HUBUNGAN FLUKS METANA DAN DINITROGEN OKSIDA DENGAN KARAKTERISTIK TANAH SAWAH TADAH HUJAN DI JAWA TENGAH

A. Wihardjaka^{1*}, S. D. Tandjung², B. H. Sunarminto³, E. Sugiharto⁴

(Diterima tanggal 15-11-2011; Disetujui tanggal 14-03-2012)

ABSTRAK

Kondisi basah – kering tanah sawah tadah hujan yang silih berganti mempengaruhi dinamika gas rumah kaca metana dan dinitrogen oksida dalam tanah. Besarnya produksi CH_4 dan N_2O terkait dengan sifat fisik, kimia, dan biologi tanah sawah tadah hujan. Penelitian dilaksanakan di laboratorium untuk mengetahui hubungan antara fluk metana dan dinitrogen oksida dan karakteristik tanah sawah tadah hujan Inceptisol. Contoh tanah diinkubasi selama satu bulan dan dianalisis produksi CH_4 dan N_2O , dan karakteristik fisik, kimia, dan biologi tanah. Laju produksi metana dari tanah sawah tadah hujan Inceptisol berkorelasi positif secara nyata dengan kandungan C organik dan berkorelasi negatif dengan ketersediaan sulfat dan mangan dalam tanah. Produksi dinitrogen oksida dari tanah sawah tadah hujan Inceptisol berkorelasi positif secara nyata dengan kandungan nitrat dan berkorelasi negatif dengan ketersediaan mangan (Mn) dalam tanah dan kandungan lempung.

Kata kunci: metana, dinitrogen oksida, tanah sawah Inceptisol, tadah hujan

ABSTRACT

In rainfed lowland ecosystem, the soil is not submerged continuously but is subjected to wetting and drying cycles. Alternating periods of soil oxidation and reduction resulting from the changing hydrological conditions lead to affect greenhouse gases dynamics of methane and nitrous oxide. The magnitude of CH_4 and N_2O productions relates to physical, chemical, biological properties of rainfed rice soils. The laboratory experiment was carried out to determine relationship between fluxes of CH_4 and N_2O and soil characteristics of Inceptisols. Soil samples were incubated during a month and analyzed CH_4 and N_2O production and soil properties. The methane production rate correlated positively and significantly with organic C content, however, it correlated negatively with sulphate and manganese availability in rainfed rice soils of Inceptisols. The nitrous oxide production correlated positively and significantly with soil nitrate, however, it correlated negatively with manganese (Mn) availability and clay content in soil under rainfed rice ecosystems.

Key words: methane, nitrous oxide, Inceptisols, rainfed rice field

PENDAHULUAN

Hingga kini beras masih merupakan salah satu komoditas utama dan strategis di Indonesia dalam memenuhi kecukupan pangan nasional. Beras juga merupakan sumber ekonomi bagi lebih dari 30 juta petani. Peningkatan produksi beras nasional dituntut sebesar 0,8 – 1% setiap tahun sebagai antisipasi dalam mengimbangi laju pertumbuhan jumlah penduduk 1,5% setiap tahun. Pemenuhan kebutuhan beras nasional masih ditopang sawah beririgasi yang luasnya setiap tahun mengalami penciptaan akibat alih

fungsi lahan. Optimalisasi pemanfaatan sawah tadah hujan memiliki prospek dan potensi besar sebagai areal produksi padi dalam menunjang ketahanan pangan.

Tanah sawah adalah produser nyata gas metana (CH_4) dan dinitrogen oksida (N_2O). Potensi efek rumah kaca dari CH_4 dan N_2O masing-masing sebesar 27% dan 16% (Ko & Kang, 2000; Johnson *et al.*, 2007). Gas CH_4 dihasilkan dari proses dekomposisi bahan organik secara anaerobik dengan melibatkan

¹⁾ Balai Penelitian Lingkungan Pertanian, Jakenan, Pati Jawa Tengah

²⁾ Fakultas Biologi Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

³⁾ Fakultas Pertanian Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

⁴⁾ Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

bakteri metanogen, sedangkan gas N_2O adalah hasil proses nitrifikasi dan denitrifikasi dalam tanah sawah (Jain *et al.*, 2000). Produksi CH_4 dan N_2O dalam tanah sawah dipengaruhi oleh tipe tanah, penggunaan lahan, kondisi ketersediaan air tanah, praktek budidaya tanaman pertanian (Wassmann & Dobermann, 2006; Johnson *et al.*, 2007).

Kondisi basah – kering silih berganti tanah sawah tadah hujan akibat curah hujan tidak menentu berpengaruh terhadap karakteristik tanah dan dinamika gas rumah kaca terutama metana dan dinitrogen oksida. Dinamika CH_4 dan N_2O dalam tanah sawah tadah hujan tergantung pada sifat fisik, kimia, biologi tanah, dan ketersediaan air tanah (Johnson *et al.*, 2007). Oleh karena itu, penelitian laboratorium diperlukan untuk mengetahui hubungan fluk metana dan dinitrogen oksida dengan karakteristik tanah sawah tadah hujan.

BAHAN DAN METODE

Kegiatan penelitian dilaksanakan di Laboratorium Emisi dan Absorpsi Gas Rumah Kaca, Balai Penelitian Lingkungan Pertanian

di Pati Jawa Tengah. Penelitian dilaksanakan menggunakan metode inkubasi dan contoh tanah Inceptisol diambil pada ekosistem sawah tadah hujan. Lokasi penelitian terletak pada koordinat $111^{\circ}10'$ BT dan $6^{\circ}45'$ LS, 17 km dari Pantai Utara Jawa Tengah (kecamatan Juana) dengan ketinggian 15 m di atas permukaan laut.

Contoh tanah diambil pada kedalaman 0 – 20 cm (lapisan olah) pada posisi lereng bagian atas dan bagian bawah dalam suatu kemiringan tertentu atau toposekuen (3 lokasi berlereng), yang diilustrasikan pada Gambar 1. Setiap posisi diambil dari beberapa titik secara acak pada suatu hamparan persawahan $\pm$ satu hektar dan dikompositkan. Contoh tanah komposit sebanyak 6 kg contoh diambil dari enam lokasi dari tiga lokasi berlereng di sekitar percobaan lapangan, yaitu toposekuen pertama dengan kemiringan 4,3% (Tegalarum atas, Tegalarum bawah), toposekuen kedua dengan kemiringan 3,5% (Mojoluhur atas, Mojoluhur bawah), dan toposekuen ketiga dengan kemiringan 4,8% (Trikooyo atas, Sidomukti bawah). Contoh tanah dikeringanginkan dan diayak dengan ayakan berdiameter 2 mm.

Gambar 1. Posisi pengambilan contoh tanah pada tanah sawah tadah hujan berlereng (toposekuen)

Metode Pengukuran Produksi CH₄ dan N₂O

Contoh tanah dianalisis menggunakan metode inkubasi untuk menetapkan potensi produksi gas metana dan dinitrogen oksida. Contoh tanah seberat 60 gram ditempatkan di gelas piala 300 ml, lalu ditambahkan 120 ml air destilasi. Labu piala ditutup dengan penutup karet. Pada penutup karet dilengkapi dengan saluran untuk pemasukan gas N₂. Masing-masing labu piala diinkubasi dalam inkubator atau dalam ruang gelap selama 1 bulan.

Contoh gas diambil menggunakan injektor volume 10 ml dari septum bagian atas gelas inkubasi sebelum dan sesudah inkubasi pengambilan gas dilakukan setiap interval waktu satu minggu selama satu bulan inkubasi. Contoh gas dianalisis menggunakan alat kromatografi gas yang dilengkapi dengan *flame ionization detector (FID)* untuk menetapkan fluk metana, atau *electron capture detector (ECD)* untuk menetapkan fluk N₂O dengan metode yang digunakan *International Rice Research Institute* (Cortons *et al.*, 2000). Laju produksi gas metana atau dinitrogen oksida dihitung menggunakan rumus sebagai berikut :

$$C_i = (C_t - C_0) \cdot \frac{V_{hs}}{B} \cdot \frac{W_m}{V_m} \cdot \frac{273,2}{273,2 + T} \quad \dots\dots\dots (1)$$

- C_i : potensi produksi CH₄ atau N₂O (µg/g tanah)
 C_t : kadar gas saat waktu t tertentu (µl/L)
 C_0 : kadar gas saat waktu awal (µl/L)
 V_{hs} : volume *headspace* (ml)
 B : berat tanah (g)
 W_m : berat molekul CH₄ atau N₂O (10³ mg)
 V_m : volume molekul CH₄ atau N₂O kondisi standar (22,41.10⁻³ ml)
 T : suhu rata-rata dalam labu ukur saat pengukuran (°C)

Tabel 1. Metode analisis tanah yang digunakan dalam percobaan inkubasi di Laboratorium

Analisis	Metode
Fisika Tanah Tekstur	Pipet
Kimia Tanah pH-H ₂ O dan pH-KCl Daya hantar listrik (DHL) N total C organik Nisbah C/N P tersedia P potensial KPK Kation-kation dapat ditukar (Ca, Mg, K, Na) SO ₄ tersedia Fe tersedia Mn tersedia	Elektroda (1:1) Konduktimetri Kjeldahl Walkley & Black - Bray 1 HCl 25% Penjenuhan NH ₄ OAc pH 7 Penjenuhan NH ₄ OAc pH 7 Spektrofotometer AAS AAS
Biologi Tanah Bakteri total Denitrifier Respirasi tanah	<i>Plate dilution</i> <i>Most Probable Number</i> Jar

Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan pada percobaan inkubasi di laboratorium meliputi laju produksi CH_4 dan N_2O , tekstur tanah, pH, daya hantar listrik, N total, C organik, Nisbah C/N, Nisbah C/P, Nisbah C/K, P tersedia, K tersedia, kapasitas tukar kation (KPK), kation-kation dapat ditukar (Ca, Mg, K, Na), SO_4 tersedia, Fe tersedia, Mn tersedia, respirasi tanah, bakteri total, populasi *Denitrifier* (Tabel 1).

Analisis Data

Data terkumpul dianalisis menggunakan analisis regresi linier sederhana atau regresi berganda dan uji korelasi untuk mengetahui hubungan antara produksi gas metana atau dinitrogen oksida dengan sifat-sifat tanah tertentu. Analisis sidik ragam digunakan untuk menguji pengaruh peubah bebas terhadap

peubah tidak bebas. Keeratan hubungan antara produksi gas rumah kaca metana atau dinitrogen oksida dengan parameter fisika-kimia tanah ditunjukkan oleh nilai r (koefisien korelasi).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Produksi Metana dan Dinitrogen Oksida Pada Tanah Sawah Tadah Hujan

Potensi produksi metana dari tanah sawah tadah hujan pada bagian lereng atas adalah lebih tinggi daripada pada bagian lereng bagian bawah. Produksi metana dari tanah sawah Inceptisol yang diinkubasi selama 26 hari adalah $0,090 \text{ mg CH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ tanah}$ (tanah lereng bagian atas) dan $0,063 \text{ ug CH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ tanah}$ (Gambar 2). Laju produksi CH_4 pada tanah lereng bagian atas sama dengan pada tanah lereng bagian bawah saat tanah diinkubasi selama 6 hari.

Gambar 2. Laju produksi gas metana dan dinitrogen oksida dari tanah sawah tadah hujan berbeda posisi dalam suatu toposekuen

Potensi produksi dinitrogen oksida dari tanah sawah tadah hujan bagian atas adalah lebih tinggi daripada dari tanah sawah bagian bawah dalam suatu toposekuen (Gambar 2). Produksi N_2O dari tanah lereng bagian atas sama dengan dari tanah lereng bagian bawah setelah tanah diinkubasi selama 26 hari. Produksi N_2O dari tanah sawah Inceptisol setelah diinkubasi 26 hari adalah $10,1 \text{ ug } N_2O \text{ g}^{-1} \text{ tanah}$.

Hubungan potensi produksi GRK dengan parameter tanah

(1) Parameter Fisika-Kimia Tanah

Pada Tabel 2 terlihat bahwa produksi metana dari tanah sawah tadah hujan Inceptisol dipengaruhi secara nyata oleh kandungan C organik, nisbah C/P, nisbah C/S, sulfat tersedia, Mn tersedia, dan Na dapat ditukar. Produksi metana nyata berkorelasi positif

Tabel 2. Korelasi produksi metana dan dinitrogen oksida dalam tanah sawah dengan parameter fisika-kimia tanah

Peubah fisikokimia tanah	Nilai korelasi (r)	
	Metana	Dinitrogen oksida
% pasir	0,633 ^{tn}	0,657 ^{tn}
% debu	-0,093 ^{tn}	0,254 ^{tn}
% lempung	-0,494 ^{tn}	-0,868*
pH	0,073 ^{tn}	-0,739*
Daya hantar listrik	-0,297 ^{tn}	-0,332 ^{tn}
C organik	0,737*	0,079 ^{tn}
N total	-0,255 ^{tn}	0,286 ^{tn}
N- NO_3	0,621 ^{tn}	0,994***
N- NH_4	0,424 ^{tn}	0,271 ^{tn}
S total	-0,177 ^{tn}	-0,626 ^{tn}
SO_4 tersedia	-0,969**	-0,575 ^{tn}
P total	-0,436 ^{tn}	-0,162 ^{tn}
P terekstrak HCl25%	-0,292 ^{tn}	-0,168 ^{tn}
P terekstrak Bray 1	-0,141 ^{tn}	0,553 ^{tn}
Nisbah C/N	0,225 ^{tn}	-0,493 ^{tn}
Nisbah C/S	0,838*	0,539 ^{tn}
Nisbah C/P	0,847*	0,389 ^{tn}
Fe tersedia	-0,006 ^{tn}	0,408 ^{tn}
Mn tersedia	-0,842*	-0,780*
Kapasitas tukar kation (KTK)	-0,434 ^{tn}	-0,529 ^{tn}
Kation dapat ditukar		
K-dd	-0,378 ^{tn}	-0,342 ^{tn}
Na-dd	-0,819*	-0,151 ^{tn}
Ca-dd	-0,168 ^{tn}	-0,646 ^{tn}
Mg-dd	-0,578 ^{tn}	-0,507 ^{tn}

* = nyata pada taraf 5%, ** = nyata pada taraf 1%, *** = nyata pada taraf 0,1%, tn = tidak nyata

* = nyata pada taraf 5%, ** = nyata pada taraf 1%, *** = nyata pada taraf 0,1%, tn = tidak nyata

dengan kandungan C organik dalam tanah, nisbah C/P, dan nisbah C/S, dan nyata berkorelasi negatif dengan ketersediaan sulfat, Mn, Na_{dd} dalam tanah sawah.

Kandungan C organik dalam tanah terutama C siap termineralisasi adalah faktor utama yang mempengaruhi produksi dan emisi CH₄ dari tanah tergenang. Karbon siap termineralisasi merupakan jumlah C-CO₂ dan C-CH₄ yang dihasilkan dari tanah segar yang diinkubasi selama 28 hari (Minami, 1995) yang menentukan besarnya potensi produksi metana dalam tanah. Menurut Wang *et al. cit* Neue & Sass (1994), kandungan C organik total berkorelasi dengan produksi CH₄ bilamana faktor pembatas lainnya dimitigasi.

Makin tinggi nisbah C/P dan C/S meningkatkan produksi metana. Nisbah C/N, C/P, C/K, C/S di dalam tanah menunjukkan seberapa jauh bahan organik dimanfaatkan oleh mikroba tanah yang tergantung pada kandungan oksigen dan biomassa mikroba saat proses dekomposisi berlangsung. Dekomposisi bahan organik secara anaerobik akan dihasilkan hidrokarbon, alkohol, karbonil, asam lemak, asam fenolik, senyawa S volatil, dan senyawa yang mengandung fosfor. Tahap akhir transfer elektron dari degradasi anaerobik bahan organik menentukan laju dan pola pembentukan metana (Neue & Roger, 1993), seperti peningkatan senyawa S volatil dan senyawa yang mengandung P akan mempengaruhi besarnya metana yang dihasilkan dalam tanah tergenang.

Hubungan potensi produksi metana dengan ketersediaan SO₄, Mn, Na dapat ditukar ditunjukkan dengan persamaan berikut :

Peningkatan ketersediaan SO₄, Mn, dan Na dapat ditukar dalam tanah sawah menghambat pembentukan CH₄. Menurut Neue & Sass (1994), oksidan tanah tergenang yang berupa NO₃⁻, Mn⁴⁺, Fe³⁺, SO₄²⁻ dapat menurunkan aktivitas metanogen. Tahapan termodinamika pada sistem oksidasi-reduksi dari tanah sawah mempengaruhi ketersediaan SO₄²⁻, Mn⁴⁺, Na⁺ dapat ditukar, dan pembentukan CH₄. Metana terbentuk bila potensial redoks lebih rendah daripada -150 mV (Wang *et al. cit* Neue & Sass, 1994). Peningkatan kandungan sulfat dan Mn akan dimanfaatkan secara lebih efisien oleh bakteri produksi sulfat dan Mn. Pada lingkungan tanah anaerobik, bakteri metanogen, bakteri pereduksi sulfat, bakteri pereduksi Mn, dan bakteri kemoacetogenik bersaing memanfaatkan H₂ dan substrat asetat hasil fermentasi (Minamikawa *et al.*, 2005). Bakteri pereduksi sulfat dapat bersaing melebihi bakteri metanogen dengan ketersediaan sulfat dalam tanah karena bakteri pereduksi sulfat mempunyai afinitas lebih tinggi terhadap H₂, sehingga dapat menekan produksi metana (Abram & Nedwell *cit* Neue & Roger, 1993). Peningkatan Na_{dd} dalam tanah dapat menghambat aktivitas bakteri metanogen dalam menghasilkan metana. Hasil penelitian Patel & Roth *cit* Neue (1993) menunjukkan bahwa peningkatan kadar NaCl mendekati 0,18 molar yang diberikan ke dalam tanah nyata menghambat metanogenesis.

Di antara parameter fisika-kimia tanah, hanya kandungan lempung, pH, nitrat, dan Mn tersedia yang mempengaruhi secara nyata produksi N₂O di tanah sawah tadah hujan yang berlereng (Tabel 3). Produksi N₂O berkorelasi

$$\text{CH}_4 = 0,0293 - 0,000005 \text{ SO}_4\text{tersedia} - 0,000052 \text{ Mntersedia} - 0,00179 \text{ Na}_{\text{dd}} \quad (R^2 = 0,981; p < 0,05) \quad (2)$$

positif secara nyata dengan kandungan NO_3^- , tetapi berkorelasi negatif secara nyata dengan kandungan lempung dan Mn tersedia dalam tanah. Hubungan produksi N_2O dengan kandungan nitrat dan Mn tersedia ditunjukkan oleh persamaan berikut :

$$\text{N}_2\text{O} = -3,25 + 0,365 \text{NO}_3^- + 0,00148 \text{Mn tersedia} \quad (R^2 = 0,991; p < 0,01) \dots\dots\dots (3)$$

Peningkatan Mn tersedia dalam tanah menghambat produksi N_2O diduga bahan kimia seperti Mn bersifat toksik bagi bakteri nitrifikasi dan denitrifikasi (Granli & Bockman, 1994). Tingginya kandungan lempung justru menurunkan produksi N_2O , diduga tingginya lempung berpengaruh terhadap distribusi ukuran pori yang menghambat ebulisi dan difusi N_2O ke atmosfer karena sebagian N_2O yang terperangkap direduksi menjadi N_2 sebelum dapat lepas ke atmosfer (Neue & Sass, 1994; Verchot *et al.*, 2008).

Produksi N_2O berkorelasi positif dengan tingkat NO_3^- dalam tanah. Akumulasi NO_3^- dalam lapisan reduktif tanah sawah menguntungkan bakteri denitrifikasi karena ketersediaan substrat dalam proses reduksi nitrat menjadi N_2O dan N_2 . Peningkatan ketersediaan N terutama nitrat umumnya memacu peningkatan produksi dan emisi N_2O karena stimulasinya terhadap proses mikrobiologis denitrifikasi yang menghasilkan fluk N_2O dan N_2 (Verchot *et al.*, 2008).

Hubungan positif antara produksi metana dan dinitrogen oksida dan beberapa parameter tanah berimplikasi terhadap pengelolaan tanah sawah tadah hujan dalam budidaya tanaman pangan terutama padi sawah. Pemberian bahan organik dengan nisbah C/N

rendah seperti kompos dan pemberian pupuk N ke dalam lapisan reduktif tanah atau dalam bentuk pupuk amonium sulfat (ZA) dalam memperbaiki produktivitas tanah sawah tadah hujan memberika emisi gas rumah kaca relatif rendah (Wihardjaka, 2005).

(2) Parameter Biologi Tanah

Tabel 4 terlihat bahwa potensi produksi metana dipengaruhi secara nyata oleh populasi bakteri total dalam tanah dan respirasi tanah ($p < 0,05$). Peningkatan populasi bakteri dalam tanah sawah berkorelasi nyata dengan respirasi tanah ($r = 0,95$). Respirasi tanah merupakan suatu indikator yang baik untuk alokasi karbon, dan bakteri metanogen membutuhkan substrat seperti asetat, CO_2 pada kondisi anaerobik untuk menghasilkan metana (Verchot *et al.*, 2008).

Produksi N_2O dalam tanah berkorelasi positif secara nyata dengan populasi *Nitrosomonas* ($p < 0,01$) dan populasi bakteri denitrifikasi ($p < 0,05$) seperti terlihat pada Tabel 4. Beberapa faktor mempengaruhi produksi dan emisi N_2O dalam tanah, antara lain : kadar oksigen dalam tanah, tekstur tanah, jumlah NH_4^+ tersedia bagi bakteri nitrifikasi, dan jumlah NO_3^- tersedia bagi bakteri denitrifikasi (Snyder *et al.*, 2009). Gas N_2O adalah hasil antara dari proses transformasi NO_2^- pada kondisi O_2 terbatas ketika bakteri nitrifikasi menggunakan NO_2^- sebagai akseptor elektron terminal. Bakteri *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter* merupakan bakteri kemoautotrof yang memperoleh energi dengan mengoksidasi NH_4^+ menjadi NO_2^- (66 Kkal) dan oksidasi NO_2^- menjadi

Tabel 4. Korelasi produksi metana dan dinitrogen oksida dalam tanah sawah dengan parameter biologi tanah

Peubah biologi tanah	Nilai korelasi (r)	
	Metana	Dinitrogen oksida
Bakteri total	0,840*	0,353 ^{tn}
Mikroba pelarut fosfat	0,439 ^{tn}	0,118 ^{tn}
Bakteri <i>Nitrosomonas</i>	0,800*	0,947**
Bakteri denitrifikasi	0,665 ^{tn}	0,890*
Respirasi tanah	0,849*	0,167 ^{tn}

Keterangan : * = nyata pada taraf 5%, ** = nyata pada taraf 1%, tn = tidak nyata

NO_3^- (18 Kkal). Di dalam tanah selain kedua bakteri tersebut dijumpai pula bakteri lain yang berperan dalam nitrifikasi yaitu bakteri autotrof obligat murni seperti *Nitrosococcus*, *Nitrosospira*, *Nitrosocystis*, *Nitrosogloea*, dan *Nitrocystis*. Pertumbuhan bakteri nitrifikasi dalam tanah tergantung pada ketersediaan NH_4^+ dan NO_2^- , aerasi, kelembaban, suhu, pH dan bahan organik (Rao, 1994).

Bakteri denitrifikasi nyata berpengaruh terhadap pelepasan N_2O ke atmosfer. Peningkatan populasi bakteri denitrifikasi memberi peluang tinggi terhadap reduksi nitrat dan nitrit menjadi N_2O dan N_2 . Bakteri denitrifikasi menggunakan O_2 di atmosfer sebagai akseptor hidrogen pada kondisi tanah aerob tetapi juga mempunyai kemampuan menggunakan NO_3^- dan NO_2^- sebagai pengganti O_2 pada kondisi tanah anaerob. Beberapa genus bakteri denitrifikasi banyak dijumpai dalam tanah adalah *Pseudomonas*, *Achromobacter*, dan *Bacillus* (Rao, 1994).

KESIMPULAN

- Peningkatan potensi produksi metana dari tanah sawah tadah hujan Inceptisol dipengaruhi secara nyata oleh tingginya kandungan C organik dalam tanah dan rendahnya ketersediaan sulfat dan mangan dalam tanah.

- Peningkatan potensi produksi dinitrogen oksida dari tanah sawah tadah hujan Inceptisol dipengaruhi secara nyata oleh tingginya kandungan nitrat dalam tanah dan rendahnya ketersediaan mangan dalam tanah dan kandungan lempung.
- Pelepasan metana dan dinitrogen oksida dalam tanah ke atmosfer ditentukan oleh karakteristik fisik, kimia dan hayati tanah sawah tadah hujan, seperti kandungan bahan organik, ketersediaan hara esensial tanaman, dan aktivitas mikroba dalam tanah.

DAFTAR PUSTAKA

- (1) Cortons, T.M., J.B. Bajita, F.S. Grospe, R.R. Pamplona, C.A. Aziz Jr., R. Wassmann, R. S. Lantin, & L.V. Buendia. 2000. Methane Emission from Irrigated and Intensively Managed Rice Fields in Central Luzon, Philippines. *Nutrient Cycle in Agroecosystems*. 58 : 37-53.
- (2) Granli, T., & O.C. Bockman. 1994. Nitrous Oxide from Agriculture. *Norwegian J. Agric. Sci. Suppl.* No. 12. p. 1-159.

- (3) Jain, M.C., S. Kumar, R. Wassmann, S. Mitra, S.D. Singh, J. P. Singh, R. Singh, A.K. Yadav, & S. Gupta. 2000. Methane Emissions from Irrigated Rice Fields in Northern India, NewDelhi. *Nutrient Cycle in Agroecosystems* 58 : 75-83.
- (4) Johnson, J.M.F., A.J. Franzluebbers, S.L. Weyers, & D.C. Reicosky. 2007. Agricultural opportunity to mitigate green house gas emissions. *Environmental Pollution* 150 : 107-124.
- (5) Ko, J.Y., & H.W. Kang. 2000. The Effect of Cultural Practices on Methane Emission from Rice Fields. *Nutrient Cycle in Agroecosystem* 58 : 311-314.
- (6) Minami, K. 1995. The Effect of Nitrogen Fertilizer Use and Other Practices on Methane Emission from Flooded Rice. *Fertilizer Research* 40 : 71-84.
- (7) Neue, H.U. 1993. Methane Emission from Rice Field : Wetland Rice Fields May Make A Major Contribution to Global Warming. *BioScience* 43(7) : 466-473.
- (8) Neue, H.U., & P.A. Roger. 1993. Rice Agriculture: Factors Controlling Emission. In : Khalil, M.A.K., and M. Shearer (Eds.). *Global Atmospheric Methane*. NATO ASI/ARW Series.
- (9) Neue, H.U., & R.L. Sass. 1994. Trace Gas Emission from Rice Fields. *Environ. Sci. Res.* 48 : 119 – 147.
- (10) Rao, N.S.S. 1994. *Mikroorganisme Tanah dan Pertumbuhan Tanaman*. Terjemahan Herawati Susilo dan Subiyanto. UI-Press, Indonesia. 353p.
- (11) Snyder, C.S., T.W. Bruulsema, T.L. Jensen, & P.E. Fixen. 2009. Review of Greenhouse Gas Emissions from Crop Production Systems and Fertilizer Management Effects. *Agric. Ecosyst. Environ.* 133 : 247-266.
- (12) Verchot, L.V., S.B. Junior, V.C. de Oliveira, J.K. Mutegi, J.H. Cattanio, & E.A. Davidson. 2008. Fluxes of CH₄, CO₂, NO, and N₂O in An Improved Fallow Agroforestry System in Eastern Amazonia. *Agric. Ecosyst. Environ.* 126 : 113-121.
- (13) Wassmann, R., & A. Dobermann. 2006. Greenhouse gas emission for rice fields : What do we know and where should we head for? The 2nd Joint International Conference on Sustainable Energy and Environment (SEE 2006). Bangkok, Thailand, 21-23 May 2006. 5p.
- (14) Wihardjaka, A. 2005. Fluks metana pada beberapa komponen teknologi sawah tadah hujan di Kabupaten Pati. Prosiding Seminar Nasional Inovasi Teknologi Pengelolaan Sumberdaya Lahan Rawa dan Pengendalian Pencemaran Lingkungan, Banjarbaru Kalimantan Selatan, 5-7 Oktober 2004. p. 425-441.