

Pengaruh Amelioran, Pupuk dan Sistem Pengelolaan Tanah Sulfat Masam terhadap Hasil Padi dan Emisi Metana

Effects of Ameliorants, Fertilizers, and Management Regimes of Acid Sulphate Soils on Rice Yield and Methane Emission

Wahida Annisa*¹⁾ and Dedi Nursyamsi²⁾

¹⁾ Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa, Jl. Kebun Karet PO BOX 31, Loktabat Utara, Banjarbaru 70712 Kalimantan Selatan

²⁾ Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian, Jl. Tentara Pelajar No. 12 Bogor 16124 Jawa Barat

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diterima: 22 Oktober 2015
Direview: 27 Oktober 2015
Disetujui: 17 November 2016

Katakunci:

Tanah sulfat masam
Amelioran
Emisi metana
Hasil padi
Indeks produksi padi

Keywords:

Acid sulphate soil
Ameliorant
Methane emission
Yield of rice
Index of rice production

Abstrak: Hasil yang tinggi dan emisi metana yang rendah merupakan tujuan pengelolaan lahan basah. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi pengaruh amelioran, pupuk, dan sistem pengelolaan terhadap hasil padi dan emisi metana. Penelitian dilaksanakan di lahan sulfat masam Kalimantan Selatan dengan rancangan split-split plot. Petak utama adalah tipe penggunaan lahan yaitu: S1= pengelolaan tradisional (alami), dan S2= pengelolaan intensif. Anak petak adalah pemupukan NPK yaitu: P1=NPK 100%, P2=NPK 75%. Dosis NPK 100% sesuai dengan rekomendasi yaitu (kg ha^{-1}) 200 Urea; 100 SP 36; 100 KCl. Sedangkan anak-anak petak adalah perlakuan amelioran: B0=Tanpa bahan organik, B1= Pola petani, B2=Kompos (kombinasi kompos Jerami 30%+ Kompos Purun 30%+ Kompos Kotoran Sapi 40%), B3=Biochar sekam padi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa emisi metana tertinggi ditunjukkan oleh perlakuan S2P1B1 yaitu sebesar $30,40 \text{ kg ha}^{-1} \text{ musim}^{-1}$ dengan nilai indeks produksi padi (rasio hasil per emisi metana) sebesar 82,8 dan hasil gabah sebesar $2,5 \text{ t ha}^{-1}$. Hasil gabah tertinggi ditunjukkan oleh perlakuan S2P2B2 yaitu sebesar $3,4 \text{ t ha}^{-1}$ dengan nilai indeks produksi padi sebesar 438,9 dan emisi metana sebesar $7,75 \text{ kg ha}^{-1} \text{ musim}^{-1}$. Indeks produksi padi tertinggi terlihat pada perlakuan tanpa amelioran (kontrol) dengan pemupukan NPK 100% yaitu sebesar 788,6 namun hasil gabah hanya $1,95 \text{ t ha}^{-1}$, walaupun emisi metana rendah ($2,47 \text{ kg ha}^{-1} \text{ musim}^{-1}$). Penelitian ini menunjukkan bahwa tujuan meningkatkan hasil padi masih belum sejalan dengan penurunan emisi metana sehingga yang disarankan adalah perlakuan S2P2B2 karena memberikan hasil tertinggi.

Abstract. High yield and low methane emission are two goals in wetland management systems. The aim of this study was to evaluate the effects of biochar and compost on methane emission and yield of rice on acid sulphate soils. The research was conducted on acid sulfate soil in South Kalimantan using a split-split plot design. The main plot was two management regimes which were traditional (S1) and intensive (S2) managements. The sub plot was the NPK fertilization, namely: P1 = NPK 100%, and P2 = NPK 75% of the recommended rate of NPK. The recommendations rate of NPK fertilizers was (kg ha^{-1}) 200 urea; 100 SP 36; and 100 KCl. Sub-sub plots were ameliorants: B0 = Without ameliorants, B1= Farmers' practice, B2= Compost (a combination of 'Straw' Compost 30% + 'Purun' Compost 30% + 'Cattle Manure' Compost 40%), and B3 = Biochar of rice husk. The results showed that the highest methane emissions amounted to $30.40 \text{ kg ha}^{-1} \text{ season}^{-1}$ was resulted from S2P1B2 treatment, with the production index (yield/methane emission) of 82.8 and grain yield of 2.5 t ha^{-1} . The highest grain yield of 3.4 t ha^{-1} was shown in the treatment S2P2B2 with the production index of 438.9 and methane emissions of $7.75 \text{ kg ha}^{-1} \text{ season}^{-1}$. The highest rice production index of 788.6 was obtained in the treatment without ameliorant and 100% NPK fertilization. This treatment gave grain yield of only 1.95 t ha^{-1} and the methane emissions of $2.47 \text{ kg ha}^{-1} \text{ season}^{-1}$. This research concluded that the objective of high yield is not synchronized with low methane emission and thus treatment S2P2B2 with the highest yield is recommended.

Pendahuluan

Indonesia memiliki lahan rawa terluas di kawasan tropika dengan bahan sedimen yang terdiri atas tanah mineral, tanah gambut, atau kombinasi keduanya. Berdasarkan hasil hitungan secara spasial menggunakan peta tanah tinjau bahwa luas lahan rawa di Indonesia adalah $\pm 34,93$ juta ha atau 18,28% dari luas total daratan

Indonesia dan tersebar di Sumatera $\pm 12,93$ juta ha, Jawa $\pm 0,90$ juta ha, Kalimantan $\pm 10,02$ juta ha, Sulawesi $\pm 1,05$ juta ha, Maluku dan Maluku Utara $\pm 0,16$ juta ha serta Papua $\pm 9,87$ juta ha. Dari total luasan lahan rawa di Indonesia sekitar 19,99 juta ha merupakan lahan potensial yang dapat dimanfaatkan sebagai lahan pertanian, sedangkan sisanya sekitar 14,93 juta ha tidak potensial untuk dikembangkan menjadi lahan pertanian. Luasan lahan yang sudah dimanfaatkan sekitar 1,8 juta ha.

*Corresponding author: annisa@yahoo.com

Alihamsyah (2005) mengatakan bahwa ke depan lahan rawa ini menjadi sangat strategis dan penting bagi pengembangan pertanian sekaligus mendukung ketahanan pangan dan usaha agribisnis. Lahan pasang surut merupakan salah satu agroekosistem potensial untuk pengembangan pertanian, khususnya tanaman pangan. Ada dua jenis tanah utama di wilayah pasang surut yaitu tanah mineral (*mineral soils*) jenuh air dan tanah gambut (*peat soils*) (Subagyo, 2006). Menurut Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2010) bahwa tanah di lahan rawa termasuk ke dalam kelompok besar (great group) (1) tanah alluvial marin (*Sulfaquent, Sulfaquept, Hydraquent, Fluvaquent*), (2) tanah alluvial sungai (*Endoaquent, Endoaquept*) dan (3) tanah gambut (*haplofibrist/hemist, Sulfihemist/saprist, Sulfohemis/saprist*).

Kegiatan budidaya padi sawah merupakan penyebab utama peningkatan pemanasan global dan menjadi salah satu isu lingkungan. Lahan pertanian dianggap sebagai salah satu sumber penghasil metana yang dilepaskan ke atmosfer (Yan *et al.* 2003). Liu *et al.* (2011) melaporkan bahwa Metana di hasilkan oleh bakteri metanogenesis pada kondisi anaerobik dan hasil penelitiannya menunjukkan emisi metana (CH₄) yang tinggi dari tanah sawah beririgasi. Sumber emisi gas rumah kaca dari aktivitas pertanian dikelompokkan sebagai berikut: (1) fermentasi (*enteric fermentation*), (2) pengelolaan limbah ternak, (3) pembakaran pada aktivitas pertanian (*grassland burning*), (4) pembakaran padang rumput, (5) penggunaan kapur pertanian, (6) pemupukan urea, (7) emisi langsung dan tidak langsung N₂O dari tanah dan (8) lahan sawah irigasi. Faktor lingkungan dan kondisi tanah seperti kandungan bahan organik, pH dan kelembaban mempengaruhi terhadap produksi metana (Liu dan Wu, 2004). Penambahan bahan organik berupa jerami ke lahan sawah, khususnya yang masih memiliki nisbah C/N tinggi, akan meningkatkan emisi gas metana ke udara (Wihardjaka *et al.* 2011). Pemasukan intensif bahan organik berupa jerami ke dalam tanah tergenang sangat ideal bagi berlangsungnya dekomposisi anaerobik di lahan sawah yang berpuncak pada proses metanogenesis. Pada tahap pertama mikroorganisme akan menyederhanakan polimer (polisakarida, protein) menjadi monomer (seperti: asam amino, asam lemak dan monosakarida) dan monomer tersebut akan termineralisasi menjadi CO₂ ataupun kombinasi CO₂ dan CH₄. Masyarakat tradisional Kalimantan Selatan (*Suku Banjar*) umumnya menggunakan jerami sisa panen dan gulma purun tikus untuk mempertahankan kondisi reduktif dan menekan kelarutan unsur beracun. Pengalihan dari bahan organik yang berkualitas rendah ke bahan organik yang berkualitas baik perlu dilakukan agar dapat meningkatkan kesuburan tanah sulfat masam, sehingga produktivitas padi meningkat tetapi emisi gas rumah kaca dapat ditekan.

Biochar merupakan substansi arang kayu yang berpori (porous), sering juga disebut charcoal atau agri-char karena berasal dari makhluk hidup kita sebut arang-hayati. Lehmann and Joseph (2009) mengatakan bahwa aplikasi biochar untuk pertanian merupakan salah satu teknologi yang dapat dilakukan dalam upaya mengurangi emisi gas rumah kaca. Biochar memiliki kemampuan dalam melepaskan karbon dan nitrogen secara perlahan serta mempengaruhi aktivitas mikroba, sehingga memperbaiki sifat tanah. Di dalam tanah Biochar menyediakan habitat yang baik bagi mikroba tanah misalnya bakteri yang membantu dalam perombakan unsur hara agar unsur hara tersebut dapat diserap oleh tanaman, tapi tidak dikonsumsi seperti bahan organik lainnya. Karhu *et al.* (2011) melaporkan bahwa penambahan biochar sebanyak 9 t ha⁻¹ pada lahan pertanian meningkatkan serapan CH₄ dibandingkan kontrol tanpa diberi biochar sebesar 96% (dari 49,6 sampai 97,4 CH₄-C ha⁻¹), tetapi tidak mempengaruhi terhadap hasil. Hal ini terkait dengan kemampuan biochar yang efektif dalam menahan hilangnya unsur hara akibat tercuci serta meretensi P. Selain itu biochar juga dapat sebagai media tumbuh yang baik bagi berbagai mikroba tanah. Jenis dan kandungan bahan amelioran baik bahan organik berupa jerami dan biochar yang ditambahkan ke dalam tanah mempengaruhi terhadap CH₄ yang dihasilkan karena aktivitas dari metanogen di tanah sawah dipengaruhi oleh sifat struktur dan kimia dari bahan amelioran yang ditambahkan. Tanah merupakan penampung (sink) C terbaik dan merupakan opsi penting bagi pengurangan emisi C, sehingga diharapkan mampu mengurangi resiko perubahan iklim karena penyerapan karbon ke tanah termasuk usaha pengurangan karbon udara (Freibauer *et al.* 2004; Lal 2004). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh amelioran, pupuk dan system pengelolaan terhadap hasil padi dan emisi metana.

Bahan dan Metode

Penelitian ini dilaksanakan dari bulan April sampai Agustus tahun 2012 di lahan sulfat masam di Kalimantan Selatan dengan rancangan split-split plot. Petak utama adalah tipe penggunaan lahan yaitu: S1= pengelolaan tradisional (alami), dan S2= pengelolaan intensif. Anak petak adalah pemupukan NPK yaitu: P1=NPK 100%, P2=NPK 75%. Dosis NPK 100% sesuai dengan rekomendasi yaitu (kg ha⁻¹) 200 Urea; 100 SP 36; 100 KCl. Sedangkan anak-anak petak adalah perlakuan amelioran: B0=Tanpa bahan organik, B1= Pola petani, B2=Kompos (kombinasi kompos Jerami 30% + Kompos Purun 30%+ Kompos Kotoran Sapi 40%), dan B3=Biochar sekam padi. Dosis kompos dan biochar yang

diberikan sebanyak 5 t ha⁻¹. Varietas padi yang digunakan adalah varietas unggul lahan rawa yaitu Inpara 1.

Persemaian dilakukan di luar lahan agar menghemat waktu dan bibit dipertahankan antara 20-25 hari di persemaian. Ukuran petak 4 m x 5 m, jumlah bibit 2-3 per lubang. Pupuk N diberikan 3 kali, yaitu pada umur 7 hari setelah tanam (hst) 1/3 bagian, selanjutnya pada umur 21 hst 1/3 bagian dan pada umur 45 hst. Sedangkan pupuk P dan K diberikan sekaligus pada saat tanam. Pengamatan tanaman dilakukan sesuai periode pertumbuhan padi yaitu 30 hst, 60 hst dan 90 hst terhadap tinggi tanaman, jumlah anakan serta produksinya setelah panen. Untuk tanahnya diamati pH tanah dan potensial redoks tanah (Eh). Pengukuran flux emisi GRK dilakukan dilapangan dengan menggunakan Gas Chromatography (GC). Contoh gas dilapangan diambil dari *closed chamber* (Paralon fiber) dengan menggunakan jarum suntik (syringe) dan kemudian diukur CH₄, juga secara periodik pada 30, 60 dan 90 hst. Perhitungan fluks CH₄ pada setiap perlakuan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$E = \frac{Bm}{Vm} \times \frac{\delta C_{sp}}{\delta t} \times \frac{V}{A} \times \frac{273.2}{T + 273.2}$$

Keterangan:

- E = emisi CH₄ (mg m⁻² hari⁻¹)
- V = volume sungkup (m³)
- A = luas dasar sungkup (m²)
- T = suhu udara rata-rata di dalam sungkup (°C)
- δC_{sp}/δt = laju perubahan konsentrasi gas CH₄ (ppm menit⁻¹)
- Bm = berat molekul gas CH₄ dalam kondisi standar
- Vm = volume gas pada kondisi stp (standard temperature and pressure) yaitu 22.41 liter pada 23°K

Besarnya emisi metana dalam satu musim tanam dapat diduga dengan melihat rasio antara hasil padi per kilogram dan besarnya emisi metana yang dikenal dengan indeks produksi padi. Perhitungan Indeks Produksi Padi satu musim tanam menggunakan persamaan sebagai berikut (Setyanto 2006):

$$\text{Indeks Produksi Padi} = \frac{\text{Hasil Padi (kg ha}^{-1}\text{)}}{\text{Emisi metana (kg ha}^{-1}\text{)}}$$

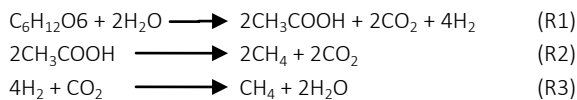
Analisis data dilakukan untuk mengetahui pengaruh peubah bebas terhadap peubah tak bebas dengan menggunakan analisis keragaman pada aras kepercayaan 5% dan 1%. Beda antar perlakuan untuk setiap parameter di Uji menurut DMRT α=0,05. Keeratan hubungan antar peubah diuji korelasi dan regresi (Gomez dan Gomez 1995). Analisis data menggunakan perangkat lunak *SAS Ver. 9.0 for windows*.

Hasil dan Pembahasan

Emisi Metana

Secara umum emisi metana dari pertanaman padi pada kedua tipe penggunaan lahan berkisar antara 2,33 sampai 30,40 kg ha⁻¹ musim⁻¹ (Gambar 1). Emisi metana tertinggi dilepaskan dari lahan yang intensif dibudidayakan (Site 2) dengan perlakuan B1 (pola petani) dengan pemupukan P1 (NPK 100%) yaitu sebesar 30,40 kg ha⁻¹ musim⁻¹, sedangkan emisi terendah dilepaskan dari lahan alami (Site 1) dengan perlakuan amelioran biochar (B3) yaitu sebesar 2,33 kg ha⁻¹ musim⁻¹. Dilihat dari tipe penggunaan lahan, lahan intensif dibudidayakan (Site 2) memiliki kondisi yang lebih subur dibandingkan lahan alami (Site 1) (Tabel 2) yang mengakibatkan aktivitas bakteri metanogen lebih tinggi di lahan tersebut. Beberapa hasil penelitian menunjukkan produksi CH₄ terjadi pada kisaran nilai Eh -150 mV dan bergerak sampai di bawah -300 mV karena bakteri metanogen sebagai penghasil CH₄ bekerja optimal pada nilai Eh ≤ -150 mV dengan nilai pH mendekati netral (Hou *et al.* 2000; Setyanto *et al.* 2004; Minamikawa & Sakai, 2006). Roger *et al.* (2001) melaporkan bahwa terdapat korelasi positif antara intensitas penggunaan lahan dengan besarnya emisi metana yang dilepaskan di lahan tergenang dan sejalan dengan hasil penelitian ini bahwa ada korelasi positif sangat nyata dengan nilai koefisien korelasi person r=0,91** (Tabel 1) yang didukung dengan hasil analisis regresi menunjukkan nilai R²=0,83** dengan persamaan y = 3,09x + 0,33 (Gambar 2). Sedangkan dilihat dari pemberian ameliorant, perlakuan amelioran B1 (pola petani) melepaskan emisi metana tertinggi pada kedua tipe pengelolaan lahan penelitian dibandingkan dengan perlakuan B2 dan B3. Hal ini berkaitan dengan pemasukan bahan organik dengan kualitas rendah pada kondisi tergenang. Perlakuan pola petani menggunakan bahan organik segar berupa kombinasi jerami padi dan gulma lokal pada kondisi tergenang dengan nisbah C/N sebesar 70,3 yang lebih tinggi dibandingkan nisbah C/N kompos dan biochar yaitu berturut-turut 20,61 dan 49. Becker *et al.* (2005) mengatakan nisbah C/N merupakan indikator laju dekomposisi biomassa dan faktor utama yang mempengaruhi proses mineralisasi bahan organik karena kualitas bahan organik salah satunya ditentukan nilai nisbah C/N bahan. Nilai nisbah C/N bahan organik terendah terlihat dalam kompos pupuk kandang sapi yaitu sebesar 20,8 mengindikasikan kondisi bahan organik matang dengan kualitas yang baik. Huang *et al.* (2004) mengatakan bahwa nisbah optimum untuk pengomposan berkisar antara 25-30. Jenis dan kualitas bahan organik merupakan substrat dalam proses metabolisme mikrobial

yang mempengaruhi emisi CH₄ (Roger, 2001). Kualitas bahan organik berupa: konsentrasi N, nisbah C:N, nisbah lignin:N serta nisbah C:P merupakan salah satu faktor penting yang menjadi pembatas proses dekomposisi (Reddy & DeLaune, 2008). Hal ini berkaitan dengan proses degradasi bahan organik pada kondisi tergenang dan Yuan *et al.* (2012) menggambarkan proses tersebut dalam bentuk persamaan reaksi:

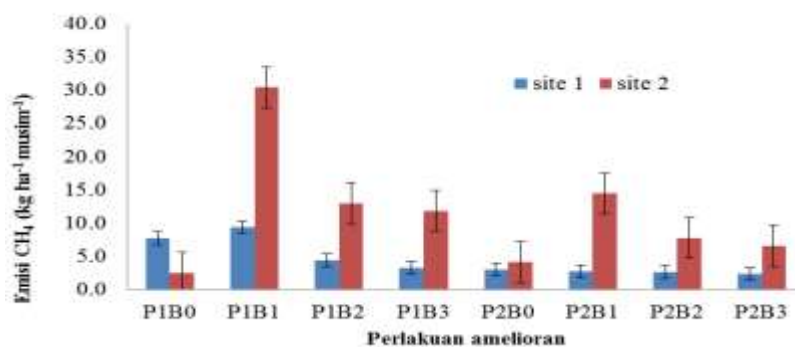


Reaksi pertama (R1) dilakukan oleh bakteri hidrolitik dan bakteri fermentasi menghasilkan asetat dan H₂ + CO₂ yang digunakan bakteri metanogen untuk menghasilkan CH₄ pada reaksi kedua (R2) dan ketiga (R3).

Masyarakat tradisional Kalimantan Selatan (Suku Banjar) menggunakan jerami sisa panen dan gulma lokal untuk mempertahankan kondisi reduktif dan menekan kelarutan unsur meracun. Semua karbon organik yang masuk ke dalam tanah merupakan sumber emisi gas rumah kaca. Jumlah karbon organik yang tersimpan di tanah sawah lebih besar dibandingkan lahan kering karena proses penguraianya berlangsung secara anaerob akibat penggenangan (Liping and Erda, 2001 cit Esmizade *et al.* 2010. Pemberian bahan organik berkualitas baik akan memperbaiki sifat kimia tanah sulfat masam, sehingga produktivitas lahan meningkat tetapi emisi gas rumah kaca

dapat ditekan karena berkaitan dengan aktivitas dari mikroorganisme. Hasil penelitian menunjukkan bahwa emisi metana yang dilepaskan dengan perlakuan B2 dengan perlakuan pemupukan P1 (NPK 100%) yaitu sebesar 4,41 kg ha⁻¹ musim⁻¹ pada Site 1 dan 12,94 kg ha⁻¹ musim⁻¹ pada Site 2 lebih tinggi dibandingkan perlakuan pemupukan P2 (NPK 75%) yaitu sebesar 2,62 kg ha⁻¹ musim⁻¹ pada Site 1 dan 7,75 kg ha⁻¹ pada Site 2. Begitu pula dengan perlakuan amelioran B3, emisi metana yang dilepaskan lebih kecil berkisar antara 2,33 sampai 11,84 kg ha⁻¹ musim⁻¹. Hasil analisis statistik menunjukkan terdapat interaksi yang sangat nyata antara petak utama yaitu tipe penggunaan lahan (S) dengan perlakuan pemupukan (P) serta bahan organik (B) maupun ketiganya terhadap besarnya emisi metana yang dilepaskan selama satu musim tanam. Hal ini menunjukkan bahwa besarnya emisi metana tidak hanya dipengaruhi oleh jenis amelioran dan pemupukan, tetapi juga tipe penggunaan lahannya.

Proses dekomposisi bahan organik di tanah tergenang tidak hanya tergantung pada kualitas substrat organik tetapi juga pada jumlah akseptor elektron dan kecepatan konsumsi akseptor elektron berhubungan dengan DOC (karbon organik larut) (Reddy & DeLaune, 2008). Proses degradasi bahan organik dalam kondisi tergenang menghasilkan CH₄ yang didukung dengan hasil penelitian ini bahwa fluks CH₄ dari lahan sulfat masam dipengaruhi jenis bahan organik (Gambar 1). Reddy & DeLaune, (2008) juga melaporkan bahwa kehilangan karbon dalam

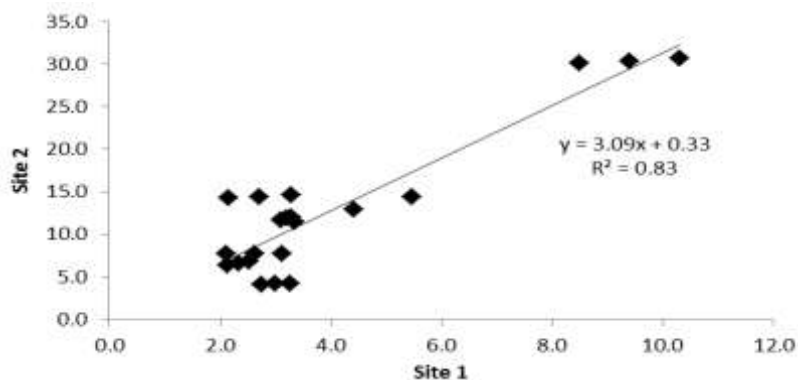


Gambar 1. Emisi CH₄ di lahan sulfat masam yang berbeda intensitas penggunaan lahan yaitu lahan sulfat masam alami (S1) dengan lahan sulfat masam yang dibudidayakan secara intensif (S2) dengan perlakuan amelioran (B2) kompos dan (B3) biochar serta pupuk (P) selama fase pertumbuhan padi

Keterangan: P1=Pemupukan NPK 100%; P2= Pemupukan NPK 75%; B0=Tanapa amelioran; B1=Pola petani lahan pasang surut; B2=Kompos 50%jerami padi+50% purun tikus; B3=Biochar sekam padi

Figure 1. Methane Emissions on Two Types of Land Use which are natural acid sulphate soil (S1) and intensively managed acid sulphate soil (S2) with the addition of ameliorant (B2) compost, (B3) biochar and Fertilizer during Growth of Rice

Remarks: P1 = Fertilization of NPK 100%; P2= Fertilization of NPK 75%; B0 = Without ameliorant; B1 = farmers practise; B2 = 50% of Straw compost + 50% Purun Compost; B3 = Biochar rice husks



Gambar 2. Korelasi emisi metana pada lahan sulfat masam alami (S1) dengan lahan sulfat masam yang dibudidayakan secara intensif (S2)

Figure 2. Correlation of methane emissions on natural acid sulphate soil (S1) and intensively managed acid sulphate soil (S2)

tanah pada lahan rawa sekitar 70% didominasi oleh metana dari total karbon yang lain. Dalam dinamika metana padi memiliki beberapa peranan yaitu: (1) sumber substrat metanogen, (2) transport metana melalui rongga udara jaringan aerenkhima dan (3) pengoksidasi metana potensial dalam lingkungan mikro rizosfer (Dubey, 2005).

Tabel 1. Koefesien Korelasi Pearson, N=21. Prob > |r| under H0: Rho=0

Table 1. Pearson's coefficient of correlation, N=21. Prob > |r| under H0: Rho=0

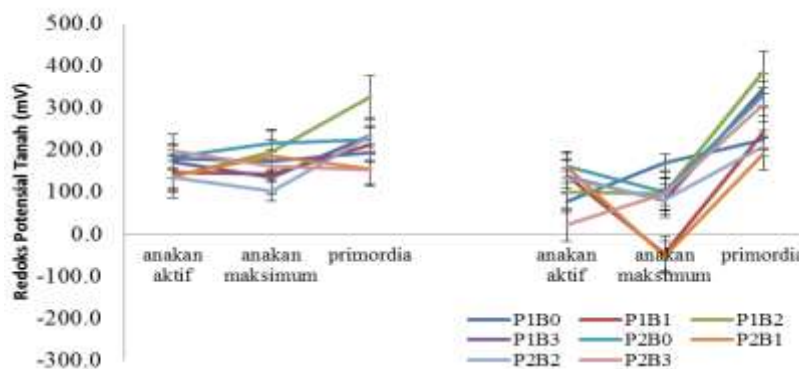
	S1	S2
S1	1.00	0.91 <.0001
S2	0.91 <.0001	1.00

Potensial redoks tanah

Respirasi mikroba dalam tanah berkaitan dengan proses oksidasi reduksi yang mempengaruhi nilai potensial redoks (Eh) dan menjadi indikator proses biogeokimia dalam tanah. Kondisi oksidatif dan reduktif tanah ditunjukkan oleh nilai potensial redoks. Brettar *et al.* (2002) melaporkan bahwa di tanah tergenang di Rhinau, France peningkatan kandungan bahan organik tanah menurunkan nilai potensial redoks tanah dengan nilai korelasi sebesar $r = -0,87$ yang disebabkan oleh konsumsi oksigen dalam jumlah besar pada proses oksidasi yang terjadi dalam tanah membentuk senyawa organik,

sehingga kondisi tanah menjadi semakin reduktif. Aktivitas bakteri metanogen akan terhambat dengan keberadaan O_2 . Dubey (2005) melaporkan bahwa bakteri metanogen termasuk golongan bakteri mesofilik pembentuk metana pada dekomposisi bahan organik secara anaerob yang terdapat disekitar perakaran padi sawah.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai potensial redoks tanah berkisar antara -54 mV sampai 385 mV (Gambar 3). Masih tingginya nilai redoks tanah menunjukkan bahwa kondisi tanah pada saat penelitian berlangsung masih cukup oksidatif terkait dengan curah hujan yang rendah pada saat penelitian berlangsung pada bulan April sampai Agustus yaitu <100 mm (Gambar 4), sehingga emisi metana yang dilepaskan selama satu musim tanam di lahan sulfat masam lebih rendah hanya berkisar 2,33 sampai 30,66 $kg\ ha^{-1}\ musim^{-1}$ dibandingkan emisi metana yang dilepaskan dari pertanaman padi di lahan sawah irigasi berkisar 74-218 $kg\ ha^{-1}\ musim^{-1}$ (Wihardjaka *et al.* (1997), Wihardjaka *et al.* (1999) dan Setyanto *et al.* (2004). Metana akan terbentuk pada kondisi yang reduktif, karena bakteri metanogen sebagai penghasil CH_4 hidup pada kondisi anaerob dengan potensial redoks <-200 mV (Minamikawa and Sakai, 2006). Ketersediaan oksigen dalam kondisi tanah yang jenuh air mempengaruhi aktivitas bakteri metanogen dan metanotrof. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penurunan nilai potensial redoks hanya mencapai -54 mV. Hal ini mengindikasikan bahwa kondisi tanah cukup oksidatif, sehingga jumlah CH_4 yang dilepaskan masih rendah.

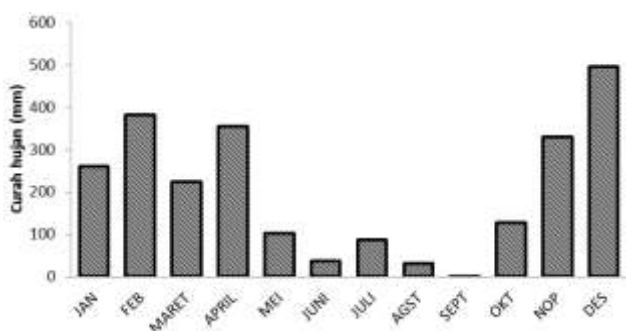


Gambar 3. Dinamika nilai potensial redoks tanah (Eh) pada pengelolaan tradisional (S1) dan pengelolaan intensif (S2) perlakuan amelioran (B2) kompos dan (B3) biochar serta pupuk (P) selama fase pertumbuhan padi

Keterangan: P1=Pemupukan NPK 100%; P2= Pemupukan NPK 75%; B0=Tanapa amelioran; B1=Pola petani lahan pasang surut; B2=Kompos 50%jerami padi+50% purun tikus; B3=Biochar sekam padi

Figure 3. The dynamics of soil redox potential (Eh) on natural acid sulphate soil (S1) and intensively managed acid sulphate soil (S2) with the addition of ameliorant (B2) compost, (B3) biochar and Fertilizer during Growth of Rice

Remarks: P1 = Fertilization of NPK 100%; P2= Fertilization of NPK 75%; B0 = Without ameliorant; B1 = farmers practise; B2 = 50% of Straw compost + 50% Purun Compost; B3 = Biochar rice husks



Gambar 4. Data curah hujan tahun 2015 Desa Puntik Kecamatan Mandastana, Kabupaten Barito Kuala, Kalimantan Selatan

Figure 4. The data of rainfall of 2015 at District of Mandastana, Barito Kuala, South Kalimantan

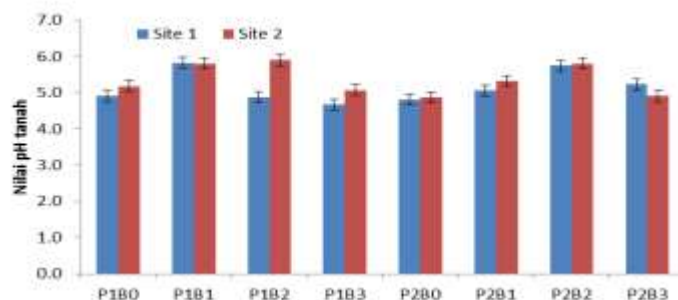
Sumber: Badan Meteorologi Klimatologi Geofisika, Stasiun Klimatologi, Banjarbaru

pH Tanah

Proses reduksi oksidasi besi dan sulfat di tanah sulfat masam merupakan faktor utama yang mempengaruhi pH tanah. Kongchum (2005) melaporkan bahwa penggenangan pada tanah sulfat masam nyata mengontrol pH tanah karena pada kondisi tergenang terjadi pembebasan OH⁻ dan konsumsi H⁺ yang diikuti dengan

penurunan aktivitas dari ion H⁺ sehingga pH tanah meningkat, selain itu peningkatan pH juga ditentukan oleh nisbah konsumsi H⁺/konsumsi elektron. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai pH tertinggi terlihat pada perlakuan amelioran B2 (kompos) pada kedua tipe penggunaan lahan (gambar 5). Reddy & DeLaune (2008) mengatakan di lahan rawa bahan organik berperan sebagai donor elektron, sehingga mempengaruhi nilai potensial redoks tanah yang menunjukkan kondisi oksidatif dan reduktif tanah. Selain itu bahan organik juga memiliki kemampuan mengkhelat unsur-unsur meracun dalam tanah seperti Fe²⁺ (*besi ferro*) yang merupakan hasil reduksi Fe³⁺.

Peningkatan pH tanah mendekati netral akan meningkatkan aktivitas bakteri metanogen dalam mereduksi CO₂ menjadi CH₄ karena sebagian besar bakteri metanogen bersifat neutrofilik, yaitu hidup pada kisaran pH mendekati netral. Yavitt *et al.* (2004) melaporkan bahwa proses metanogenesis di lahan rawa dibatasi oleh nilai pH tanah yang terkait dengan aktivitas mikroorganisme. Hasil penelitian menunjukkan bahwa korelasi antara fluks CH₄ dengan nilai pH tanah masih belum nyata, sehingga proses metanogenesis rendah, disamping banyaknya akseptor elektron lain yakni besi dan sulfat. Sesuai dengan temuan Van Bodegom *et al.* (2004) bahwa proses metanogenesis pada lahan tergenang dibatasi oleh keberadaan besi ferri karena secara



Gambar 5. Nilai pH tanah pada lahan sulfat yang dikelola secara tradisional (S1) dan yang dibudidayakan secara intensif (S2) dengan perlakuan amelioran (B2) kompos dan (B3) biochar serta pupuk (P) selama fase pertumbuhan padi

Keterangan: P1=Pemupukan NPK 100%; P2= Pemupukan NPK 75%; B0=Tanapa amelioran; B1=Pola petani lahan pasang surut; B2=Kompos 50%jerami padi+50% purun tikus; B3=Biochar sekam padi

Figure 5. Soil pH of natural acid sulphate soil (S1) and intensively managed acid sulphate soil (S2) with the addition of ameliorant (B2) compost, (B3) biochar and Fertilizer during Growth of Rice

Remarks: P1 = Fertilization of NPK 100%; P2= Fertilization of NPK 75%; B0 = Without ameliorant; B1 = farmers practise; B2 = 50% of Straw compost + 50% Purun Compost; B3 = Biochar rice husks

termodinamika pada kondisi reduktif metana terbentuk setelah sebagian besar besi ferri tereduksi menjadi besi ferro.

Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Padi

Tinggi Tanaman

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pertambahan tinggi tanaman padi pada semua perlakuan terlihat meningkat hingga mencapai puncak pada fase vegetatif maksimum kemudian menurun setelah memasuki fase primordia (Gambar 6). Hal tersebut terkait dengan proses penggenangan pada fase vegetative karena Menurut Ponnampurna (1985) mengatakan bahwa penggenangan mula-mula akan meningkatkan kadar Fe^{2+} hingga mencapai puncak dan menurun terus mendatar. Tingginya konsentrasi Fe^{2+} tanah mengakibatkan menurunnya ketersediaan P dalam tanah karena fosfat bereaksi cepat membentuk fosfat hidroksi yang sukar larut sehingga ketersediaan P tanah menurun. Fosfor merupakan unsur yang cukup berperan terhadap pertumbuhan tanaman terutama tinggi tanaman.

Pertambahan tinggi tanaman padi pada ketiga periode pengamatan menunjukkan tidak ada interaksi antar perlakuan amelioran pada kedua tipe penggunaan lahan. Tinggi tanaman tertinggi terlihat pada perlakuan P1 pada tipe penggunaan lahan intensif (site 2) mencapai 93,6 cm. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Putra (2012) menunjukkan bahwa pemberian pupuk NPK sebesar 250

kg ha⁻¹ meningkatkan tinggi tanaman mencapai 117,3 cm yang tidak berbeda nyata dengan pemberian pupuk NPK sebesar 200 kg ha⁻¹ + Urea 100 kg ha⁻¹ + Pupuk daun 2 liter ha⁻¹ mencapai 102,3 cm. Ade alavan *et al.* (2015) melaporkan bahwa pemberian pupuk baik itu jenis atau takaran mempengaruhi terhadap respons tanaman padi sehingga berdampak terhadap pertumbuhan padi khususnya pada tinggi tanaman.

Pada pengamatan fase generatif dan panen tidak terlihat interaksi antar perlakuan, hanya pada pengamatan pada fase primordia perbedaan tipe penggunaan lahan terlihat menunjukkan beda nyata terhadap tinggi tanaman. Hal ini terkait dengan kesuburan tanah yang lebih baik pada lahan yang intensif dibudidayakan (Site 2) dibandingkan lahan alami (Site 1) dan diperkuat dengan data analisa tanah pada kedua sistem pengelolaan. Terlihat bahwa kandungan P-tersedia pada lahan yang intensif dibudidayakan dilapisan olah (0-20 cm) sebesar 33,12 mg kg⁻¹ yang lebih tinggi dibandingkan di lahan yang belum dibudidayakan hanya sebesar 23,29 mg kg⁻¹ (Tabel 2).

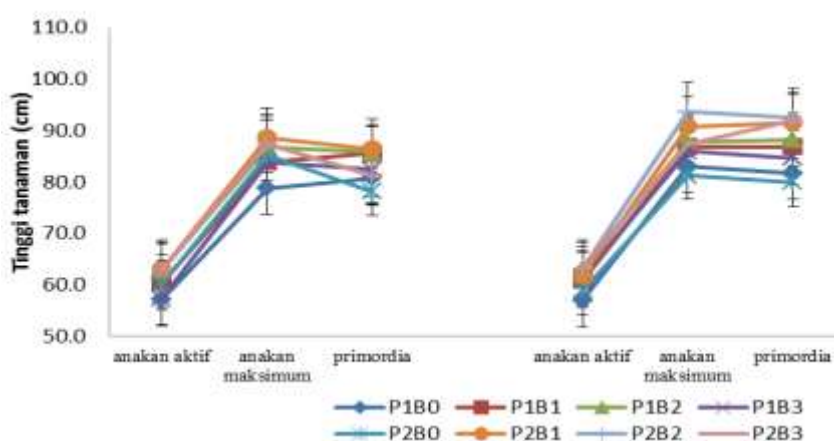
Hasil Tanaman Padi

Perlakuan kompos yang diuji di lapangan masih belum mampu mendekati potensi hasil dari varietas padi yang digunakan. Hasil gabah kering panen yang dihasilkan pada penelitian ini masih lebih rendah dibandingkan dengan potensi hasil dari varietas padi karena produksi padi dipengaruhi oleh faktor lingkungan yang kurang dapat dikendalikan pada percobaan lapangan. Menurut Makarim *et al.* (1993) bahwa hasil maksimal merupakan potensi

hasil yang besarnya beragam menurut kondisi iklim terutama radiasi matahari dan suhu serta kesuburan tanah yang sifatnya spesifik lokasi. Jadi pemberian pupuk sebanyak apapun tidak menyebabkan hasil tanaman melampaui potensi hasilnya. Hasil gabah kering panen tertinggi terlihat pada perlakuan B2 di lahan yang intensif dibudidayakan (Site 2) dengan perlakuan pemupukan P1 (100%) sebesar 3,4 t ha⁻¹. Hal ini berkaitan dengan ketersediaan hara N, P, K yang lebih tinggi. Peningkatan ketersediaan hara N, P, K pada kedua jenis lahan sulfat masam baik alami dan intensif terkait dengan pemberian kompos serta pemupukan N, P, K yang dilakukan. Hal ini sejalan dengan hasil gabah terendah terlihat pada

perlakuan control (tanpa ameliorant) hanya sebesar 1,1 t ha⁻¹ (Gambar 7). Pemberian pupuk NPK memiliki peran penting dalam memperbaiki pertumbuhan tanaman padi. Pemupukan ini berdampak negatif terhadap pembentukan gas metana. Indeks produksi padi dapat digunakan untuk menduga besarnya emisi metana yang dilepaskan terlihat pada Gambar 7.

Indeks produksi terendah terlihat pada perlakuan pola petani yaitu 82,8 (S1) dan 155,9 (S2). Dan nilai indeks tertinggi terlihat pada perlakuan Kontrol yaitu 788,6 (Site 1) dan 513,4 (Site 2) (Tabel 3). Indeks produksi memberikan titik temu antara produksi dengan emisi metana apabila budidaya padi ditujukan untuk



Gambar 6. Tinggi tanaman pada lahan sulfat yang dikelola secara tradisional (S1) dan yang dikelola intensif (S2) dengan perlakuan amelioran (B2) kompos dan (B3) biochar serta pupuk (P) selama fase pertumbuhan padi

Keterangan: P1= Pemupukan NPK 100%; P2= Pemupukan NPK 75%; B0= Tanpa amelioran; B1= Pola petani lahan pasang surut; B2= Kompos 50% jerami padi + 50% purun tikus; B3= Biochar sekam padi

Figure 6. The Plant height on natural acid sulphate soil (S1) and intensively managed acid sulphate soil (S2) with the addition of ameliorant (B2) compost, (B3) biochar and Fertilizer during Growth of Rice

Remarks: P1 = Fertilization of NPK 100%; P2 = Fertilization of NPK 75%; B0 = Without ameliorant; B1 = farmers practise; B2 = 50% of Straw compost + 50% Purun Compost; B3 = Biochar rice husks

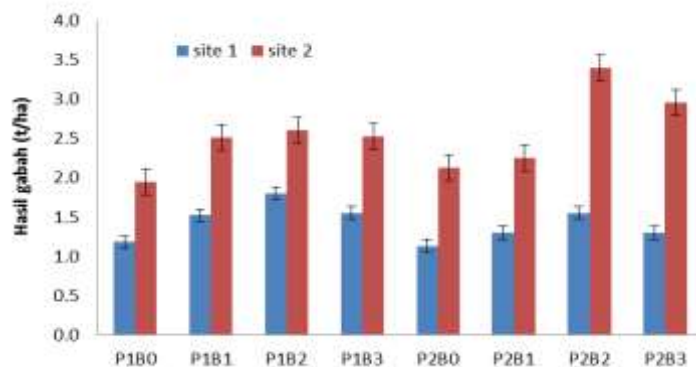
Tabel 2. Sifat kimia tanah sulfat masam yang diteliti

Table 2. Chemical properties of the studied acid sulphate soils

Parameter	S1			S2		
	0-20	20-40	40-60	0-20	20-40	40-60
pH H ₂ O	4,01	3,99	4,09	5,12	5,13	4,41
Bahan Organik (%)	12,17	10,60	9,40	16,38	14,36	14,12
C-organik (%)	7,06	6,15	5,45	9,50	8,33	8,19
N-total (%)	0,27	0,21	0,22	0,28	0,20	0,23
K-tds (cmol(+) kg ⁻¹)	0,11	0,13	0,17	0,11	0,15	0,21
P-tds (mg kg ⁻¹)	23,29	21,32	11,21	33,12	29,19	28,34

Keterangan: S₁: lahan sulfat masam yang tidak intensif dibudidayakan (alami) , S₂: lahan yang intensif dibudidayakan

Remarks: S1: traditionally managed acid sulphate soil, S2: intensively managed acid sulphate soil



Gambar 7. Hasil gabah kering panen (GKP) pada kedua tipe penggunaan lahan yaitu lahan sulfat yang dikelola secara tradisional (S1) dan yang dikelola secara intensif (S2) dengan perlakuan amelioran (B2) kompos dan (B3) biochar serta pupuk (P) selama fase pertumbuhan padi

Keterangan: P1=Pemupukan NPK 100%; P2= Pemupukan NPK 75%; B0=Tanapa amelioran; B1=Pola petani lahan pasang surut; B2=Kompos 50% jerami padi+50% purun tikus; B3=Biochar sekam padi

Figure 7. The grain yield on both types of land use which are natural acid sulphate soil (S1) and intensively managed acid sulphate soil (S2) with the addition of ameliorant (B2) compost, (B3) biochar and Fertilizer during Growth of Rice

Remarks: P1 = Fertilization of NPK 100%; P2= Fertilization of NPK 75%; B0 = Without ameliorant; B1 = farmers practise; B2 = 50% of Straw compost + 50% Purun Compost; B3 = Biochar rice husks

Tabel 3. Emisi metana dan hasil gabah padi pada lahan sulfat yang dikelola secara tradisional (S1) dan secara intensif (S2) dengan perlakuan amelioran (B2) kompos dan (B3) biochar serta pupuk (P) selama fase pertumbuhan padi

Table 3. Emissions of methane and rice grain yield on natural acid sulphate soil (S1) and intensively managed acid sulphate soil (S2) with the addition of ameliorant (B2) compost, (B3) biochar and fertilizer during rice growth

Perlakuan	Emisi metana kg ha ⁻¹ musim ⁻¹	Hasil gabah padi t ha ⁻¹ musim ⁻¹	Indeks Produksi Padi
S1P1B0	7,71	1,18	153,4
S1P1B1	9,40	1,53	162,2
S1P1B2	4,41	1,80	408,1
S1P1B3	3,20	1,55	484,9
S1P2B0	3,00	1,13	377,3
S1P2B1	2,72	1,30	478,3
S1P2B2	2,62	1,55	591,7
S1P2B3	2,33	1,30	558,1
S2P1B0	2,47	1,95	788,6
S2P1B1	30,40	2,52	82,8
S2P1B2	12,94	2,60	201,0
S2P1B3	11,85	2,53	213,2
S2P2B0	4,14	2,13	513,4
S2P2B1	14,44	2,25	155,9
S2P2B2	7,75	3,40	438,9
S2P2B3	6,54	2,95	451,3

Keterangan: P1=Pemupukan NPK 100%; P2= Pemupukan NPK 75%; B0=Tanapa amelioran; B1=Pola petani lahan pasang surut; B2=Kompos 50% jerami padi+50% purun tikus; B3=Biochar sekam padi

Remarks: P1 = Fertilization of NPK 100%; P2= Fertilization of NPK 75%; B0 = Without ameliorant; B1 = farmers practise; B2 = 50% of Straw compost + 50% Purun Compost; B3 = Biochar rice husks

meningkatkan hasil dan menurunkan emisi metana. Akan tetapi, mengingat rendahnya tingkat hasil tanaman untuk dapat menurunkan emisi (perlakuan S1P1), perlakuan tersebut tidak direkomendasikan karena bagaimanapun peningkatan hasil harus merupakan tujuan utama produksi.

Dengan demikian perlakuan yang direkomendasikan adalah S2P2B2 karena memberikan hasil padi tertinggi sebesar 3,4 t ha⁻¹.

Kesimpulan dan Saran

Pertumbuhan tanaman padi di lahan sulfat masam yang intensif dibudidayakan lebih baik dibandingkan di lahan sulfat masam alami, namun emisi metana yang dilepaskan lebih besar. Emisi metana tertinggi sebesar 30,40 kg ha⁻¹ musim⁻¹ dengan nilai indeks produksi (produksi berbanding emisi metana) sebesar 82.8 ditunjukkan pada perlakuan pola petani dan pemupukan NPK 100% dari lahan sulfat masam yang intensif dibudidayakan.

Hasil gabah tertinggi sebesar 3.4 t ha⁻¹ ditunjukkan pada perlakuan pemberian kompos dan pemupukan NPK 75% di lahan sulfat masam yang intensif dibudidayakan. Perlakuan ini memberikan nilai indeks produksi sebesar 438.9 dan emisi metana sebesar 7,75 kg ha⁻¹ musim⁻¹. Indeks produksi padi tertinggi terlihat pada perlakuan tanpa amelioran (kontrol) dengan pemupukan NPK 100% yaitu sebesar 788.6, namun hasil gabah yang didapatkan hanya sebesar 1,95 t ha⁻¹ dan emisi metana sebesar 2,47 kg ha⁻¹ musim⁻¹.

Walaupun indeks produksi paling tinggi dan nilai emisi paling rendah pada perlakuan tanpa amelioran dan dengan pemupukan NPK 100%, namun mengingat perbedaan hasil yang signifikan antar berbagai perlakuan, dan karena hasil tertinggi lebih penting dibandingkan penurunan emisi metana maka perlakuan yang disarankan untuk diterapkan oleh petani adalah perlakuan pemberian kompos dan pemupukan NPK 75% dengan sistem pengelolaan intensif.

Daftar Pustaka

- Ade A., R. Hayati. and E. Hayati. 2015. Pengaruh Pemupukan Terhadap pertumbuhan Beberapa varietas Padi Gogo (*Oryza sativa* L.). *Jurnal Floratek* Volume 10. p. 61-68
- Alihamsyah T. 2005. Pengembangan Lahan Rawa Lebak untuk Usaha Pertanian. Banjarbaru. Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Jakarta.
- Brettar., J. Miguel., P. Sanchez and M. Tremolieres. 2002. Nitrate elimination by denitrification in hardwood forest soils of the Upper Rhine floodplain—correlation with redox potential and organic matter. *Hydrobiologia*. 469 (1-3): 11-21.
- Changchun, S., B. Yan., Y. Wang., Y. Lou and Z. Zhao. 2003. Fluxes of carbon dioxide and methane from swamp and impact factors in Sanjiang Plain, China. *Chinese Science Bulletin*. 48 (24): 2749-2753.
- Conrad, R. 1989. Control of methane production in terrestrial ecosystems. In M.O. Andreae and D.S. Schimel (Eds). *Exchange of Trace Gases between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere*. John Wiley & Sons. Chichester. New York. Brisbane. Toronto. Singapore. p. 301-343
- Dubey, S.K. 2005. Microbial ecology of methane emission in rice agroecosystem: A Review. *Appl.Eco.EnvIRON. Res.* 3(2). p.1-27.
- Esmizade, Z., A. Landi. and A. Gilani. 2010. Evaluating the amount of carbonic greenhouse gasses (GHGs) emission from rice paddies. *World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World*. 1 – 6 August 2010, Brisbane, Australia. 68-70p.
- Freibauer A., D.A.R. Mark., P. Smith and J. Verhagen. 2004. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma* volume 122. p. 1-23
- Gomez, K.A and A.A. Gomez. 1995. *Prosedur Statistik untuk Penelitian Pertanian*. Edisi kedua. E. Sjamsuddin & J. S. Baharsjah (penerjemah). Penerbit Universitas Indonesia. p.698.
- Hou, A.X., G.X. Chen., Z.P. Wang., O. Van Cleemput and W.H. Patrick. 2000. Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice Field in Relation to Soil Redox and Microbiological Processes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 2180-2186.
- Huang, G.F., J.W.C. Wong., Q.T. Wu and B.B. Nagar. 2004. Effect of C/N on Composting of Pig Manure With Sawdust. *Waste Management*. 24; 805–813.
- Karhu. K., T. Mattila., I. Bergstrom and K. Regina. 2011. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity—results from a short-term pilot field study. *Agr Ecosyst Environ* 140. p.309-313
- Kongchum. 2005. Effect of Plant Residue and Water Management Practises on Soil Redox Chemistry, Methane Emission and Rice Productivity. A Dissertation, Louisiana State. 189p.
- Lal. R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*. Volume 304. Issue: 5677. p.1623-1627
- Lehmann J, and J. Steven. 2009. Biochar for environmental management. *Science and Technology*. Volume 1. p.449.
- Liu Y., M. Yang., Y. Wu., H. Wang., Y. Chen and W. Wu. 2011. Reducing CH₄ and CO₂ Emissions from Waterlogged Paddy Soil With Biochar. *J. Soils Sediments*. 11: 930-939. DOI 10.1007/s11368-011-0376-x
- Liu CW and CY. Wu. 2004. Evaluation of methane emission from Taiwanese paddies. *Sci Total Environ* 333. p.195-207
- Makarim, A.K., A. Hidayat., S. Roechan., I. Nasution., M.F. Muhadjir., S. Ningrum and M. Djazuli & Murtado. 1993. Status P dan pendugaan keperluan pupuk pada padi sawah. Dalam: *Prosiding Lokakarya Penelitian Komoditas dan Studi Khusus 1992*. Volume 3: Path. Hal 199-209. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Departemen Pertanian. Jakarta.
- Minamikawa, K and N. Sakai. 2006. The effect of water management based on soil redox potential on methane emission from two kinds of paddy soils in Japan. *Agric. Ecosyst. Environ.* 107: 397-407.
- Ponnamperuma. 1977. Behavior of minor elements in paddy soils. *IRRI Res. Paper Series*. 8 Mei 1977. 15p.
- Putra, S. 2012. Pengaruh Pupuk NPK Tunggal, Majemuk dan Pupuk Daun Terhadap peningkatan Produksi Padi Gogo Varietas Situ Patenggang. *Agrotrop. Balai Pengkajian Teknologi Pertanian Jawa Barat*. Volume 2 (1). p.55-61
- Reddy, K.R., and R.D. Delaune. 2008. *The Biogeochemistry of Wetland; Science and Application*. CRC Press. New York. p.774
- Roger, P. 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *Eur. J. Soil Biol.* 37, 25-50.
- Setyanto, P., A.B. Rosenani, R. Boer, C.I. Fauziah, and M.J. Khanif. 2004. The effect of rice cultivars on methane emission from irrigated rice field. *Indon. J. Agric. Sci* 5(1):

20-31.

- Setyanto, P. 2006. Varietas Padi Rendah Emisi Gas Rumah Kaca. *Warta Penelitian dan Pengembangan Pertanian*. Volume 28. N0.4. p. 12-13
- Subagyo. 2006. Klasifikasi dan Penyebaran Lahan Rawa. Dalam: *Karakteristik & Pengelolaan Lahan Rawa*. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Departemen Pertanian. p. 1-99.
- Soil Survey Staff. 2010. *Keys to Soil Taxonomy*. Eleventh Edition. Handbook. 336, Natural Resources Conservation Service-USDA. 346p
- Whalen, S.C. 2005. Biogeochemistry of methane exchange between natural wetlands and the atmosphere. *Environm. Engin. Sci.* 22(1). P.73-92
- Wihardjaka, A., S.D. Tandjung., B.H. Sunarminto and E. Sugiharto. 2011. Methane emission from direct seeded rice under the influences. *Indonesian Journal of Agricultural Science*.13(1): 1-11.
- Yan XY., ZC. Cai., T. Ohara and H. Akimoto. 2003. Methane emission from rice fields in mainland China: amount and seasonal and spatial distribution. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. Volume: 108, Issue: D16, Pages: 4505.
- Yavitt, J., C. Williams and R. Wieder. 2004. Soil chemistry versus environmental controls on production of CH₄ and CO₂ in northern peatlands. *European Journal of Soil Science*. 56 (2); 169-178.
- Yuan, Q., J. Pump and R. Conrad. 2012. Straw application in paddy soil enhances methane production also from other carbon sources. *Biogeosciences Discuss.* 10: 14169–14193.