	135	90	60
	Sulfat masam	1000-2000	5000	135	90	60
Bawang merah	Potensial	0	10000	90	90	75
	Sulfat masam	1500	10000	90	90	75
Sawi	Potensial	0	5000	90	90	75
	Sulfat masam	1000	5000	90	90	75
Semangka*)	Potensial/salin		10000	0,027	0,020	0,006

\*\*) Satuan per pohon dan ditambah 50 g CuSO<sub>4</sub> dan ZnSO<sub>4</sub> per pohon

Sumber: Simatupang *et al.* (1994), Sarwani (1997), dan Ar-Riza *et al.* (2001)



**Gambar 4.** Pengaruh pemberian hara N,P,K dan Ca terhadap hasil gabah pada lahan sulfat masam (Simatupang *et al.* (1994), Sarwani (1997), dan Ar Riza *et al.* (2001)

Pemupukan berimbang untuk tanaman padi di lahan pasang surut perlu dilakukan. Untuk itu sejak tahun 2011 Balittra telah membuat software Decision Support System (DSS) pemupukan padi. Program ini dibuat berdasarkan data hasil penelitian ameliorasi dan pemupukan lahan rawa untuk tanaman padi mulai dari tahun 1980 hingga 2010. Software ini

memberikan informasi tentang pengelolaan hara N, P, K, kapur dan bahan organik yang bersifat spesifik lokasi. Program ini sudah dapat diunduh di website Balitbangtan.

Upaya meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk dapat dilakukan dengan pemberian pupuk hayati yakni Biotara dan Biosure. Biotara merupakan pupuk hayati yang terdiri dari konsorsia mikroba decomposer (*Trichoderma sp*), pelarut-P (*Bacillus sp*), dan penambat N (*Azospirillum sp*) yang dapat meningkatkan hasil padi dan mengefisienkan penggunaan pupuk anorganik sebesar 30%. Biosure merupakan pupuk hayati terdiri dari konsorsia bakteri pereduksi sulfat (*Desulfovibrio sp*) yang berperan dalam proses reduksi sulfat sehingga dapat meningkatkan pH tanah dan produktivitas tanaman padi (Mukhlis, 2011).

## Penutup

Tanah sulfat masam berkaitan dengan adanya pirit dalam tanah dan bila teroksidasi menghasilkan asam sulfat dan ion  $H^+$ , sehingga tanah menjadi sangat masam (pH 2-3). Berdasarkan kemasaman dan kematangannya, tanah sulfat masam dibagi menjadi dua kelompok yaitu: (1) tanah sulfat masam potensial dan (2) tanah sulfat masam aktual. Tanah sulfat masam potensial dicirikan oleh warna kelabu, masih mentah ( $n > 0,7$ ), dan tingkat kemasaman sedang sampai masam (pH 4,0). Sedangkan tanah sulfat masam aktual dicirikan oleh warna kecoklatan, cukup matang ( $n < 0,7$ ), dan sangat masam (pH < 3,5). Tanah ini memiliki horizon sulfurik yang disebabkan oleh teroksidasinya pirit akibat drainase berlebih. Apabila pH tanah < 3,5 dapat mengakibatkan kisi-kisi liat hancur sehingga ion  $Al^{3+}$  sangat dominan dalam kompleks jerapan.

Degradasi tanah sulfat masam dimulai dari reklamasi lahan menggunakan alat-alat berat, pembuatan saluran drainase berukuran besar, dan kesalahan dalam pengelolaan lahan sehingga terjadi proses oksidasi pirit. Keberadaan pirit di lapisan olah merupakan kendala pemanfaatan lahan sulfat masam. Terbentuknya asam sulfat akibat oksidasi pirit memungkinkan pH tanah menjadi luar biasa masam sehingga tanaman budidaya tidak dapat tumbuh. Umumnya kandungan pirit akan menurun dengan waktu setelah lahan rawa cukup mengalami proses pengeringan dan pembasahan.

Oksidasi pirit merupakan penyebab utama munculnya permasalahan di tanah sulfat masam. Proses oksidasi pirit pada tanah sulfat masam menghasilkan ion-ion  $Fe^{3+}$ ,  $SO_4^{2-}$ , dan  $H^+$ . Adanya ion  $H^+$  menyebabkan

kemasaman tanah meningkat yang diikuti oleh meningkatnya kelarutan  $Al^{3+}$ . Sedangkan pada musim hujan, tanah mengalami proses reduksi yang menyebabkan kelarutan  $Fe^{2+}$  tinggi. Kondisi ini menyebabkan tingkat kesuburan dan produktivitas lahan menurun, lama kelamaan akan menjadi lahan tidur atau terlantar.

Proses pelindian di tanah sulfat masam berlangsung secara alami karena adanya pergantian pasang dan surut air serta musim kemarau dan hujan. Air drainase pada awal musim hujan akan membawa hasil oksidasi dan reduksi, seperti ion-ion  $H^+$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ , dan  $SO_4^{2-}$  yang berakibat pada pencemaran lahan pertanian di sekitarnya. Agar pencemaran terhadap lingkungan dapat ditekan seminim mungkin, maka air drainase perlu diperbaiki kualitasnya dengan menggunakan chemofilter dan tumbuhan biofilter yang dapat mengikat  $Al^{3+}$  dan  $Fe^{2+}$  membentuk kelat, sehingga pencemaran lingkungan akibat kelarutan ion-ion ini dapat dikurangi.

Pemberian bahan amelioran atau bahan pembenah tanah dan pupuk merupakan faktor penting untuk memperbaiki kondisi tanah dan meningkatkan produktivitas lahan. Bahan pembenah tanah tersebut dapat berupa kapur (kalsit dan dolomit) maupun bahan organik (abu sekam, serbuk kayu gergajian, pupuk kandang, kompos jerami, dan kompos limbah pertanian lainnya). Untuk keperluan praktis, secara umum pemberian kapur dalam bentuk kalsit dan dolomit sebanyak 0,5-3,0 ton/ha untuk meningkatkan ketersediaan Ca dan Mg di lahan pasang surut sudah cukup memadai. Pemberian bahan organik dalam jangka panjang tidak saja mampu mempertahankan lahan dari proses degradasi, tetapi juga memperbaiki kualitasnya, sehingga produktivitas lahan tidak menurun. Tanah sulfat masam akan lebih baik produktivitasnya jika diberi bahan organik dan pupuk hayati (Biotara). Pemberian bahan pupuk ini dapat membantu meningkatkan ketersediaan N dan P tanah lebih dari 30% dan hasil padi lebih dari 20%, namun masih belum diketahui interaksinya bila diberikan bersamaan dengan amelioran dan pupuk organik.

## Daftar Pustaka

- Alihamsyah, T. 2002. Optimalisasi pendayagunaan lahan rawa pasang surut. Makalah disajikan pada Seminar Nasional Optimalisasi Pendayagunaan Sumberdaya Lahan di Cisarua tanggal 6-7 Agustus 2002. Puslitbang Tanah dan Agroklimat. 22 hlm.
- Alwi, M., dan M. Z. Arifin. 1995. Respon kacang tanah terhadap pemberian kalsit dan fosfat di lahan pasang surut tanah sulfat masam, sulfat masam

- bergambut dan gambut. Makalah pada Simposium Nasional dan Kongres VI Peragi. Jakarta, 25-27 Juni 1996.
- Ananto, E. E., H. Subagyo, I. G. Ismail, U. Kusnadi, T. Alihamsyah, R. Thahir, Hermanto, dan D. K. S. Swastika. 1998. Prospek pengembangan sistem usaha pertanian modern di lahan pasang surut Sumatera Selatan. P2SLPS2, Badan Litbang Pertanian. 16 hlm.
- Ananto, E. E., A. Supriyo, Soentoro, Hermanto, Y. Soelaeman, I. W. Suastika dan B. Nuryanto. 2000. Pengembangan Usaha Pertanian Lahan Pasang Surut Sumatera Selatan : Mendukung Ketahanan Pangan dan Pengembangan Agribisnis. P2SLPS2. Badan Litbang Pertanian. 18 hlm.
- Anwar, K., dan M. Z. Arifin. 1993. Takaran pupuk NPK pada kedelai di lahan sulfat masam bergambut. *Dalam* Noor *et al.* (eds.) Hasil penelitian Kedelai di Lahan Pasang Surut. Balai Penelitian Tanaman Pangan Banjarbaru.
- Anwar K., dan M. Noor. 1994. Pengaruh pemberian kapur dan fosfat terhadap pertumbuhan dan hasil kedelai di lahan pasang surut sulfat masam. *Dalam* : Risalah Hasil Penelitian Kacang-kacangan 1990-1993. Balittan. Banjarbaru.
- Anwar, K., dan M. Alwi. 1994. Pengaruh pemberian kapur dan fosfat terhadap pertumbuhan dan hasil kedelai di lahan pasang surut sulfat masam tipe C. *Dalam* Risalah Penelitian Kacang-kacangan 1990-1993. Balittan. Banjarbaru.
- Anwar, K. M. Sarwani, dan S. Saragih. 1994. Pengaruh pemberian hara makro dan mikro serta bahan amelioran terhadap pertumbuhan dan hasil padi di lahan pasang surut sulfat masam tipe B. *Dalam*: Ar-Riza, I., S. Saragih, Mukhlis dan M. Noor (Eds.) Prosiding Seminar Serelia Budidaya Padi dan Jagung. Balittan. Banjarbaru.
- Anwar K., dan M. Alwi. 1998. Pemupukan N P dan K pada tanaman pangan di lahan rawa pasang surut. Makalah penunjang dalam Seminar Nasional Hasil Akselerasi Pengembangan Lahan Pasang Surut. Balittra, Puslitbangtan. Banjarbaru.
- Anwar, K. 2006. Peningkatan kualitas tanah sawah dan air buangan di saluran drainase pada tanah sulfat masam. *Disertasi Doktor*. Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- Aribawa. I. B., S. Suping, I. P. G. Widjaja Adhi, and C. J. M. Konsten. 1993. Relation between hidrology and redox status of acid sulphate soils in Pulau Petak, Kalimantan, Indonesia. Hlm. 88-108. *In*. AARD and LAWOO. Paper Workshop on Acid Sulphate Soils in Humid Tropics. 20-22 November 1990. Bogor.
- Ar-Riza, I., Sardjijo dan Chaerudin. 2001. Pengaruh pemberian pupuk P dan K terhadap keragaan pertumbuhan dan hasil padi di lahan sulfat masam. Makalah pada Seminar Nasional Pengelolaan Sumberdaya Lahan dan Pupuk. Cisarua, 12-13 November 2001.
- Becker, M., and F. Ash. 2005. Iron toxicity in rice condition and management concept. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168:558-573.

- Biro Pusat Statistik. 2008. Survei Susut Panen MT 2007/2008. Kerjasama BPS, Ditjen Tanaman Pangan, Badan Pengendalian Bimas, dan Bolog.
- Dent, D. L. 1986. Acid sulphate soils: A baseline for research and development, Pub. 39, Int. Inst. Land Reclamation and Improvement, Wageningen. 204 p.
- Direktorat Rawa dan Pantai. 2006. Pengembangan Daerah Rawa. 172 hal. Direktorat Rawa dan Pantai, Dirjen Sumberdaya Air. Kementrian Pekerjaan Umum. Jakarta.
- Dobermann, A., and T. Fairhurst. 2000. Rice, Nutrient Disorders and Nutrient Management. Handbook series. Potash and Phosphate Institute (PPI). Potash and Phosphate Institute of Canada (PPIC) and International Rice Institute. 191 p.
- Hanhart, K., and Duong Van Ni. 1993. Water management on rice fields at Hoa An, Mekong Delta. Vietnam. In. Ho Chi Minh City Symposium on Acid Sulphate Soils. ILRI. Publ. 53. Int. Inst. Land Reclamation and Improvement, Wageningen. 425 pp.
- Ismail, I. G., T. Alihamsyah, I. P. G. Widjaja Adhi, Suwarno, T. Herawati, R. Thahir, dan D. E. Sianturi. 1993. Sewindu Penelitian Pertanian di Lahan Rawa: Kontribusi dan Prospek Pengembangan. Proyek Swamps II. Puslitbang Tanaman Pangan, Bogor.
- Jumberi, A., A. Supriyo dan S. Raihan. 1998. Penggunaan bahan amelioran untuk meningkatkan produktivitas tanaman pangan di lahan pasang surut. *Dalam Sabran et al.* (Eds.). Prosiding Seminar Nasional Hasil Penelitian Menunjang Akselerasi Pengembangan Lahan Pasang Surut. Balittra. Banjarbaru. Kollmeier, M., P. Dietrich, C. S. Bauer, W. J. Horst, and R. Hedrich. 2001. Aluminum activates a citrate permeable anion channel in the aluminum sensitive zone of the maize root apex. A comparison between an aluminum sensitive and an aluminum resistant cultivar. *Plant Physiol.* 126:397-410.
- Konstens, C. J. M., S. Suping, I. B. Aribawa, and I. P. G. Widjaja-Adhi. 1990. Chemical processes in acid sulphate soil in Pulau Petak, South and Central Kalimantan. Hlm. 109-136 *In. AARD/LAWOO* (Ed.). Paper Workshop on Acid Sulphate Soils In The Humik Tropics. Bogor.
- Kselik, R. A. L. 1990. Water management on Acid Sulphate Soil at Pulau Petak, Kalimantan. Hlm. 78-95. *In. AARD/LAWOO* (Ed.). Paper Workshop on Acid Sulphate Soils In The Humik Tropics. Bogor.
- Luki, U., R. Syahni, dan R. Rasyidin. 1990. Pengaruh lamanya waktu penggenangan dan pencucian terhadap beberapa ciri kimia tanah dan pertumbuhan tanaman padi sawah. Hlm. 439-452 *Dalam.* Prosiding Pengelolaan Sawah Bukaak Baru Menunjang Swasembada Pangan dan Program Transmigrasi. Balai Penelitian Tanaman Pangan Sukarami. Padang.

- Mehbaran, P., A. Abdol Zadeh, and H. Reza Sadeghipour. 2008. Iron toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) under different potassium nutrition. *Asian J. of Plant Sci.* 1-9.
- Moorman, F. R., and N. Van Breeman. 1978. Rice: Soil water and land. Hlm. 87-102. International Rice Research Institute. Los Banos, Philippines.
- Moses, C. O., and J. S. Hermann. 1991. Pyrite oxidation at circumneutral pH. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 55:471-482.
- Mukhlis, H. 2011. Uji Keefektivan Pupuk Hayati Biotara Terhadap Tanaman Padi di Lahan Rawa Sulfat Masam. Laporan Hasil Penelitian. Kerjasama Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa dengan PT. Pupuk Kaltim. Banjarbaru.
- Mulyanto, B., B. Sumawinata, Suwardi, dan G. Djajakirana. 1999. Sifat mineralogi liat tanah berpotensi sulfat masam pada Sistem Pengelolaan Lahan Orang Banjar (SPLOB) di Kalimantan Selatan. *Jurnal Ilmiah Pertanian. GAKURYOKU.* 5(4): 273-281.
- Murtalaksono, K., Sudarmo, A. Sutandi, G. Djajakirana, dan U. Sudadi. 2001. Model sistem drainase dalam hubungannya dengan oksidasi pirit serta pengaruhnya terhadap sifat kimia tanah dan kualitas air pada tanah sulfat masam. Laporan Hasil Penelitian Hibah Bersaing Perguruan Tinggi T. A. 1998-2001. Fakultas Pertanian. Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- Nugroho, K. Alkasuma, Paidi, W. Wahdini, Abdurachman, H. Suhardjo, dan I. P.G. Widjaja-Adhi. 1992. Peta areal potensial untuk pengembangan pertanian lahan rawa pasang surut, rawa dan pantai. Proyek Penelitian Sumber Daya Lahan. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bogor.
- Nursyamsi, D., M. E. Suryadi, A. Hasanudin, dan S. Abdullah. 2001. Pengaruh pengelolaan tanah dan air terhadap hara air genangan dan hasil padi. *Jurnal Penelitian Pertanian* 20:50-59.
- Pons, L. J., and Van Breemen. 1982. Factors influencing the formation of potential acidity in tidal swamps. Proceeding of the Bangkok Symposium on Acid Sulphate Soil. In. H. Dost and N. Van Breemen (Eds.). International Institute for Land Reclamation and Improvement. ILRI. Wagwningen. The Netherlands.
- Prasetyo, B. H. 2007. Genesis tanah sawah bukaan baru. Hlm 25-52. *Dalam Tanah Sawah Bukaan Baru.* Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Bogor.
- Priatmadi, B. J., dan E. Purnomo. 2000. Karakterisasi tanah sulfat masam dan zonase produktivitas padi. *J. Tanah Tropika* 11:59-68
- Pujiastuti, E. S. 1995. Bentuk-bentuk besi dalam tanah yang disawahkan pada dua tingkat pengelolaan air. *Tesis.* Program Pascasarjana IPB.
- Purnomo, E., S. M. Gelling, W. T. G. Van Someren. 1999. Spatial and temporal variability of some chemical composition of tidal swamp irrigation water in acid sulphate soil of South Kalimantan. *J. Tanah Tropika* 9:7-14.

- Rachim, A., K. Murti Laksono, A. Sastiono, dan Sudradjad. 2000. Peningkatan produktivitas tanah sulfat masam untuk budidaya tanaman palawija melalui pencucian dan penggunaan amelioran. Laporan Hasil Penelitian Hibah Bersaing Perguruan Tinggi T. A. 1997-2000. Fakultas Pertanian. Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- Ritsema, C. J., J. E. Groenenberg, and E. B. A. Bisdom. 1992. The transformation of potential into actual acid sulphate soils studied in column experiments. *Geoderma* 55:259-271.
- Ritung, S. 2011. Karakteristik dan sebaran lahan sawah di Indonesia. Hlm 83-98. *Dalam*. Prossiding Seminar Nasional Teknologi Pemupukan dan Pemulihan lahan Terdegradasi. Balai Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian. Bogor.
- Sarwani, M. 1997. NPK jangka panjang pada padi IR64 di lahan pasang surut sulfat masam. *Dalam* Maamun *et al.* (ed) Prosiding Seminar Pembangunan Pertanian Berkelanjutan Menyongsong Era Globalisasi. Peragi Komda Kalimantan Selatan.
- Simatupang, R. S., I. Ar-Riza dan Y. Raihana. 1994. Pengaruh takaran, bentuk dan waktu pemupukan nitrogen terhadap pertumbuhan dan hasil padi di lahan potensial. Pros. Serealia I. Budidaya Padi Lahan Pasang Surut dan Lebak. Balai Penelitian Tanaman Pangan Lahan Rawa. Banjarbaru. hlm. 81-90.
- Smilde, K. W. 1990. Lime and fertilizer application for crop yield improvement. Hlm. 223-237 *In*. AARD/LAWOO (Ed.). Paper Workshop on Acid Sulphate Soils In The Humik Tropics. Bogor.
- Soil Survey Staff. 1996. Artificial wetlands and water quality improvement. *Environment International* 26:442-447.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy A basic System of Soil Clasification for Making and Interpreting Soil Sorveys. 2<sup>nd</sup> Ed. Agriculture Handbook Number 436. United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Services. Washington DC. 869 p.
- Subagyo, K. H. Suwardjo, A. Abas, dan I. P. G. Widjaja-Adhi. 1994. Pengaruh pencucian, kapur dan pemupukan K terhadap sifat kimia tanah , kualitas air dan hasil padi pada lahan sulfat masam di Unit Tatas, Kalimantan Tengah. *Pemberitaan Penelitian Tanah dan Pupuk* (12):35-47.
- Takahashi, T., C. Y. Park, H. Nakajima, H. Sekiya, and K. Toriyana. 1999. Ferric ion transformation in soils with rotation of irrigated rice and effect on soil tillage properties. *Soil Sci. Plant Nutr.* 45:163-173.
- Van Breemen, N., and L. J. Pons 1978. Soil ripening and soil classification. Pub. 13, Int. Inst. Land Reclamation and Improvement. Wageningen.138 hlm. Van Bremen, N. 1993. Environmental aspects of acid sulphate soil. Hlm. 391-402 *In*. Dent, D. L. and M. E. F. van mensvoor (Eds.). Selected Paper of the Ho Chi Minh City Simposium on Acid Sulphate Soils. Vietnam. March 1992.

Van Mensvoort, M. E. F., and D. L. Dent. 1998. Acid Sulphate Soil. Hlm. 301-337 *In*. Lal, R., W. H., Blum, C. Valentine, and B. A. Steward (Eds.). Method for Assessment of Soil Degradation. Florida. CRC Prees LLC.

Wakao, N., M. Mishina, Y. Sakurai, and H. Shiota. 1984. Bacterial pyrite oxidation III. Adsorption of Thiobacillus ferrooxidans on solid surfaces and its effect on iron release from pyrite. *J. Gen. Appl. Microbiol.*30:63-77.

Widjaja-Adhi, I. P. G., K. Nugroho, S. Didi Ardi, dan A. S. Karama. 1992. Sumberdaya Lahan Rawa: Potensi, keterbatasan, dan pemanfaatan. Hlm. 19-38. *Dalam*. Sutjipto, P. dan S. Mahyudin (Eds.). Pengembangan Terpadu Pertanian Lahan Rawa Pasang Surut dan Lebak. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan. Badan penelitian dan Pengembangan Pertanian. Departemen Pertanian.