

Emisi dan Absorpsi Karbon pada Penggunaan Amelioran di Lahan Padi Gambut

Carbon Emission and Absorption of Ameliorant Amendments in Peat Soil Paddy Rice

H.L. SUSILAWATI¹, P. SETYANTO², DAN M. ARIANI¹

ABSTRAK

Salah satu cara dalam rangka memenuhi kebutuhan pangan nasional adalah dengan ekstensifikasi lahan pertanian di lahan gambut. Lahan gambut banyak mengandung sumber-sumber bahan organik sehingga merupakan satu sumber penghasil emisi gas rumah kaca (GRK) yaitu karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄) dan dinitrogen oksida (N₂O). Penggunaan tanah gambut untuk lahan pertanian akan merubah kondisi alamnya. Perubahan tersebut dikhawatirkan dapat meningkatkan emisi GRK. Salah satu cara untuk menekan emisi GRK dan meningkatkan produksi padi di tanah gambut adalah dengan penambahan bahan amelioran. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penggunaan bahan amelioran terhadap neraca karbon dari lahan padi di tanah gambut. Penelitian dilaksanakan KP Balai Penelitian Lingkungan Pertanian pada tahun 2008. Contoh tanah gambut sebanyak 8 ton dibawa dan ditempatkan ke dalam 12 mikroplot dengan ukuran 1,5 x 1,5 x 0,8 m. Rancangan percobaan yang digunakan adalah rancangan acak kelompok dengan empat perlakuan amelioran yaitu kontrol, dolomit 2 t ha⁻¹, jerami kering 2 t ha⁻¹ dan pupuk kandang 2 t ha⁻¹ yang diulang tiga kali. Varietas padi yang ditanam adalah Batanghari dan ditanam pada usia 21 hari setelah persemaian. Fluks gas CH₄ diukur secara otomatis dengan menggunakan GC yang dilengkapi dengan FID (*flame ionisation detector*). Emisi gas CO₂ dan N₂O dilakukan secara manual dengan menggunakan GC yang dilengkapi detektor ECD (*electron capture detector*) dan TCD (*thermal conductivity detector*). Kandungan organik karbon pada tanaman ditentukan dengan teknik *dichromate oxidation-titration*. Hasil penelitian diperoleh bahwa net karbon neraca karbon terendah adalah pada perlakuan pupuk kandang sebesar 4.962,0 kg-C ha⁻¹ disusul dolomit, tanpa amelioran, dan jerami kering secara berturut-turut 5.270,2; 9.534,7; dan 10.115,6 kg-C ha⁻¹. Hasil gabah tertinggi adalah dengan urutan jerami kering, dolomit, tanpa amelioran dan pupuk kandang sebesar 4,98; 4,92; 4,69; dan 4,54 t ha⁻¹. Perlakuan dolomit memiliki rasio tertinggi sebesar 933,58 kg gabah/ton CO₂-C disusul pupuk kandang sebesar 913,30 kg gabah/ton CO₂-C, tanpa amelioran dan jerami kering masing-masing sebesar 492,13 dan 491,59 kg gabah/ton CO₂-C.

Kata kunci : Emisi GRK, Kandungan C-organik, Neraca karbon

ABSTRACT

Agricultural land extensification on peat land is one solution to fulfill national needed on food. Peat soil contains organic matter therefore it becomes one source of greenhouse gas emissions (GHG), i.e. Dioxide carbon (CO₂), methane (CH₄), and NO₂. Land use for agricultural activities will change the natural condition of peat soil. The changes could increase GHG emissions. One way to reduce GHG emissions and to increase rice production in peat soils is by adding of ameliorant. The aim

of this study was to determine the effect of ameliorant on carbon balance at peat soil paddy rice. The experiment was conducted at research station of Agricultural Environmental Research Institute in 2008. Samples of peat soil as much as 8 tons was carried from South Kalimantan and placed into 12 microplots. The size of microplot was 1.5 x 1.5 x 0.8 m. Experimental design used randomized block design with four treatments: control, dolomite 2 t ha⁻¹, rice straw 2 t ha⁻¹ and animal manure 2 t ha⁻¹ which was repeated three times. Rice variety was Batanghari and transplanted at age 21 days after seeding. Fluxes of CH₄ were measured automatically using GC which equipped with FID (Flame Ionization Detector). Emissions of CO₂ and N₂O were measured manually using GC which equipped with ECD detector (electron capture detector) and TCD (thermal conductivity detector). The content of organic carbon in plants was determined by dichromate oxidation technique-titration. The lowest of net carbon/ carbon budget is animal manure treatment: 4,962.0 kg-C ha⁻¹ followed by dolomite, without ameliorant, and rice straw: 5,270.2; 9,534.7; and 10,115.6 kg-C/ha respectively. The highest yield is rice straw, followed by dolomite, without ameliorant and manure: 4.98, 4.92, 4.69, and 4.54 t ha⁻¹ respectively. Dolomite treatment has the highest ratio of yield GWP⁻¹: 933.58 kg of yield/ton of CO₂-C followed by animal manure 913.30 kg of yield /ton of CO₂-C, without ameliorant and rice straw: 492.13 and 491.59 kg of yield/ton of CO₂-C respectively.

Keywords : GHG emissions, C-organic, Carbon balance

PENDAHULUAN

Salah satu cara dalam rangka memenuhi kebutuhan pangan nasional adalah dengan ekstensifikasi lahan pertanian di lahan gambut. Luas lahan gambut di Indonesia diperkirakan 20,6 juta hektar atau sekitar 10,8% dari luas daratan Indonesia (Wetland, 2006). Akan tetapi, lahan gambut yang layak untuk lahan pertanian sekitar 6 juta ha (Agus, 2008). Lahan gambut berperan penting dalam siklus karbon (C) global dan perubahan iklim (Sorenson, 1993), meskipun luasannya di permukaan bumi hanya sekitar 3% akan tetapi kemampuannya untuk menyimpan karbon organik sekitar 26% (Smith *et al.*, 2004) dan merupakan sink dari C dan N dari

1. Peneliti pada Balai Penelitian Lingkungan Pertanian, Pati.
2. Kepala Balai Penelitian Agroklimate dan Hidrologi, Bogor.

akumulasi C organik (Gorham, 1991) dan N (Driesen, 1978).

Lahan gambut banyak mengandung sumber-sumber bahan organik sehingga merupakan satu sumber penghasil emisi gas rumah kaca (GRK) yaitu karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4) dan dinitrogen oksida (N_2O). Menurut Denman *et al.* (2007) bahwa lahan basah termasuk gambut merupakan sumber terbesar gas rumah kaca (GRK) khususnya metana (CH_4). Dalam ekosistem gambut, CH_4 diproduksi secara biologis di lokasi anaerobik, dengan CO_2 dan H_2 atau asetat sebagai substrat utama (Hornibrook *et al.*, 1997), dan teroksidasi secara biologis di lokasi aerobik. Tanaman yang memiliki aerenchyma bisa mempercepat pelepasan CH_4 ke atmosfer (Whiting and Chanton, 1992).

Tanaman dapat membantu mengurangi konsentrasi C di atmosfer melalui fotosintesis. CO_2 yang diserap tanaman melalui proses fotosintesis diubah menjadi karbohidrat dan disekuestrasi ke dalam organ tumbuhan seperti batang, daun, bunga dan buah. Pengukuran jumlah C yang tersimpan dalam biomasa tanaman dalam suatu lahan dapat menggambarkan jumlah CO_2 yang diserap oleh tanaman (absorpsi). Neraca karbon diestimasikan dari selisih jumlah karbon yang tersedia dengan yang hilang.

Penggunaan tanah gambut untuk lahan pertanian akan merubah kondisi alamnya. Perubahan tersebut dikhawatirkan dapat meningkatkan emisi GRK. Salah satu cara untuk menekan emisi GRK dan meningkatkan produksi padi di tanah gambut adalah dengan penambahan bahan amelioran. Hal ini disebabkan karena amelioran berfungsi sebagai agen oksidasi/penerima elektron (oksidan) dan *soil amendment* karena kandungan yang terdapat didalamnya (Ali *et al.*, 2008). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penggunaan bahan amelioran terhadap neraca karbon dari lahan padi di tanah gambut.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan di Kebun Percobaan (KP) Balai Penelitian Pencemaran Lingkungan Pertanian (Balingtan), Kecamatan Jaken, Kabupaten Pati,

Provinsi Jawa Tengah. pada bulan Maret - Juni (MK 2008).

Tanah gambut diambil dari Desa Pematang Panjang, Kecamatan Gambut, Kabupaten Banjar, Kalsel (17 km dari Banjarmasin). Tanah gambut yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanah gambut yang belum pernah dikelola untuk lahan sawah. Tanah gambut diambil hanya sebatas lapisan olah (kedalaman 20 cm). Pengambilan tanah dilakukan di beberapa titik pengambilan di satu lokasi kemudian tanah tersebut dicampur untuk mengurangi variabilitas tanah dan diangkut menggunakan truk. Sebanyak 8 ton tanah gambut ditempatkan di mikroplot berukuran 1,5 x 1,5 x 0,8 m di KP Balingtan, Jakenan, Pati, Jawa Tengah. Jumlah mikroplot yang ada di Kebun Percobaan adalah 12.

Varietas padi yang digunakan adalah varietas Batanghari dan ditanam pindah pada usia 21 hari setelah persemaian. Ditanam pada jarak tanam 20 x 20 cm. Masing-masing titik persemaian ditanami 2-3 benih padi. Di sekeliling mikroplot juga ditanam benih yang sama untuk setiap perlakuan. Ketinggian air 5 cm dijaga setiap hari baik di dalam maupun di luar mikroplot. Pengeringan mikro plot dilakukan lima hari menjelang panen.

Pemupukan tanaman dengan takaran yaitu 120 kg N, 90 kg K, dan 60 kg P. Pupuk N dan K diberikan tiga kali yaitu 1/3 bagian saat tanam, 1/3 bagian saat tanaman berumur 21 hari setelah tanam (HST) dan sisanya pada 42 HST. Pupuk SP36 disebar seluruhnya pada tiga hari sebelum tanam.

Fluks gas CH_4 diukur secara otomatis dengan interval pengamatan seminggu sekali dimulai pada pukul 06.00 dan berakhir pada pukul 16.00 dengan menggunakan GC yang dilengkapi dengan FID (*flame ionisation detector*). Pengamatan fluks CO_2 dan N_2O dilakukan seminggu sekali secara manual. Interval waktu pengambilan sampel CO_2 pada menit ke-15, 30, 45, dan 60, dan pengamatan gas N_2O menggunakan interval 20, 40, 60, dan 80 menit. Analisis sampel gas CO_2 dan N_2O menggunakan GC yang dilengkapi detektor ECD (*electron capture detector*) dan TCD (*thermal conductivity detector*).

Sampel tanaman yang digunakan untuk mengetahui kandungan organik karbon diambil pada saat panen. Kandungan organik karbon pada tanaman ditentukan dengan teknik *dichromate oxidation-titration* yang dilakukan di laboratorium departemen ilmu tanah dan sumberdaya lahan IPB.

Rancangan percobaan yang digunakan adalah rancangan acak kelompok (RAK) dengan tiga ulangan. Perlakuannya adalah tanpa amelioran (kontrol), dolomit, jerami kering dan pupuk kandang. Untuk menghitung emisi gas GRK digunakan rumus :

$$E = \frac{dc}{dt} \times \frac{V_{ch}}{A_{ch}} \times \frac{mW}{mV} \times \frac{273}{273 + T}$$

dimana :

E = Emisi gas CH₄, CO₂, dan N₂O (mg m⁻² hari⁻¹)

dc/dt = Perbedaan konsentrasi CH₄, CO₂, dan N₂O per waktu (ppm menit⁻¹)

V_{ch} = Volume boks (m³)

A_{ch} = Luas boks (m²)

mW = Berat molekul CH₄, CO₂, dan N₂O (g)

mV = Volume molekul CH₄, CO₂, dan N₂O (22,41 l)

T = Temperatur rata-rata selama pengambilan sampel (°C)
(IAEA, 1993)

Untuk menghitung neraca karbon digunakan rumus :

Net Karbon (kg-C ha⁻¹) = ¹Kand C-organik (kg-C ha⁻¹) - GWP (kg CO₂-C ha⁻¹)

¹Kand C-Org = (²C-Orgg x ³GKG + ⁴C-Orga x ⁵Ba) + (⁶C-Orgj x ⁷Bj) + (⁸C-Orggu x ⁹Bgu)

dimana :

¹Kand C-Org = kandungan C-organik (kg-C ha⁻¹)

²C-Orgg = C-organik gabah (%)

³GKG = GKG KA 14%

⁴C-Orga = C-organik akar (%)

⁵Ba = berat akar KA 30%

⁶C-Orgj = C-organik jerami (%)

⁷Bj = berat jerami KA 30%

⁸C-Orggu = C-organik gulma (%)

⁹Bgu = berat gulma KA 30%

Data emisi CH₄, CO₂, N₂O dari tanaman dianalisis dengan menggunakan ANOVA (*analysis of variance*). Perbedaan dari masing-masing nilai tengah akan ditentukan dengan menggunakan uji Duncan pada P ≤ 0,05. Analisis statistik menggunakan *software* SAS (*system analysis statistic*) versi 6.01.

Tabel 1. Sifat fisik dan kimia tanah gambut

Table 1. Physical and chemical characteristic of peat soil

Analisis tanah	Kec. Gambut
pH (Ekstrak 1:5)	
H ₂ O	4,1
KCl	3,9
Bahan organik (%)	
C (Walkley & Black)	14,08
N (Kjeldahl)	0,26
C/N Ratio	54
Nilai tukar kation (NH ₄ Asetat 1N, pH 7)	
Ca (cmol _c kg ⁻¹)	1,41
Mg (cmol _c kg ⁻¹)	1,43
K (cmol _c kg ⁻¹)	0,05
Na (cmol _c kg ⁻¹)	0,29
Jumlah (cmol _c kg ⁻¹)	3,18
KTK (cmol _c kg ⁻¹)	36,23
KB ⁺ (%)	9
C (%)	
Asam humat	6,09
Asam fulvat	0,05

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemberian amelioran pada tanah gambut baik itu dolomit, jerami kering dan pupuk kandang justru meningkatkan emisi CO₂. Emisi CO₂ terendah terdapat pada tanpa amelioran, diikuti oleh pupuk kandang, dolomit dan jerami kering dengan nilai kisaran antara 4.784-5.947 kg ha⁻¹musim⁻¹ (Tabel 2). Emisi CH₄ yang dihasilkan jerami kering yaitu sebesar 853,0 kg ha⁻¹, diikuti tanpa amelioran, dolomit dan pupuk kandang berturut-turut sebesar 837,7; 593,7; dan 546,2 kg ha⁻¹musim⁻¹. Penambahan pupuk kandang dan dolomit mampu menekan emisi CH₄ sebesar 35 dan 29%. Menurut Setyanto *et al.* (2004), besarnya emisi CH₄

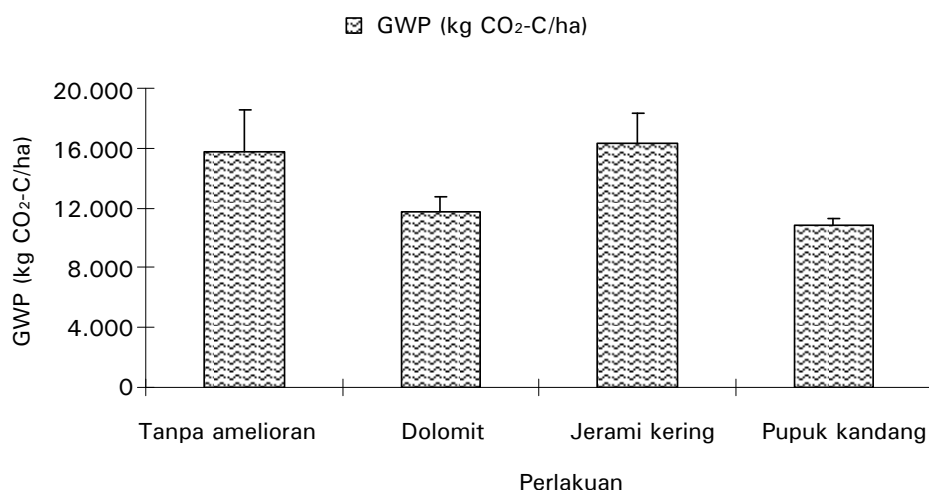
Tabel 2. Emisi CO₂, CH₄, dan N₂O dari empat perlakuan amelioran pada MK 2008*Table 2. Emission of CO₂, CH₄, and N₂O from four ameliorant at DS 2008*

Perlakuan	Emisi CO ₂	Emisi CH ₄	Emisi N ₂ O
	 kg ha ⁻¹ musim ⁻¹		
Tanpa amelioran	4.784a	838a	0,22a
Dolomit	5.202a	594b	0,24a
Jerami kering	5.948a	853a	0,13a
Pupuk kandang	5.076a	546b	0,16a

berkaitan dengan besarnya C organik dan nisbah C/N. Pupuk kandang yang mempunyai nisbah C/N rendah dan relatif mengemisi CH₄ lebih rendah. Pemberian pupuk kandang diperlukan untuk memperbaiki produksi padi dan juga menurunkan emisi CH₄ apabila diberikan dalam kondisi matang (setelah mengalami dekomposisi). Akan tetapi, Cai *et al.* (2001) menyatakan bahwa pemberian bahan organik dengan kandungan C/N rasio yang tinggi tidak meningkatkan emisi GRK. Hal ini tergantung pada tipe tanahnya yang terkait dengan sifat tanah seperti pH yang rendah, KTK yang rendah, kandungan Al tertukar yang tinggi defisiensi Ca, Mg. Pengaruh pemberian bahan organik pada waktu yang lama terhadap emisi GRK masih perlu dikaji lebih lanjut. Sedangkan dolomit (CaCO₃.MgCO₃) mengandung banyak unsur oksida. Nilai oksida yang tinggi dapat memperlambat proses reduksi, sehingga kondisi optimum untuk pembentukan CH₄ akan lama terbentuk. Menurut Patrick *et al.* (1977) bahwa proses pembentukan CH₄ adalah akibat dekomposisi bahan organik pada kondisi anaerob. Organisme yang berperan dalam proses dekomposisi ini khususnya bakteri methanogen, tidak dapat berfungsi dengan baik apabila terdapat oksidan (elektron akseptor). Sebelum oksidan-oksidan tanah tereduksi, metana tidak akan terbentuk. Emisi N₂O tertinggi dihasilkan oleh dolomit yaitu sebesar 0,24 kg ha⁻¹musim⁻¹ dan diikuti oleh tanpa amelioran, pupuk kandang dan jerami kering yaitu berturut-turut sebesar 0,22; 0,16; dan 0,13 kg ha⁻¹musim⁻¹. Pemberian jerami kering dan pupuk kandang mampu menekan emisi N₂O sebesar 43,05 dan 28,25%.

Potensi pemanasan global (GWP) tertinggi dihasilkan oleh perlakuan pemberian jerami yaitu sebesar 16.348 kg CO₂-C yang diikuti oleh tanpa amelioran, dolomit dan pupuk kandang yang berturut-turut sebesar 15.776; 11.682; dan 10.822 kg CO₂-C (Gambar 1). Pemberian pupuk kandang dan dolomit mampu menekan GWP di tanah gambut sebesar 25,9 dan 31,4% dibandingkan dengan tanpa amelioran. Penurunan GWP ini seiring dengan penurunan CH₄ karena kontribusi CH₄ dalam GWP adalah paling besar dibandingkan dengan CO₂ dan N₂O. Hasil gabah tertinggi adalah dengan urutan jerami kering, dolomit, tanpa amelioran dan pupuk kandang sebesar 4,98; 4,92; 4,69; dan 4,54 t ha⁻¹.

Gambar 2, memperlihatkan kandungan C-organik dengan GWP. Perhitungan kandungan karbon organik dilakukan pada tanaman padi (akar, jerami dan gabah) dan gulma (akar dan batang gulma). Semakin tinggi kandungan C-organik maka dapat diasumsikan semakin tinggi pula CO₂ yang mampu diserap oleh tanaman. Menurut Kurniatun (2007) bahwa CO₂ di udara dipergunakan oleh tanaman selama fotosintesis dan memasuki ekosistem melalui serasah tanaman yang jatuh dan akumulasi C dalam biomasa (tajuk) tanaman. Sebagian dari jumlah C yang diserap dari udara bebas tersebut diangkut ke bagian akar berupa karbohidrat. Rata-rata dari keempat perlakuan C-organik tertinggi terdapat pada gabah dan terendah terdapat pada akar. Kandungan C organik pada tanaman padi terendah terdapat pada perlakuan pemberian pupuk kandang, jerami kering, tanpa amelioran dan dolomit yaitu sebesar 5.850, 6.221,



Gambar 1. GWP dari empat perlakuan amelioran pada MK 2008

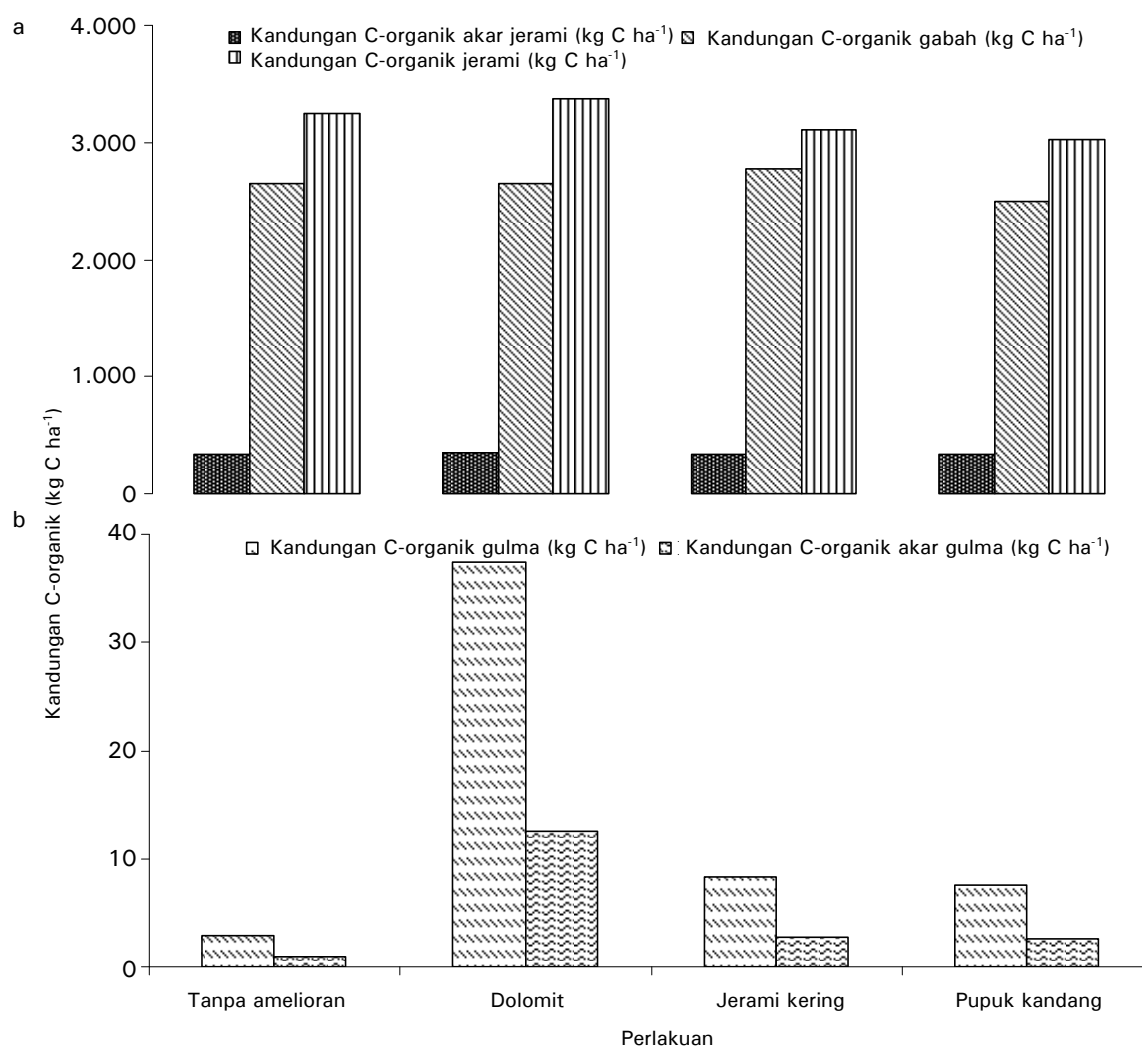
Figure 1. GWP from four ameliorant at DS 2008

6.237, dan 6.362 kg CO₂-C ha⁻¹. Kandungan C organik pada gulma terendah terdapat pada perlakuan pemberian tanpa amelioran, pupuk kandang, jerami kering dan dolomit yaitu sebesar 3,9; 10,1; 11,2; dan 49,9 kg CO₂-C ha⁻¹.

Berdasarkan Gambar 3, pemberian amelioran pupuk kandang mampu menghasilkan total kandungan C-organik sebesar 5.860,0 kg-C ha⁻¹, jerami kering 6.231,9 kg-C ha⁻¹, tanpa amelioran 6.240,9 kg-C ha⁻¹, dan dolomit 6.412,3 kg-C ha⁻¹. Sedangkan emisi GRK setara karbon dari karbondioksida (Emisi CO₂-C) yang dihasilkan dari pemberian amelioran pupuk kandang sebesar 10.821,96 kg CO₂-C ha⁻¹, dolomit 11.682,49 kg CO₂-C ha⁻¹, tanpa amelioran 15.775,62 kg CO₂-C ha⁻¹, dan jerami kering 16.347,53 kg CO₂-C ha⁻¹. Pemberian jerami menghasilkan emisi CO₂ paling tinggi dan lebih tinggi dari kontrol hal ini diduga karena proses dekomposisi jerami oleh mikroba akan merangsang terjadinya respirasi akar dan respirasi mikroba. Respirasi mikroba berkaitan erat dengan suhu tanah dan suhu tanah berhubungan

dengan fluks CO₂ (Javed Iqbal *et al.*, 2009). Neraca karbon diestimasi dari selisih jumlah karbon yang tersedia dengan yang hilang maka neraca karbon yang paling rendah dari suatu perlakuan merupakan salah satu proses mitigasi yang dapat dianjurkan. Net karbon/neraca karbon terendah pada percobaan ini adalah pada perlakuan pupuk kandang sebesar 4.962,0 kg-C ha⁻¹ disusul dolomit, tanpa amelioran, dan jerami kering secara berturut-turut 5.270,2; 9.534,7; dan 10.115,6 kg-C ha⁻¹.

Berdasarkan data tersebut maka dapat dihitung rasio antara net karbon (ton C ha⁻¹) dan hasil produksi padi (kg ha⁻¹). Perlakuan dolomit memiliki rasio tertinggi sebesar 933,58 kg gabah/ton CO₂-C. Artinya, setiap 933,58 kg gabah akan menghasilkan satu ton emisi GRK setara karbon. Rasio tertinggi kedua adalah pupuk kandang sebesar 913,30 kg gabah/ton CO₂-C, disusul tanpa amelioran dan jerami kering masing-masing sebesar 492,13 dan 491,59 kg gabah/ton CO₂-C. Semakin tinggi ratio antara net karbon (ton C ha⁻¹) dan hasil produksi semakin mempunyai peluang untuk meningkatkan hasil dan menekan emisi.



Gambar 2. Kandung C-organik tanaman padi (a), gulma (b) dan GWP dari empat perlakuan amelioran pada MK 2008

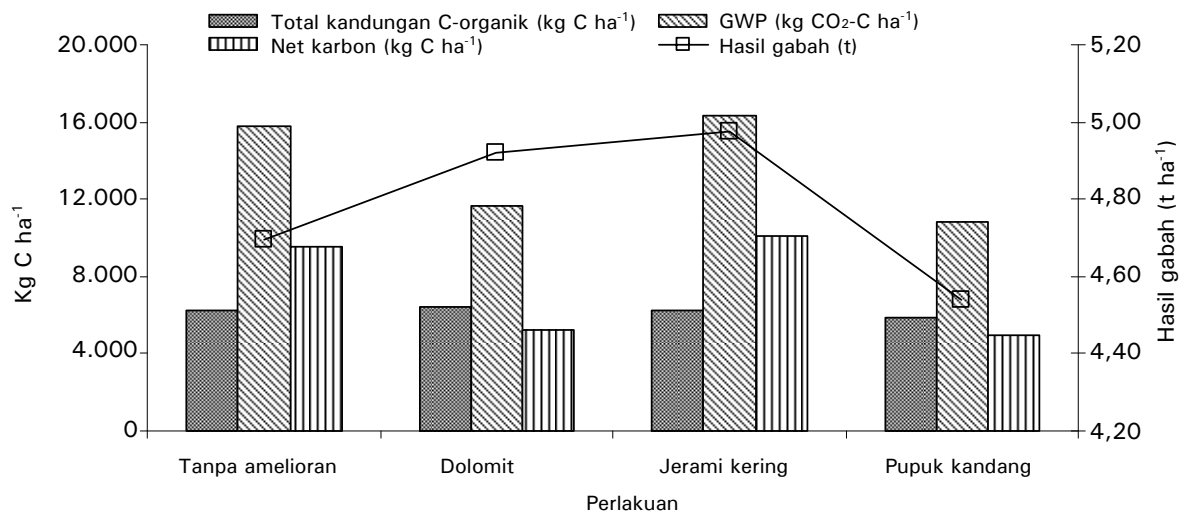
Figure 2. C-organic carbon in paddy rice (a), weed (b) and GWP from four ameliorant at DS 2008

KESIMPULAN

1. Emisi GRK (CO₂-C) terendah dihasilkan oleh perlakuan pemberian pupuk kandang dan dolomit
2. Penambahan dolomit memiliki daya absorpsi karbon yang paling tinggi dibandingkan tiga perlakuan lainnya.
3. Rasio net karbon dan hasil gabah tertinggi terdapat pada perlakuan dolomit dan pupuk kandang.

DAFTAR PUSTAKA

- Agus, F. dan I G.M. Subiksa. 2008.** Lahan Gambut: Potensi untuk Pertanian dan Aspek Lingkungan. Balai Penelitian Tanah dan World Agroforestry Centre (ICRAF) Bogor.
- Ali, M.A., J.H. Oh, and P.J. Kim. 2008.** Evaluation of Silicate Iron Slag Amendment on Reducing Methane Emission from Flood Water Rice Farming. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 128:21-26.



Gambar 3. Kandungan C-organik tanaman padi, GWP dan net karbon dari empat perlakuan amelioran pada MK 2008

Figure 3. C organic carbon at paddy rice, GWP and net carbon from four ameliorant at DS 2008

Cai Z.C., R.J. Laughlin, and R.J. Stevens. 2001. Nitrous oxide and dinitrogen emissions from soil under different water regimes and straw amendment. *Chemosphere* 42:113-121.

Denman, K.L., G. Brasseur, A. Chidthaisong, P. Ciais, P.M. Cox, R.E. Dickinson, D. Hauglustaine, C. Heinze, E. Holland, D. Jacob, U. Lohmann, S. Ramachandran, P.L. de Silva Dias, S.C. Wofsy, and X. Zhang. 2007. Coupling between changes in the climate system and biogeochemistry. Pp. 499-587. *In* S. Solomon (Ed.). *Climate Change 2007: The Physical Scientific Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York.

Driesen, P.M. 1978. Peat soil. Pp. 763-779. *In* Soil and Rice. IRRI, Los Banos, Philippines.

Gorham, E. 1991. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable response to climatic warming. *Ecological Applications* 1: 182-195.

Hornibrook, E.R.C., F.J. Longstaffe, and W.S. 1997. Spatial distribution of microbial methane production pathways in temperate zone wetland soils: Stable carbon and hydrogen isotope evidence. *Geochim. Cosmochim. Acta* 61:745-753.

Javed, I., R. Hu, S. Lin, R. Hatano, M. Feng, L. Lu, B. Ahamadou, and L. Du. 2009. CO₂

emission in a subtropical red paddy soil (Ultisol) as affected by straw and N-fertilizer applications: A case study in Southern China. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 131:292-302.

Kurniatun, H., S.R. Utami, B. Lusiana, dan M. van Noordwijk. 2007. Neraca hara dan karbon dalam sistem agroforestri. Universitas Brawijaya.

Patrick Jr., W.H. and C.N. Reddy. 1977. Chemical and Biological Redox Systems Affecting Nutrient Availability in The Coastal Wetlands. *Geosciences and Man* 28:131-137.

Smith, L.C., G.M. MacDonald, A.A. Velichko, D.W. Beilman, O.K. Borisova, K.E. Frey, K.V. Kremenetski, and Y. Sheng. 2004. Siberian peatlands a net carbon sink and global methane source since the early Holocene. *Science* 303:353-356.

Sorenson, K.M. 1993. Indonesian peat swamp forests and their role as a carbon sink. *Chemosphere* 27:1065-1082.

Wetlands International-Indonesia Programme. 2006. Peta-Peta Sebaran Lahan Gambut, Luas dan Kandungan Karbon di Papua.

Whiting, G.J. and J.P. Chanton, J.P. 1992. Plant-dependent CH₄ emission in a subarctic Canadian fen. *Global Biogeochem. Cycles* 6: 225-231.