

Kandungan Fosfor Tanaman Padi dan Emisi Karbon Tanah Gambut yang Diaplikasi dengan Amelioran Fe³⁺ dan Fosfat Alam pada Beberapa Tingkat Pemberian Air

Nelvia¹

Makalah diterima 13 November 2008 / disetujui 23 Juli 2009

ABSTRACT

The Use of Ameliorant Fe³⁺ and Rock Phosphates in Peat Soil at Several Water Condition on the P Content of Plants Rice and Carbon Emission (Nelvia): The addition of ameliorant Fe³⁺ and rock phosphates containing high Fe cation can reduce effect of toxic organic acids, increase peat stability through formation of complex compounds and reduce carbon emission. The research was conducted in the laboratory and green house of the Departement of Soil Science, Faculty of Agriculture, Bogor Agriculture University. Peat samples with hemic degree of decomposition were taken from Riau. Rock phosphates were taken from the rock phosphates of PT. Petrokimia Gresik, Christmas Island phosphates, and Huinan China and FeCl₃·6H₂O was used as the other Fe³⁺ source. The aims of the research were to study (a) the effect of the applications of ameliorant Fe³⁺ and rock phosphates on the P content of plants dan (b) the effect of the application ameliorant Fe³⁺ and the contribution of Fe cation in rock phosphates in the decrease of carbon emission. The results showed that the P content of plants rice increased 58 – 286% with the applications of ameliorant Fe³⁺ and rock phosphates. The estimation of carbon loss through CO₂ and CH₄ emissions from peats if planted continuously with rice was around 2.5, 2.2 and 2.6 Mg of C ha⁻¹ year⁻¹ respectively in field capacity condition, two times of field capacity condition, and 5 cm of saturated condition. The application of ameliorant Fe³⁺ and rock phosphates containing high Fe cation increased the stability of peats and reduced the carbon loss around 1.7 Mg of C ha⁻¹ year⁻¹ (64%) in 5 cm of saturated condition, 1.3 Mg of C ha⁻¹ year⁻¹ (58%) in two times of field capacity condition, and 1.0 Mg of C ha⁻¹ year⁻¹ (41%) in field capacity condition.

Keywords: Amelioran Fe³⁺, CH₄ and CO₂ emission, peat soil, rock phosphate, water condition

PENDAHULUAN

Pemanfaatan lahan gambut sangat luas oleh masyarakat baik untuk tanaman pangan dalam keadaan tergenang (anaerob) untuk tanaman padi maupun didrainase (aerob) untuk tanaman perkebunan dan palawija. Masalah yang timbul bila lahan gambut dikelola untuk usaha pertanian baik dalam kondisi aerob maupun anaerob adalah terjadinya kehilangan C-organik dalam bentuk gas CO₂ dan CH₄. Kedua gas tersebut berkontribusi terhadap pemanasan global (“*global warming*”).

Konsentrasi CO₂ dan CH₄ di atmosfer ditentukan oleh laju emisi kedua gas tersebut dari bumi. Laju emisi CH₄ tergantung pada kondisi air tanah, lahan

gambut yang tergenang mengemisikan CH₄ lebih besar dari pada lahan tidak tergenang (Boer *et al.*, 1996). Menurut Husin dan Murdiyarso (1995) keragaman emisi CH₄ dari lahan sawah terutama disebabkan oleh kondisi air, emisi CH₄ terbesar terjadi pada sawah yang digenangi terus menerus dan yang terkecil dari sawah yang diairi macak-macak. Difusi O₂ ke dalam tanah dalam keadaan tergenang sangat rendah, sementara O₂ yang tersekap lama kelamaan akan habis digunakan oleh bakteri aerob akibatnya tanah semakin reduktif. Hasil penelitian Sabiham dan Sulistyono (2000) di laboratorium menunjukkan bahwa produksi CO₂ tertinggi diperoleh pada inkubasi aerob dan berbeda nyata dengan inkubasi anaerob,

¹Jurusan Budidaya Pertanian, Program Studi Ilmu Tanah, Universitas Riau, Pekanbaru - Riau
Telp/Hp/Email : 0761-63270-63271 (K), 0761-38316 (R) / 081371248740 / nelvia@yahoo.co.id
J. Tanah Trop., Vol. 14, No. 3, 2009: 195-204
ISSN 0852-257X

sedangkan produksi CH_4 tertinggi pada inkubasi anaerob dan berbeda nyata dengan inkubasi aerob.

Salah satu usaha untuk menekan kehilangan C-organik atau meningkatkan stabilitas gambut adalah melalui pemberian bahan amelioran seperti kation polivalen. Kation polivalen seperti Fe^{3+} , Cu^{2+} dan Zn^{2+} dapat menurunkan reaktivitas asam-asam organik yang bersifat toksik, sekaligus dapat meningkatkan stabilitas gambut melalui mekanisme erapan kation pada tapak-tapak reaktif senyawa-senyawa organik sehingga membentuk senyawa kompleks (kelat) yang stabil (Tan, 1998). Saragih (1996) melaporkan bahwa kation Fe^{3+} memiliki afinitas tertinggi dan paling stabil berinteraksi dengan asam-asam organik dibandingkan dengan kation lain yang dicobakan dengan urutan $\text{Fe}^{3+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Al}^{3+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{Zn}^{2+}$. Selanjutnya Sabiham dan Sulistyono (2000) melaporkan bahwa pemberian kation Fe^{3+} sebanyak 5% erapan maksimum dapat menurunkan 22,94% CO_2 dan 23,01% CH_4 pada tanah gambut Dendang, Jambi dan 27,67% CO_2 dan 32,97% CH_4 pada tanah gambut Sampit, Kalimantan Tengah, dengan erapan maksimum Fe^{3+} pada kedua gambut tersebut sebesar $25.776 \mu\text{g g}^{-1}$ (Saragih, 1996) dan $16.841 \mu\text{g g}^{-1}$ (Salampak, 1999). Penambahan 15 dan 30 g $\text{Fe}(\text{OH})_3$ per kg tanah menurunkan total emisi CH_4 sebesar 43% dan 84% selama pertumbuhan padi (Jackel dan Schnell, 2000). Selain meningkatkan stabilitas gambut, kelat biasanya mempunyai kemampuan meretensi P. Pemberian kation Fe^{3+} , Al^{3+} dan Cu^{2+} pada tanah gambut dapat meningkatkan retensi P bila dibandingkan dengan tanpa pemberian kation-kation tersebut (Rachim, 1995), kapasitas retensi P pada tanah gambut meningkat dengan meningkatnya kandungan Fe^{3+} dan Al^{3+} (Suryanto, 1993). Dengan demikian P dapat diikat lebih kuat pada tanah gambut melalui jembatan kation sehingga tidak mudah terlindi (Mattingly, 1985). Penggunaan amelioran Fe^{3+} dan fosfat alam yang banyak mengandung Fe dan kation polivalen lainnya sebagai sumber P diharapkan dapat mengkonservasi P dan meningkatkan stabilitas tanah gambut.

Berdasarkan uraian diatas perlu dilakukan penelitian untuk mempelajari kandungan P tanaman dan kontribusi Fe fosfat alam dengan kadar Fe berbeda terhadap penurunan emisi karbon melalui penurunan laju emisi CO_2 dan CH_4 dari tanah gambut baik dengan maupun tanpa pemberian amelioran Fe^{3+} dalam kondisi tergenang dan tidak tergenang.

BAHAN DAN METODE

Contoh Tanah Gambut

Contoh tanah gambut yang digunakan diambil dari lokasi lahan transmigrasi lokal yang terletak di Desa Pekan Tua, Kecamatan Tempuling, Kabupaten Indragiri Hilir, Provinsi Riau, Sumatera, dengan tingkat dekomposisi (kematangan) hemik dengan sifat-sifat seperti disajikan pada Tabel 1.

Bahan Amelioran dan fosfat Alam

Penelitian ini menggunakan $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ sebagai sumber amelioran Fe^{3+} dan fosfat alam sebagai sumber P. Fosfat alam yang digunakan terdiri atas tiga jenis yaitu fosfat alam dari Huinan China, Christmas Island dan PT Petrokimia Gresik dengan sifat-sifat seperti disajikan pada Tabel 2.

Pelaksanaan Percobaan

Penelitian ini dilaksanakan di laboratorium Kimia dan Kesuburan Tanah dan di rumah kaca, Departemen Tanah, Fakultas Pertanian IPB, Kampus IPB Darmaga. Penelitian dilaksanakan mulai bulan Oktober 2003 sampai April 2004.

Takaran amelioran dan fosfat alam didasarkan pada erapan maksimum kation Fe^{3+} dan erapan maksimum P pada bahan tanah gambut. Prosedur penetapan kurva erapan digunakan metode Fox dan Kamprath yang dimodifikasi oleh Widjaja-Adhi *et al.* (1990), sedangkan perhitungan erapan maksimum ditetapkan dengan metode Langmuir (Syers *et al.*, 1973). Setelah dilakukan penetapan erapan maksimum (b) maka diperoleh erapan maksimum kation Fe^{3+} sebesar 14.286 mg g^{-1} dan erapan maksimum P sebesar 909 mg g^{-1} .

Percobaan1: Pengaruh Pemberian Amelioran Fe^{3+} dan Fosfat Alam pada Tanah Gambut terhadap Kandungan P, K, Ca dan Mg Tanaman

Percobaan disusun berdasarkan rancangan Split-split plot dalam Rancangan Acak Kelompok (RAK). Sebagai petak utama adalah kondisi air: 2 x kapasitas lapang (KA 600%) dan tergenang 5 cm, anak petak adalah 3 jenis fosfat alam: fosfat alam dari Huinan China, Christmas Island dan PT Petrokimia Gresik. Sebagai anak-anak petak takaran fosfat alam (7 taraf): kontrol, (25, 50 dan 75% erapan maksimum P) masing-masing dengan tanpa pemberian amelioran Fe^{3+} dan (25, 50 dan 75% erapan maksimum P)

Tabel 1. Sifat-sifat kimia, kadar abu, lignin, selulosa dan hemiselulosa serta volume serat bahan tanah gambut.

Sifat kimia, kadar abu, komponen bahan tanah organik dan volume serat	Hasil analisis
pH H ₂ O (1:5)	3,50
C-organik (%)	56,40
N-total (%)	1,15
P (µg g ⁻¹) (ekstraksi Bray I)	20,90
P (µg g ⁻¹) (ekstraksi HCl 25%)	175,62
Basa-basa (ekstraksi HCl 25%) :	
Ca (µg g ⁻¹)	2187,00
Mg (µg g ⁻¹)	573,00
K (µg g ⁻¹)	166,00
Na (µg g ⁻¹)	74,00
Basa-basa (ekstraksi NH ₄ OAc pH 7,0) :	
Ca (cmol ⁽⁺⁾ kg ⁻¹)	6,57
Mg (cmol ⁽⁺⁾ kg ⁻¹)	2,48
K (cmol ⁽⁺⁾ kg ⁻¹)	0,31
Na (cmol ⁽⁺⁾ kg ⁻¹)	0,45
KTK (cmol ⁽⁺⁾ kg ⁻¹)	164,75
KB (%)	7,00
Kation mikro (ekstraksi HClO ₄ + HNO ₃ pekat) :	
Fe (µg g ⁻¹)	3936,00
Cu (µg g ⁻¹)	5,00
Zn (µg g ⁻¹)	222,00
Mn (µg g ⁻¹)	38,00
Kation mikro (ekstraksi 0,05 N HCl) :	
Fe (µg g ⁻¹)	7,04
Cu (µg g ⁻¹)	0,28
Zn (µg g ⁻¹)	9,10
Mn (µg g ⁻¹)	31,72
Kadar abu (%)	3,67
Lignin (%)	71,46
Selulosa (%)	14,73
Hemiselulosa (%)	0,85
Volume serat	4/10

masing-masing dengan pemberian amelioran Fe³⁺ sebesar 5% erapan maksimumnya.

Setiap pot diisi dengan tanah gambut sebanyak 4 kg setara bobot kering oven 105°C. Tanaman indikator

adalah tanaman padi sawah kultivar IR-64. Amelioran Fe³⁺ dan fosfat alam masing-masing diberikan 1 bulan dan 2 minggu sebelum tanam dengan cara mencampurkannya dengan bahan tanah gambut secara merata. Pupuk dasar yang digunakan adalah Urea, KCl dan (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O masing-masing dengan dosis 350 kg ha⁻¹, 150 kg ha⁻¹, dan 10 µg g⁻¹, semua pupuk dasar diberikan satu hari sebelum tanam. Pupuk unsur mikro CuSO₄ dan ZnSO₄ masing-masing dengan dosis 1 kg ha⁻¹ diberikan 4 kali dengan disemprotkan ke daun pada umur 2, 4, 6 dan 7 minggu setelah tanam. Dosis pupuk dihitung dengan asumsi berat tanah 1 ha adalah 300.000 kg dengan bobot isi 0,15 g cm⁻³ (Driessen, 1978). Percobaan rumah kaca ini dilakukan selama 2 bulan atau sampai tanaman berumur 8 minggu setelah tanam, pengamatan dilakukan terhadap bobot kering tanaman dan analisis kandungan hara P, K, Ca dan Mg tanaman dan pengamatan secara visual. Data hasil pengukuran dianalisis secara statistik dengan menggunakan sidik ragam dan nilai rata-rata dibandingkan dengan menggunakan metode *Duncan's New Multiple Range Test* (DNMRT) pada α = 5%.

Percobaan 2: Pengaruh Pemberian Amelioran Fe³⁺ dan Fosfat Alam pada Tanah Gambut dengan Beberapa Kondisi Air terhadap Emisi CO₂ dan CH₄

Percobaan disusun berdasarkan rancangan Split-split plot dalam perancangan lingkungan Rancangan Acak Kelompok (RAK), setiap perlakuan diulang sebanyak 3 kali. Sebagai petak utama adalah kondisi air: kapasitas lapang (KA 330%), dua kali kapasitas lapang (KA 660%) dan Tergenang 5 cm, anak petak 3 jenis fosfat alam: fosfat alam dari Huinan China, Christmas Island dan PT Petrokimia Gresik), dan anak-anak petak takaran fosfat alam (7 taraf) : kontrol, (25, 50 dan 75% erapan maksimu P) masing-masing dengan tanpa pemberian amelioran Fe³⁺ dan (25, 50 dan 75% erapan maksimum P) masing-masing dengan pemberian amelioran Fe³⁺ sebesar 5% erapan maksimumnya. Cara pemberian amelioran dan fosfat alam sama dengan pada percobaan 1, demikian juga dengan jenis, takaran dan cara pemberian pupuk dasar dan unsur mikro. Gas CO₂ dan CH₄ ditangkap dengan menggunakan sungkup (Chamber) yang terbuat dari flexiglass ukuran 0,75 m x 0,20 m x 0,20 m (sesuai dengan luas permukaan pot) dan dilengkapi dengan termometer dan kipas angin. Sampel udara dalam sungkup diambil dengan siring dengan interval waktu 5 menit (0, 5, 10, 15 dan 20 menit) pada fase awal

Tabel 2. Sifat-sifat kimia, kadar kation polivalen dan kadar air fosfat alam.

Sifat kimia dan kadar air	Jenis Fosfat Alam		
	Huinan China	Christmas Island	Petrokimia Gresik
(HClO ₄ + HNO ₃ pekat)			
P Total (%)	14,25	13,65	10,92
Ca (%)	20,80	20,68	11,25
Mg (%)	0,18	0,60	0,19
Kation polivalen :			
Fe (%)	0,77	2,40	5,10
Al (%)	0,96	4,26	6,11
R ₂ O ₃ (Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃) (%)	2,28	11,19	18,72
Mn (µg g ⁻¹)	278,00	614,20	1824,90
Zn (µg g ⁻¹)	2248,20	2500,90	2967,40
Cu (µg g ⁻¹)	9,80	108,10	4850,60
Kadar air (%)	2,76	2,90	9,33

pertumbuhan vegetatif (4 MST) dan pertumbuhan vegetatif maksimum (8 MST) dan disimpan dalam venojet. Analisis konsentrasi CO₂ dan CH₄ dengan teknik gas kromatografi. Penghitungan laju emisi CH₄ dan CO₂ menggunakan rumus (Boer *et al.*, 1996). Data hasil pengukuran dianalisis secara statistik dengan menggunakan sidik ragam dan nilai rata-rata dibandingkan dengan menggunakan metode *Duncan's New Multiple Range Test* (DNMRT) pada $\alpha = 5\%$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Pemberian Amelioran Fe³⁺ dan Fosfat Alam pada Tanah Gambut terhadap kandungan hara P, K, Ca dan Mg tanaman

Pemberian fosfat alam sebesar 25 hingga 75% erapan maksimum P baik pada kondisi 2 kali kapasitas lapang maupun kondisi tergenang 5 cm meningkatkan kandungan P, K, Ca dan Mg tanaman dibandingkan kontrol, dan meningkat lebih besar bila diikuti dengan pemberian amelioran Fe³⁺ (Tabel 3). Bila dibandingkan dengan kontrol kandungan P tanaman meningkat ± 3 kalinya dan ± 4 kalinya berturut-turut pada tanpa dan diikuti pemberian amelioran Fe³⁺ pada kondisi 2 kali kapasitas lapang. Dari segi kecukupan hara tanaman yang didasarkan pada kriteria yang dikemukakan oleh Jones *et al.* (1991), untuk hara P, K, Ca dan Mg masing-masing sebesar 0,09 – 0,18; 1,00 – 2,22; 0,4 – 1,2 dan 0,2 – 0,3%, kadar hara P, K, Ca dan Mg secara umum tergolong tinggi.

Fenomena tersebut erat kaitannya dengan peningkatan ketersediaan P melalui pemberian fosfat alam, selain itu juga menambah unsur makro lain seperti Ca, Mg dan unsur mikro seperti Cu, Mn, dan Zn (Tabel 2). Pemberian amelioran Fe³⁺ mampu menekan pengaruh meracuni asam-asam fenolat yang berpengaruh terhadap serapan P, Mg dan K melalui pembentukan senyawa kompleks yang relatif stabil. Tadano *et al.* (1991) mengatakan bahwa konsentrasi asam-asam fenolat yang tinggi menyebabkan serapan P, K, Cu dan Zn oleh tanaman padi menurun. Asam ferulat mempunyai efek toksik paling tinggi dibandingkan dengan asam p-kumarat > vanilat \approx siringat > p-hidroksi benzoat, dan sifat toksiknya bagi tanaman pada konsentrasi yang berbeda (Tadano *et al.*, 1992). Namun bila dilihat bobot kering tanaman padi umur 48 hari tergolong sangat rendah yaitu berkisar 0,26 hingga 1,30 g per pot (Tabel 3), ini menunjukkan bahwa pertumbuhan tanaman padi pada tanah gambut dalam penelitian ini sangat tertekan. Menurut Hartley dan Whitehead (1984) tanaman padi akan keracunan bila konsentrasi asam-asam fenolat seperti: asam p-hidroksi benzoat, p-kumarat, vanilat, sinapat, ferulat dan siringat masing-masing berkisar 0,64 -1,21 mM, 0,09 – 0,36 mM, 0,08 – 0,17 mM, 0,01 – 0,09 mM, 0,01 – 0,1 mM dan 0,01 – 0,04 mM. Serapan K oleh tanaman barley sangat terhambat karena adanya asam-asam fenolat dengan konsentrasi 250 µM; asam silisilat dan ferulat menyebabkan terhambatnya serapan K dan P oleh tanaman gandum; serta serapan P oleh tanaman kedelai terganggu oleh adanya asam

Tabel 3. Bobot kering tanaman padi umur 48 HST dan kandungan hara P, K, Ca dan Mg tanaman akibat pemberian amelioran Fe³⁺ dan fosfat alam.

Kondisi Air	Perlakuan Jenis dan Dosis Fosfat Alam	Bobot Kering (g pot ⁻¹)	Kandungan Hara Tanaman			
			P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)
Dua Kali Kapasitas Lapang	Kontrol (0%)	0,2633 ^{lm}	0,53 ^e	0,45 ^{hi}	0,24 ^{fg}	0,34 ^{h-j}
	Ci 25% P	0,1333 ^m	2,14 ^{a-c}	0,76 ^{c-l}	0,48 ^{b-f}	0,46 ^{a-i}
	Ci 50% P	0,3767 ^{h-m}	2,31 ^{a-c}	0,77 ^{b-l}	0,42 ^{b-g}	0,46 ^{a-i}
	Ci 75% P	0,3100 ^{k-m}	2,38 ^{a-c}	0,56 ^{e-l}	0,38 ^{c-g}	0,46 ^{a-i}
	Ci 25% P + 5% Fe	0,4167 ^{g-m}	2,40 ^{a-c}	0,82 ^{b-l}	0,62 ^{a-e}	0,55 ^{a-e}
	Ci 50% P + 5% Fe	0,6867 ^{b-i}	2,55 ^{a-c}	1,01 ^{b-l}	0,94 ^a	0,54 ^{a-f}
	Ci 75% P + 5% Fe	0,6667 ^{b-j}	2,56 ^{ab}	0,89 ^{b-l}	0,63 ^{a-d}	0,53 ^{a-f}
	Ch 25% P	0,5133 ^{d-j}	1,98 ^{a-c}	0,83 ^{b-l}	0,41 ^{b-g}	0,47 ^{a-i}
	Ch 50% P	0,4567 ^{f-m}	2,06 ^{a-c}	0,93 ^{b-l}	0,55 ^{b-f}	0,50 ^{a-i}
	Ch 75% P	0,4933 ^{e-l}	2,29 ^{a-c}	0,92 ^{b-l}	0,52 ^{c-f}	0,56 ^{a-e}
	Ch 25% P + 5% Fe	0,7300 ^{b-g}	2,27 ^{a-c}	1,11 ^{b-g}	0,64 ^{a-d}	0,52 ^{a-g}
	Ch 50% P + 5% Fe	0,8533 ^{b-d}	2,45 ^{a-c}	1,19 ^{b-e}	0,92 ^a	0,63 ^{ab}
	Ch 75% P + 5% Fe	0,7567 ^{b-g}	2,44 ^{a-c}	1,27 ^{b-d}	0,75 ^{ab}	0,62 ^{a-c}
	Gr 25% P	0,5367 ^{d-l}	1,98 ^{a-c}	0,61 ^{e-l}	0,39 ^{c-g}	0,39 ^{e-i}
	Gr 50% P	0,4700 ^{e-l}	1,88 ^{a-d}	0,70 ^{d-l}	0,52 ^{b-f}	0,46 ^{a-i}
	Gr 75% P	0,8100 ^{b-d}	1,04 ^{ed}	0,72 ^{d-l}	0,49 ^{b-f}	0,50 ^{b-i}
	Gr 25% P + 5% Fe	0,9300 ^b	2,31 ^{a-c}	1,00 ^{b-l}	0,67 ^{a-c}	0,55 ^{a-e}
	Gr 50% P + 5% Fe	0,9367 ^b	2,76 ^a	1,06 ^{b-h}	0,76 ^{ab}	0,64 ^a
Gr 75% P + 5% Fe	0,8967 ^{bc}	2,73 ^a	1,03 ^{b-h}	0,52 ^{b-f}	0,60 ^{a-d}	
Tergenang 5 cm	Kontrol (0%)	0,3367 ^{l-m}	0,33 ^e	0,39 ^f	0,09 ^g	0,21 ^f
	Ci 25% P	0,3467 ^{i-m}	1,75 ^{a-d}	0,79 ^{b-i}	0,29 ^{e-g}	0,38 ^{e-j}
	Ci 50% P	0,4930 ^{e-l}	1,87 ^{a-d}	0,88 ^{b-i}	0,32 ^{c-g}	0,37 ^{f-j}
	Ci 75% P	0,2833 ^{lm}	1,74 ^{b-d}	0,96 ^{b-i}	0,33 ^{c-g}	0,42 ^{d-i}
	Ci 25% P + 5% Fe	0,6567 ^{b-k}	2,03 ^{a-c}	0,99 ^{b-i}	0,34 ^{c-g}	0,36 ^{f-j}
	Ci 50% P + 5% Fe	0,6600 ^{b-j}	2,14 ^{a-c}	1,41 ^b	0,47 ^{b-f}	0,47 ^{b-i}
	Ci 75% P + 5% Fe	0,5800 ^{c-l}	2,06 ^{a-c}	1,36 ^{bc}	0,41 ^{b-g}	0,43 ^{d-i}
	Ch 25% P	0,6533 ^{b-k}	1,91 ^{a-d}	0,54 ^{g-i}	0,25 ^{fg}	0,45 ^{b-i}
	Ch 50% P	0,7167 ^{b-h}	1,95 ^{a-c}	0,74 ^{c-i}	0,22 ^{fg}	0,42 ^{e-i}
	Ch 75% P	0,7233 ^{b-h}	1,97 ^{a-c}	0,78 ^{b-i}	0,30 ^{d-g}	0,43 ^{d-i}
	Ch 25% P + 5% Fe	0,6300 ^{b-k}	1,97 ^{a-c}	0,80 ^{b-i}	0,32 ^{c-g}	0,45 ^{c-i}
	Ch 50% P + 5% Fe	0,7600 ^{b-g}	2,05 ^{a-c}	1,16 ^{b-f}	0,54 ^{b-f}	0,47 ^{a-i}
	Ch 75% P + 5% Fe	0,7433 ^{b-g}	2,03 ^{a-c}	0,90 ^{b-i}	0,26 ^{e-g}	0,44 ^{d-i}
	Gr 25% P	0,5367 ^{d-l}	1,03 ^{de}	0,49 ^{g-i}	0,21 ^{fg}	0,33 ^{ij}
	Gr 50% P	0,5267 ^{d-l}	1,59 ^{cd}	0,44 ^{hi}	0,26 ^{e-g}	0,38 ^{e-j}
	Gr 75% P	0,6633 ^{b-j}	1,66 ^{b-d}	0,93 ^{b-i}	0,36 ^{c-g}	0,45 ^{b-i}
	Gr 25% P + 5% Fe	0,7433 ^{b-g}	1,71 ^{b-d}	0,76 ^{c-i}	0,22 ^{fg}	0,35 ^{g-j}
	Gr 50% P + 5% Fe	0,8067 ^{b-e}	2,37 ^{a-c}	2,80 ^a	0,41 ^{b-g}	0,43 ^{d-i}
Gr 75% P + 5% Fe	1,3003 ^a	2,23 ^{a-c}	0,95 ^{b-i}	0,26 ^{e-g}	0,38 ^{e-j}	

Keterangan: Ci, Ch dan Gr masing-masing adalah fosfat alam Huinan China, Christmas Island, Gresik, Nilai tengah yang diikuti huruf kecil yang sama pada parameter sama tidak berbeda nyata berdasarkan uji DNMR pada taraf $\alpha = 5\%$.

ferulat dengan konsentrasi 500 hingga 100 μM . Hasil penelitian Prasetyo (1996); Saragih (1996) dan Salampak (1999) masing-masing pada gambut asal Sumatera Selatan, Jambi dan Kalimantan Tengah dengan kandungan lignin berturut-turut sekitar 32,79 – 57,38%; 76,63 – 81,36% (rata-rata 81%) dan 78,82 – 93,20% (rata-rata 86%) mengandung asam ferulat

berturut-turut sekitar 0,097 – 0,410 mM; 0,1 – 1,21 mM dan 0,097 – 0,410 mM. Tanah gambut yang digunakan dalam penelitian ini mempunyai kadar lignin sebesar 71,46% (Tabel 1) diduga mempunyai konsentrasi asam ferulat pada kisaran yang sama dengan hasil tersebut sehingga mengganggu pertumbuhan tanaman.

Tabel 4. Emisi CH₄ dan CO₂ akibat pemberian amelioran Fe³⁺ dan fosfat alam pada fase awal pertumbuhan vegetatif dan fase pertumbuhan vegetatif maksimum (mg pot⁻¹ jam⁻¹).

Perlakuan		Awal Pertumbuhan Vegetatif		Pertumbuhan Vegetatif Maksimum	
Kondisi Air	Jenis dan Dosis Fosfat Alam	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂
..... mg pot ⁻¹ jam ⁻¹					
Kapasitas Lapang	Kontrol (0%)	0,62 ^b	10,87 ^{d-g}	1,01 ^{ef}	12,68 ^{c-e}
	Ci 25% P	0,80 ^b	16,75 ^{c-g}	2,32 ^{d-g}	19,21 ^{a-e}
	Ci 50% P	1,32 ^b	17,82 ^{c-g}	3,13 ^{d-g}	29,62 ^{a-d}
	Ci 75% P	1,49 ^b	41,02 ^a	4,94 ^{b-f}	36,64 ^a
	Ci 25% P + 5% Fe	0,37 ^b	7,87 ^{d-g}	0,49 ^{ef}	11,93 ^{c-e}
	Ci 50% P + 5% Fe	0,75 ^b	9,84 ^{d-g}	0,70 ^{ef}	12,82 ^{c-e}
	Ci 75% P + 5% Fe	0,78 ^b	9,07 ^{d-g}	1,36 ^{ef}	13,14 ^{c-e}
	Ch 25% P	0,77 ^b	11,31 ^{d-g}	1,48 ^{ef}	15,42 ^{b-e}
	Ch 50% P	1,35 ^b	18,53 ^{c-e}	2,54 ^{d-g}	15,15 ^{b-e}
	Ch 75% P	1,44 ^b	35,81 ^b	2,17 ^{d-g}	35,21 ^{a-b}
	Ch 25% P + 5% Fe	0,35 ^b	4,82 ^{d-g}	0,57 ^{ef}	6,12 ^e
	Ch 50% P + 5% Fe	0,41 ^b	7,84 ^{d-g}	0,74 ^{ef}	8,23 ^{de}
	Ch 75% P + 5% Fe	0,50 ^b	9,75 ^{d-g}	1,90 ^{d-g}	8,89 ^{c-e}
	Gr 25% P	0,75 ^b	12,17 ^{d-g}	2,47 ^{d-g}	14,40 ^{b-e}
	Gr 50% P	0,95 ^b	12,47 ^{d-g}	2,84 ^{d-g}	15,33 ^{b-e}
	Gr 75% P	1,04 ^b	14,02 ^{c-g}	2,82 ^{d-g}	19,65 ^{a-e}
	Gr 25% P + 5% Fe	0,34 ^b	4,79 ^{d-g}	0,33 ^f	5,88 ^e
	Gr 50% P + 5% Fe	0,34 ^b	7,11 ^{d-g}	0,65 ^{ef}	7,47 ^e
Gr 75% P + 5% Fe	0,57 ^b	7,54 ^{d-g}	1,06 ^{ef}	7,86 ^{de}	
Dua Kali Kapasitas Lapang	Kontrol (0%)	1,23 ^b	8,24 ^{d-g}	3,86 ^{d-g}	8,89 ^{c-e}
	Ci 25% P	1,05 ^b	15,11 ^{c-g}	9,01 ^{bc}	12,98 ^{c-e}
	Ci 50% P	2,24 ^b	15,00 ^{c-g}	10,35 ^{bc}	19,06 ^{a-e}
	Ci 75% P	2,90 ^b	27,76 ^{bc}	13,15 ^{c-e}	30,42 ^{a-c}
	Ci 25% P + 5% Fe	0,42 ^b	6,20 ^{d-g}	2,07 ^{d-g}	7,12 ^e
	Ci 50% P + 5% Fe	0,82 ^b	6,85 ^{d-g}	2,30 ^{d-g}	9,65 ^{c-e}
	Ci 75% P + 5% Fe	0,84 ^b	7,54 ^{d-g}	3,17 ^{d-g}	12,04 ^{c-e}
	Ch 25% P	1,32 ^b	10,51 ^{d-g}	4,26 ^{b-f}	14,65 ^{b-e}
	Ch 50% P	1,12 ^b	11,97 ^{d-g}	6,84 ^{b-e}	14,53 ^{b-e}
	Ch 75% P	2,03 ^b	12,20 ^{d-g}	12,20 ^{c-e}	15,70 ^{b-e}
	Ch 25% P + 5% Fe	0,50 ^b	3,87 ^{e-g}	0,58 ^{ef}	6,72 ^e
	Ch 50% P + 5% Fe	0,61 ^b	4,51 ^{d-g}	1,07 ^{ef}	5,35 ^e
	Ch 75% P + 5% Fe	0,63 ^b	5,12 ^{d-g}	1,77 ^{d-f}	8,41 ^{de}
	Gr 25% P	1,13 ^b	10,35 ^{d-g}	3,73 ^{b-f}	11,11 ^{c-e}
	Gr 50% P	1,36 ^b	13,85 ^{c-g}	4,91 ^{b-f}	13,54 ^{c-e}
	Gr 75% P	1,40 ^b	13,15 ^{c-g}	6,35 ^{b-e}	19,31 ^{a-e}
	Gr 25% P + 5% Fe	0,43 ^b	2,07 ^{e-g}	1,05 ^{ef}	3,96 ^e
	Gr 50% P + 5% Fe	0,59 ^b	3,08 ^{e-g}	1,61 ^{d-f}	5,59 ^e
Gr 75% P + 5% Fe	0,60 ^b	4,07 ^{e-g}	0,90 ^{ef}	5,50 ^e	
Tergenang 5 cm	Kontrol (0%)	1,45 ^b	7,30 ^{d-g}	3,56 ^{b-f}	7,74 ^{de}
	Ci 25% P	3,70 ^b	9,11 ^{d-g}	7,85 ^{bc}	12,67 ^{c-e}
	Ci 50% P	9,05 ^a	14,23 ^{c-g}	15,00 ^b	16,56 ^{b-e}
	Ci 75% P	9,95 ^a	18,10 ^{c-f}	27,75 ^a	20,90 ^{a-e}
	Ci 25% P + 5% Fe	0,65 ^b	5,84 ^{d-g}	2,07 ^{d-g}	5,28 ^e
	Ci 50% P + 5% Fe	0,94 ^b	6,93 ^{d-g}	3,09 ^{d-g}	9,22 ^{c-e}
	Ci 75% P + 5% Fe	1,00 ^b	6,35 ^{d-g}	3,86 ^{d-g}	11,41 ^{c-e}
	Ch 25% P	1,90 ^b	7,77 ^{d-g}	7,63 ^{b-d}	9,28 ^{c-e}
	Ch 50% P	1,85 ^b	10,32 ^{d-g}	8,23 ^{d-g}	9,51 ^{c-e}

Tabel 4. (Lanjutan).

Tergenang 5 cm	Ch 50% P + 5% Fe	0,85 ^b	5,13 ^{d-g}	1,87 ^{d-g}	5,07 ^e
	Ch 75% P + 5% Fe	1,04 ^b	6,93 ^{d-g}	2,33 ^{d-g}	6,02 ^e
	Gr 25% P	1,36 ^b	4,57 ^{d-g}	5,12 ^{b-e}	6,89 ^e
	Gr 50% P	1,43 ^b	10,63 ^{d-g}	5,63 ^{b-f}	9,28 ^{e-e}
	Gr 75% P	1,55 ^b	10,71 ^{d-g}	6,58 ^{b-e}	10,23 ^{c-e}
	Gr 25% P + 5% Fe	0,71 ^b	1,83 ^g	1,44 ^{ef}	2,56 ^e
	Gr 50% P + 5% Fe	0,96 ^b	2,79 ^{e-g}	1,82 ^{d-g}	4,32 ^e
	Gr 75% P + 5% Fe	0,97 ^b	3,86 ^{e-g}	1,84 ^{d-g}	3,91 ^e

Keterangan: Ci, Ch dan Gr = fosfat alam Huinan China, Christmas Island, dan Grsik. Nilai tengah yang diikuti huruf kecil yang sama pada parameter sama tidak berbeda nyata berdasarkan uji DNMR pada taraf $\alpha = 5\%$.

Pengaruh Pemberian Amelioran Fe³⁺ dan Fosfat Alam pada Tanah Gambut dengan Beberapa Kondisi Air terhadap Emisi CH₄ dan CO₂

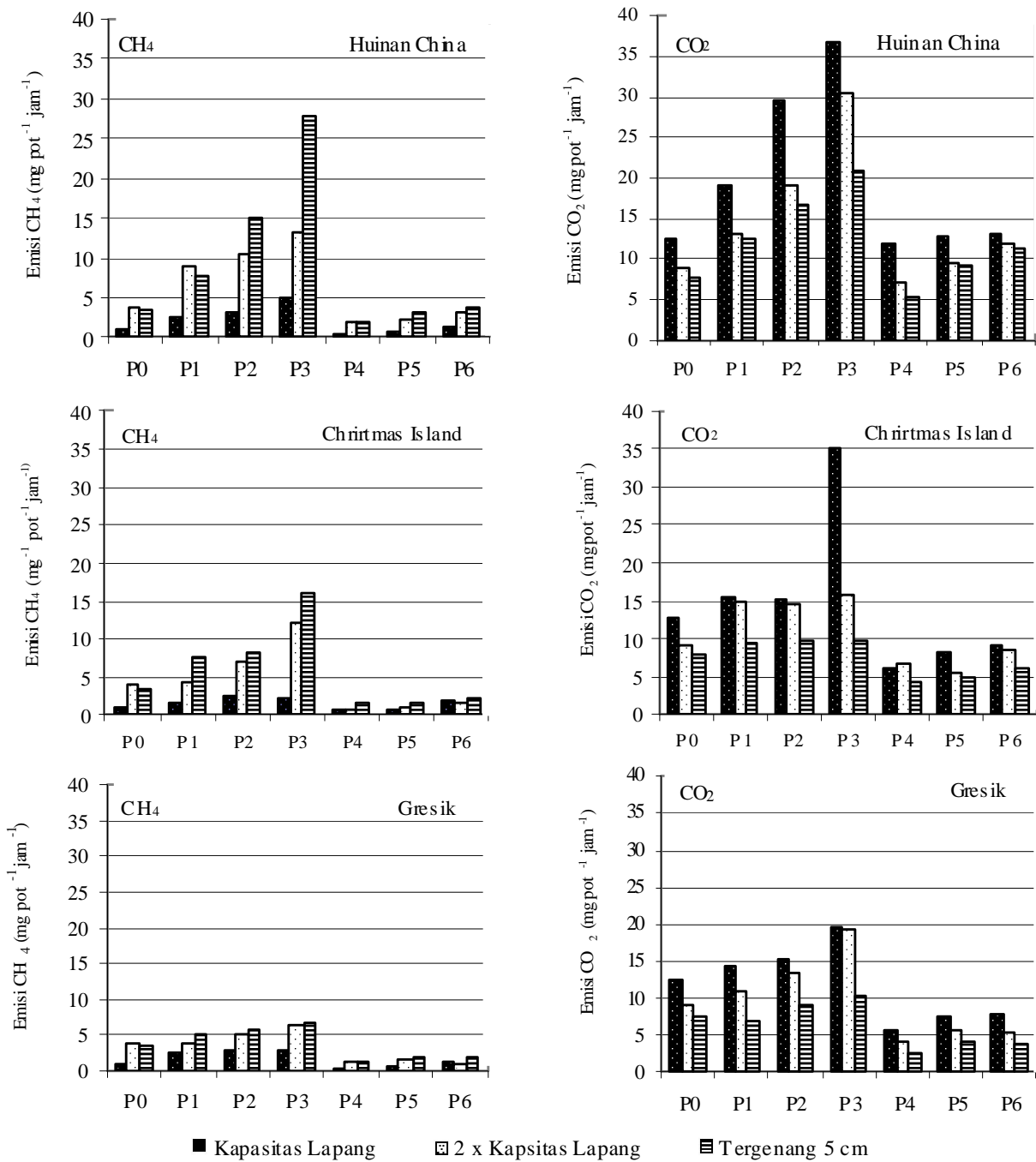
Pemberian fosfat alam baik pada fase awal pertumbuhan vegetatif maupun fase pertumbuhan vegetatif maksimum tanpa diikuti pemberian amelioran Fe³⁺ meningkatkan emisi CH₄ dan CO₂ dibandingkan kontrol, secara umum emisi CH₄ dan CO₂ semakin besar dengan semakin tinggi takaran fosfat alam dan semakin rendah kandungan Fe fosfat alam (Tabel 4). Fakta tersebut dapat dijelaskan bahwa pemberian fosfat alam pada tanah defisiensi P (P tersedia tanah yang digunakan dalam penelitian ini tergolong rendah yaitu 20,90 $\mu\text{g g}^{-1}$, Tabel 1) akan meningkatkan perkembangan dan aktivitas mikroorganisme heterotrofik. Unsur P yang ditambahkan dibutuhkan mikroorganisme dalam menyusun struktur selnya dan enzim fosfatase (Tisdale *et al.*, 1985; Schinner *et al.*, 1996), sehingga memacu pertumbuhan dan perkembangan mikroorganisme tanah. Adhya *et al.* (1998) melaporkan bahwa penambahan P ke tanah defisien P (P Olsen 2 $\mu\text{g g}^{-1}$ P tanah) sebanyak 100 $\mu\text{g P g}^{-1}$ (K₂HPO₄) yang ditanami padi dalam kondisi tergenang menstimulir pertumbuhan akar dan aktivitas bakteri metanogen dan memacu proses metanogenesis, sehingga meningkatkan emisi CH₄ sekitar 54,74% hingga 77,54%, emisi meningkat dengan semakin besarnya tanaman.

Sebaliknya Tabel 4 memperlihatkan bahwa bila pemberian fosfat alam diikuti dengan pemberian amelioran Fe³⁺ dapat meningkatkan stabilitas gambut melalui penurunan emisi karbon berupa penurunan emisi CH₄ dan CO₂. Penurunan emisi CH₄ dan CO₂ pada perlakuan pemberian amelioran Fe³⁺ akibat pemberian fosfat alam dari PT Petrokimia Gresik >

Christmas Island > Huinan China (Gambar 1). Pemberian fosfat alam dari PT Petrokimia Gresik diikuti pemberian amelioran Fe³⁺ menurunkan emisi CH₄ dan CO₂ berturut-turut sekitar 45,16 – 67,33% dan 34,59 – 41,09% pada kondisi kapasitas lapang; diikuti sekitar 65,04 – 72,79% dan 74,88 – 55,46% pada kondisi dua kali kapasitas lapang, selanjutnya sekitar 51,03 – 59,55% dan 69,86 – 66,93% pada kondisi tergenang 5 cm (Tabel 4).

Estimasi kehilangan karbon rata-rata pertahun melalui emisi CH₄ dan CO₂ bila lahan gambut ditanami padi IR-64 secara terus menerus yang diberi pupuk fosfat alam tanpa diikuti pemberian amelioran Fe³⁺ adalah sebesar 2,5; 2,2 dan 2,6 Mg C ha⁻¹ tahun⁻¹ masing-masing pada kondisi kapasitas lapang, dua kali kapasitas lapang dan tergenang 5 cm. Kehilangan karbon tersebut dapat diperkecil dengan pemberian amelioran Fe³⁺ sebanyak 5% erapan maksimum dan fosfat alam berkadar Fe tinggi (fosfat alam PT Petrokimia Gresik berkadar Fe = 5,1%) menjadi 1,5; 0,9 dan 0,9 Mg C ha⁻¹ tahun⁻¹ masing-masing pada kondisi kapasitas lapang, dua kali kapasitas lapang dan tergenang 5 cm. Semakin tinggi kandungan air tanah dan kadar Fe dalam fosfat alam semakin besar kontribusinya dalam menekan kehilangan karbon, rata-rata kehilangan karbon dari tanah gambut per tahun dapat ditekan sebesar: 41% (1,0 Mg C ha⁻¹ tahun⁻¹) pada kondisi kapasitas lapang, 58% (1,3 Mg C ha⁻¹ tahun⁻¹) pada kondisi dua kali kapasitas lapang, dan 64% (1,7 Mg C ha⁻¹ tahun⁻¹) pada kondisi tergenang 5 cm, bila pemberian fosfat alam berkadar Fe tinggi diikuti dengan pemberian amelioran Fe³⁺.

Fakta ini dapat dijelaskan bahwa Fe³⁺ dan kation polivalen lain yang terdapat dalam fosfat alam mempunyai peranan penting dalam menghambat produksi gas CO₂ dan CH₄. Kation Fe³⁺ berinteraksi



Gambar 1. Emisi CH₄ dan CO₂ akibat pemberian amelioran Fe³⁺ dan fosfat alam pada tanah gambut pada fase pertumbuhan vegetatif maksimum. P0, P1, P2, P3 =, 0, 25, 50, 75% P. P4, P5, P6 = 25, 50, 75% P + 5% Fe.

dengan asam-asam organik dengan kekuatan dan kesetabilan ikatan yang tinggi, sehingga terbentuk kompleks organo-kation Fe yang stabil (Saragih, 1996). Sehingga sulit didekomposisikan oleh mikroorganisme atau dengan kata lain senyawa-

senyawa organik tersebut menjadi tidak tersedia bagi mikroorganisme sebagai sumber energi. Akibatnya pertumbuhan dan aktivitas mikroorganisme terhambat sehingga menghambat proses dekomposisi dan metanogenesis yang akhirnya menurunkan produksi

CO₂ dan CH₄. Produk CH₄ merupakan hasil akhir dari serangkaian proses reduksi yang terjadi secara bertahap selama proses dekomposisi bahan organik yang dilakukan oleh mikroorganisme secara anaerob (Ponnamperuma, 1972; Patrick and Reddy, 1978). Tahapan proses dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme dalam suasana anaerob, NO₃⁻ digunakan pertama kali sebagai akseptor elektron setelah kekurangan oksigen diikuti oleh Mn⁴⁺, Fe³⁺, SO₄²⁻ dan CO₂ (Zehnder dan Stumm, 1988). Pembentukan CH₄ oleh bakteri metanogen hanya akan terjadi bila terdapat H₂ dan asam asetat sebagai sumber energi. Jumlah akseptor elektron di lingkungan berkontribusi dalam menentukan jumlah bahan organik yang terdegradasi oleh mikroorganisme tertentu (Jackel dan Schnell, 2000). Pemberian amelioran Fe³⁺ menghambat produksi CH₄ melalui pembentukan senyawa kompleks dengan asam asetat sehingga asetat tidak tersedia sebagai sumber energi bagi bakteri metanogen. Pemberian 15 dan 30 g Fe(OH)₃ per kg tanah menurunkan total emisi CH₄ selama pertumbuhan padi sebesar 43% dan 84% (Jackel dan Schnell, 2000). Penelitian Sabiham dan Sulistyono (2000) di laboratorium menunjukkan bahwa pemberian Fe³⁺ sebesar 5% erapan maksimum menurunkan produksi CO₂ dan CH₄ masing-masing 22,94% dan 23,01% pada gambut Dendang Jambi serta 27,67% dan 32,97% pada gambut Sampit Kalimantan Tengah. Mario (2002) melaporkan bahwa penambahan tanah mineral yang diperkaya dengan terak baja pada gambut pedalaman Berengbengkel, transisi Sampit dan pantai Samuda dapat menekan kehilangan karbon rata-rata per tahun sebesar 28% (0,60 Mg C ha⁻¹ tahun⁻¹), 30% (0,61 Mg C ha⁻¹ tahun⁻¹) dan 31% (0,63 Mg C ha⁻¹ tahun⁻¹).

KESIMPULAN DAN SARAN

Peningkatan kandungan P tanaman semakin besar bila pemberian fosfat alam berkadar Fe tinggi diikuti dengan pemberian amelioran Fe³⁺. Semakin tinggi kandungan air tanah dan kadar Fe dalam fosfat alam semakin besar kontribusinya dalam menekan kehilangan karbon, rata-rata kehilangan karbon dari tanah gambut pertahun dapat ditekan sebesar: 64% (1,7 Mg C ha⁻¹ tahun⁻¹) pada kondisi tergenang 5 cm, diikuti dengan kondisi dua kali kapasitas lapang sebesar 58% (1,3 Mg C ha⁻¹ tahun⁻¹) dan kondisi kapasitas lapang sebesar 41% (1,0 Mg C ha⁻¹ tahun⁻¹), bila pemberian fosfat alam berkadar Fe tinggi diikuti dengan pemberian amelioran Fe³⁺.

Untuk menekan kehilangan karbon dan mempertahankan stabilitas tanah gambut disarankan menggunakan bahan berkadar Fe tinggi sebagai amelioran dan fosfat alam berkadar Fe tinggi pada kondisi tergenang.

DAFTAR PUSTAKA

- Adhya, T.K., P. Pattnaik., S.N. Satpathy, S. Kumaraswamy and N. Sethunathan. 1998. Influence of phosphorous application on methane emission and production in flooded paddy soils. *Soil Biol. Biochem.* 30 (2):177-181.
- Boer, R., I. Nasution., I. Las dan A. Bey. 1996. Emisi metan dari lahan gambut sejuta hektar Kalimantan Tengah. *Jurnal Agromet.* 12 (1): 31-38.
- Driessen, P.M. 1978. Peat soils. *In: IRRI. Soil and rice.* IRRI. Los Banos. Philippines. pp: 763 - 779.
- Hartley, R.D. and D.C. Whitehead. 1984. Phenolic acids in soil and their influence of plant growth and soil microbial processes. pp : 109-149. *In: D. Vaughan and R.E. Malcolm (Ed). Soil Organic Matter and Biological Activity.* Martinus Nijhoff/DR W. Junk Publisher. Lancaster.
- Husin, Y.A. dan D. Murdiyarso. 1995. Fluks metan dari lahan padi sawah beririgasi di jalur Pantura. Paper disajikan pada Lokakarya Nasional Inventarisasi Emisi dan Rosot Gas Rumah Kaca Indonesia. KLH. Jakarta.
- Jackel, U and S. Schnell. 2000. Suppression of methane emission from rice paddies by ferric iron fertilization. *Soil Biol Biochem.* 32: 1811-1814.
- Jones, J.B., B. Wolf and H. A. Mills. 1991. Plant analysis handbook: a practical sample, preparation, analysis, and interpretation guide. Micro-macro Publ. Inc. Georgia. 213 pp.
- Mario, M.D. 2002. Peningkatan produktivitas dan stabilitas tanah gambut dengan pemberian tanah mineral yang diperkaya oleh bahan berkadar besi tinggi. Disertasi. Program Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- Mattingly, G. E.G. 1985. Labile phosphate in soils. *In Y.K. Soon (ed). Soil Nutrient Availability.* Van Nostrand Reinhold co. New York.
- Patrick, W.H. Jr. and C.N. Reddy. 1978. Chemical changes in rice soils. *In: DeDatta (Ed). Soil and Rice, IRRI.* Los Banos. Philippines, pp. 361-379.
- Ponnamperuma, F.N. 1972. The chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.* 24: 29-89.
- Prasetyo, T.B. 1996. Perilaku asam-asam organik meracun pada tanah gambut yang diberi garam Na dan beberapa unsur mikro dalam kaitannya dengan hasil padi. Disertasi. Program Pascasarjana, Insitut Pertanian Bogor.
- Rachim, A. 1995. Penggunaan kation-kation polivalen dalam kaitannya dengan ketersediaan fosfat untuk

- meningkatkan produksi jagung pada tanah gambut. Disertasi. Program Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- Sabiham, S, dan N.B.E. Sulistyono. 2000. Kajian beberapa sifat inheren dan perilaku gambut: Kehilangan karbondioksida (CO₂) dan metana (CH₄) melalui proses reduksi-oksidasi. *J. Tanah Trop.* 5: 127-135.
- Salampak. 1999. Peningkatan produktivitas tanah gambut yang disawahkan dengan pemberian bahan amelioran tanah mineral berkadar besi tinggi. Disertasi. Program Pascasarjana IPB. Bogor.
- Saragih, E.S. 1996. Pengendalian asam-asam organik meracun dengan penambahan Fe (III) pada tanah gambut dari Jambi, Sumatera. Tesis Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Schinner, E., R. Ohlinger, E. Kandeler and R. Margesin. 1996. *Methods in Soil Biology*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. German. 426 pp.
- Suryanto. 1993. Pengapuran dan perlakuan besi untuk mengurangi pelindihan fosfat pada tanah gambut, Hlm. 317-328 *dalam* Prosiding Seminar Nasional Gambut II, HGI bekerjasama dengan BPPT Jakarta. Jakarta 14 – 15 Januari 1993.
- Syers, J. K., M.G. Browman, G.W. Smillie and R. B. Corey. 1973. Phosphate sorption by soil evaluated by Langmuir adsorption equation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 37: 358 - 363.
- Tadano, K. Ambak, K. Yonebayashi and W. Pantanahiran. 1991. Occurrence of phenolic compounds and aluminum toxicity in tropical peat soils. *In: Tropical peat. Proc. Inter. Symp. on Tropical Peatland. MARDI, Malaysia.* 6 – 10 May 1991.
- Tadano, K. Yonebayashi and N. Saito 1992. Effect of phenolic acids on the growth and occurrence of sterility in crop plants. *In: K. Kyuma, P. Vajansorn and A. Zakaria (Eds.). Coastal lowland ecosystems in Southern Thailand and Malaysia. Showado-printing co. Skyoku-Kyoto, pp:358-369.*
- Tan, K.H. 1998. *Principles of Soil Chemistry*. 3rd edition. Marcel Dekker. Inc. New York. 521 pp.
- Tisdale, S.L., W.L. Nelson, and J.D. Beaton. 1985. *Soil Fertility and Fertilizers*. 4th ed. The McMillan Publ. Co. New York. 694 pp.
- Widjaja-Adhi, I.P.G. J.A. Silva, and R.L.Fox. 1990. Assessment of external P requirement of maize on Paleuduls and Eutrustox. *Pemberitaan Penelitian Tanah dan Pupuk.* 9: 14-20.
- Zehnder, A.J.B and W. Stumm 1988. Geochemistry and biogeochemistry of anaerobic habitats. A.J.B. Zehnder (Ed). *In: Biology of Anaerobic Microorganism*. Wiley and Sons. New york, pp. 1-38.