

MITIGASI EMISI GAS METANA MELALUI PENGELOLAAN LAHAN SAWAH

Mitigation of Methane Emission Through Lowland Management

A. Wihardjaka

Balai Penelitian Lingkungan Pertanian
Jalan Raya Jakenan-Jaken km 5 Kotak Pos 5 Jaken Pati 59182, Indonesia
Telp. (0295) 385215, Faks. (0295) 381592, 883927
E-mail: awihardjaka@yahoo.co.id, balingtan@litbang.pertanian.go.id

Diterima: 25 Maret 2015; Direvisi: 26 Juni 2015; Disetujui: 9 Juli 2015

ABSTRAK

Metana (CH₄) merupakan salah satu gas rumah kaca dengan indeks potensi pemanasan global 21 kali molekul karbon dioksida (CO₂). Salah satu sumber emisi metana di sektor pertanian adalah lahan sawah. Lahan sawah Indonesia yang luasnya sekitar 8,08 juta ha diduga memberi kontribusi sekitar 1% dari total global metana. Emisi metana dari lahan sawah ditentukan oleh beberapa faktor, antara lain tipe tanah, pengelolaan air irigasi, suhu tanah, varietas tanaman, pemupukan, dan musim tanam. Strategi penurunan emisi metana dari lahan sawah dilakukan melalui pengelolaan lahan dengan mengintegrasikan beberapa komponen teknologi, meliputi penggunaan varietas unggul rendah emisi, pemberian pupuk organik matang (pupuk kandang dan kompos), pemupukan nitrogen yang mengandung sulfur (ZA) atau pupuk lambat urai, sistem irigasi berselang/terputus, dan sistem tanpa olah tanah atau olah tanah konservasi. Varietas padi dengan emisi metana rendah adalah Ciherang, Cisantana, Tukad Balian, Memberamo, Inpari 1, Dodokan, Way Apoburu, dan IR64, sedangkan varietas dengan emisi metana tinggi antara lain Cisadane, IR72, dan Ciliwung. Cara mitigasi yang dipilih hendaknya tidak mengorbankan aspek produksi beras dan diupayakan bersifat spesifik lokasi. Selain itu, prioritas upaya mitigasi perlu diarahkan pada ekosistem sawah yang memiliki potensi emisi metana tinggi, yaitu lahan sawah beririgasi. Strategi penurunan emisi metana dari lahan sawah dilakukan dengan mengombinasikan komponen teknologi rendah emisi dalam budi daya tanaman padi tanpa menurunkan hasil gabah.

Kata kunci: Emisi metana, lahan sawah, varietas, bahan organik, rejim air

ABSTRACT

Methane (CH₄) is one of atmospheric greenhouse gases with global warming potential of 21 times carbon dioxide (CO₂) molecule. Lowland is one of methane emission sources in an agricultural sector. Indonesia's lowland area of 8.08 millions ha contributes 1% of total global methane. The magnitude of methane emission from rice field depends on several factors, i.e. soil type, irrigation water management, soil temperature, plant variety, fertilizer application, and cropping season. Strategy to reduce methane emission from lowland could be done by integrating several technologies, including high yielding variety with low emission, application of

mature composted organic matter (farmyard manure, compost), slow release N fertilizer or sulphuric N fertilizer, intermittent irrigation, and zero tillage practices or soil conservation tillage. Rice varieties releasing low methane are Ciherang, Cisantana, Tukad Balian, Memberamo, Inpari 1, Dodokan, Way Apoburu, and IR64, while rice varieties releasing high methane are Cisadane, IR72, and Ciliwung. Selected mitigation options should not reduce rice grain yield and should be resilient with a specific location. Priority of mitigation efforts should be directed to irrigated lowland having a high methane emission. Strategy to reduce methane emission from lowland could be done by combining low emission technologies in rice culture without declining grain yield.

Keywords: Methane emission, lowland, variety, organic matter, water regime

PENDAHULUAN

Lahan sawah hingga kini masih memegang peranan utama dalam memenuhi kebutuhan pangan nasional dari sektor pertanian. Di sisi lain, lahan sawah dipandang sebagai salah satu sumber emisi gas rumah kaca (GRK) sekaligus berperan sebagai resor (*sink*). Sektor pertanian memberikan kontribusi 5% dari total emisi GRK nasional dan 46,2% berasal dari lahan sawah (Environmental Ministry 2010). Lahan sawah Indonesia yang luasnya sekitar 8,08 juta ha diduga memberi kontribusi sekitar 1% terhadap total metana global (Neue dan Sass 1994; Environmental Ministry 2010).

Gas rumah kaca (GRK) utama meliputi CO₂, metana (CH₄), dinitrogen oksida (N₂O), ozon (O₃), klorofluorokarbon (CFC), hidroklorofluorokarbon (HCFC), hidrofluorokarbon (HFC), perfluorokarbon (PFC), dan sulfur heksafluorida (SF₆). Sektor pertanian dipandang sebagai sumber sekaligus resor (*sink*) tiga GRK utama, yaitu CO₂, CH₄, dan N₂O (Setyanto 2004). Waktu paruh CO₂, CH₄, dan N₂O di atmosfer masing-masing adalah 50–200 tahun, 12 tahun, dan 120–150 tahun, sedangkan keberadaan gas PFC dan SF₆ mempunyai waktu paruh relatif lebih panjang, yaitu masing-masing 3.200–55.000 tahun dan 3.200 tahun (Pierzynski *et al.* 2000).

Peningkatan konsentrasi GRK antropogenik di atmosfer menstimulasi fenomena pemanasan global yang menyebabkan terganggunya keseimbangan energi antara bumi dan atmosfer. Konsentrasi GRK di atmosfer pada dekade terakhir telah melebihi 350 ppm CO₂ (PEACE 2007). Peningkatan konsentrasi GRK menyebabkan pemanasan global yang diperkirakan meningkatkan frekuensi dan intensitas kejadian iklim ekstrem. Menurut Boer (2003), sebagai negara kepulauan yang beriklim tropis, Indonesia berada pada posisi yang rentan terhadap perubahan iklim. Berbagai dampak perubahan iklim tersebut antara lain adalah kenaikan suhu dan perubahan musim, naiknya permukaan air laut, punahnya beberapa spesies flora dan fauna yang terdapat di hutan, terancamnya ketahanan pangan, dan meningkatnya frekuensi penyakit tropis seperti malaria dan demam berdarah (PEACE 2007).

Berbagai negara di seluruh dunia telah sepakat untuk memitigasi penyebab pemanasan global antara lain melalui Protokol Kyoto dan pertemuan-pertemuan dalam CoP/MoP. Indonesia juga telah berkomitmen untuk menurunkan emisi GRK sebesar 26% secara mandiri atau 41% dengan bantuan luar negeri, yang telah diperkuat dengan Peraturan Presiden No 61 Tahun 2011 tentang Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi GRK dan Peraturan Presiden No. 71 Tahun 2011 tentang Penyelenggaraan Inventarisasi Emisi GRK. Berdasarkan komitmen tersebut, target penurunan emisi GRK dari sektor pertanian adalah 8 juta ton setara CO₂ (26%) atau 41 juta ton setara CO₂ (Balitbangtan 2011).

Daya pemanasan global satu molekul gas metana di troposfer 21 kali lebih tinggi daripada satu molekul CO₂, sedangkan gas N₂O mempunyai potensi pemanasan global 310 kali molekul CO₂ (Johnson *et al.* 2007; Kumar dan Viyol 2009). Gas metana akan bertahan di lapisan troposfir sekitar 7–10 tahun. Lahan sawah menyumbang metana sekitar 15–45% di atmosfer, sedangkan sumbangan lahan kering sekitar 3–10% (Majumdar 2003).

Mitigasi emisi GRK merupakan langkah atau upaya mengurangi konsentrasi GRK yang diemisikan ke atmosfer. Upaya mitigasi emisi GRK dari lahan sawah merupakan antisipasi perubahan iklim yang tentunya harus bersinergi dengan aksi adaptasi perubahan iklim.

Sektor pertanian memegang peranan penting dalam mitigasi emisi GRK karena kemampuannya yang nyata dalam mengurangi emisi gas CH₄ dan N₂O. Tulisan ini bertujuan untuk memberikan informasi upaya mitigasi emisi gas metana melalui pengelolaan lahan sawah di Indonesia tanpa mengurangi produksi tanaman padi.

EMISI METANA DARI LAHAN SAWAH

Tanah sawah merupakan tanah potensial yang dapat digunakan untuk budi daya padi sawah sekali atau lebih selama setahun. Sawah sebagai suatu ekosistem buatan dan suatu jenis habitat mengalami kondisi kering dan basah silih berganti bergantung pada ketersediaan air.

Karakteristik sawah ditentukan oleh periode penggenangan, tanaman padi, dan budi dayanya. Sawah tergenang biasanya merupakan lingkungan air sementara yang dipengaruhi oleh keragaman sinar matahari, suhu, kemasaman tanah (pH), potensial redoks (Eh), konsentrasi O₂, dan status hara (Watanabe dan Roger 1985).

Tanah sawah yang tergenang merupakan kondisi ideal bagi terbentuknya gas metana (Sass dan Cicerone 1999). Metana adalah hidrokarbon sederhana dengan empat ikatan C-H yang ekuivalen, merupakan salah satu GRK yang dihasilkan dari proses dekomposisi bahan organik secara anaerobik dengan bantuan bakteri pembentuk metana (Johnson *et al.* 2007). Beberapa faktor yang memengaruhi pola dan besarnya emisi gas metana antara lain adalah: 1) tipe tanah, 2) pengelolaan air irigasi, 3) suhu tanah, 4) varietas, 5) tanaman, 6) pemupukan, dan 7) musim tanam (Romesser *et al.* 1979; Cicerone *et al.* 1983; Seiler *et al.* 1984; Holzapfel-Pschorn *et al.* 1986; Schutz *et al.* 1989; Yagi dan Minami 1990; Yagi *et al.* 1990; Kimura *et al.* 1991; Neue dan Roger 1993).

Potensial redoks (Eh) merupakan faktor utama produksi metana pada tanah sawah karena bakteri metanogen aktif melakukan metabolisme pada kondisi tanpa oksigen dengan nilai Eh < -200 mV (Conrad 1989). Bakteri metanogen merupakan bakteri mesofilik pembentuk metana pada degradasi bahan organik secara anaerobik dalam tanah (Zeikus 1977; Dubey 2005). Bakteri metanogen banyak terdapat di sekitar perakaran tanaman padi sawah, antara lain genus *Methanococcus* dan *Methanosarcina* (Franklin *et al.* 1988). Penggenangan tanah sawah menurunkan nilai Eh tanah sehingga terjadi proses reduksi sekuensial terhadap senyawa oksidatif anorganik dari bahan organik. Bahan organik tanah didekomposisi oleh mikroba secara bertahap melalui mekanisme respirasi aerobik, reduksi nitrat, fermentasi, reduksi sulfat, dan fermentasi metana, yang pada gilirannya dihasilkan CO₂ dan CH₄ menurut reaksi: C₆H₁₂O₆ → 3 CO₂ + 3 CH₄. Selain kadar bahan organik yang tinggi, penurunan Eh tanah juga distimulasi oleh kadar Fe³⁺ dan suhu yang tinggi serta kadar NO₃⁻, MnO₂, dan O₂ yang rendah (Ponnamperuma 1985).

Bakteri metanogen dapat menggunakan beberapa jenis substrat sebagai sumber C dan energi, seperti CO₂, CO, asam formiat, dan beberapa senyawa yang termetilasi yaitu metanol, asetat, trimetilamin, dan dimetilsulfit (Kiene *et al.* 1986; Vogels *et al.* 1988). Bahan organik menstimulasi produksi metana sebagai akibat peningkatan produksi fermentasi yang berupa asam organik sederhana dan ion hidrogen untuk membentuk CH₄ (Dubey 2005). Oleh karena itu, produksi metana dapat distimulasi oleh eksudasi akar atau aplikasi pupuk organik seperti jerami padi, pupuk kandang, dan kompos (Yagi dan Minami 1990).

Pelepasan GRK ke atmosfer dari tanah sawah (emisi) melibatkan berbagai proses mikrobiologi. Sekelompok mikroba metanogen, misalnya *Methanosarcina* berperan dalam degradasi senyawa organik kompleks. Metanogen

merupakan penghasil gas metana (CH_4) yang menjadi penyebab pemanasan global (Whalen 2005) dan salah satu gas rumah kaca yang paling penting setelah CO_2 . Selain itu, terutama di zona perakaran tanaman padi, terdapat sekelompok mikroba lain yang berperan sebagai metanotrof, misalnya *Methylomonas*, *Methylobacter*, dan *Methylococcus*. Metanotrof merupakan bakteri gram negatif yang bersifat aerobik yang mampu mengoksidasi metana menjadi CO_2 dan bakteri tersebut menggunakan metana sebagai sumber karbon dan energinya (Dubey 2005).

Pemberian bahan yang mengandung sulfat dan nitrat dapat bertindak sebagai penerima elektron yang menghambat produksi metana (Whalen 2005). Pemberian sulfat menyebabkan terjadinya persaingan antara bakteri metanogen dan bakteri pereduksi sulfat terhadap bahan organik sehingga dapat menurunkan produksi metana (Dubey 2005). Pemberian nitrat memberikan efek toksik terhadap bakteri metanogen sehingga akan menunda pembentukan metana (Whalen 2005).

Suhu tanah merupakan faktor penting bagi proses metanogenesis pada tanah sawah (Conrad *et al.* 1987). Bakteri metanogen umumnya bersifat mesofilik, dengan aktivitas optimalnya terjadi pada suhu 30–40 °C (Vogels *et al.* 1988). Pada kondisi tersedia cukup substrat, peningkatan suhu dari 17 ke 30 °C menyebabkan peningkatan produksi metana 2,5–3,5 kali lipat (Conrad *et al.* 1987).

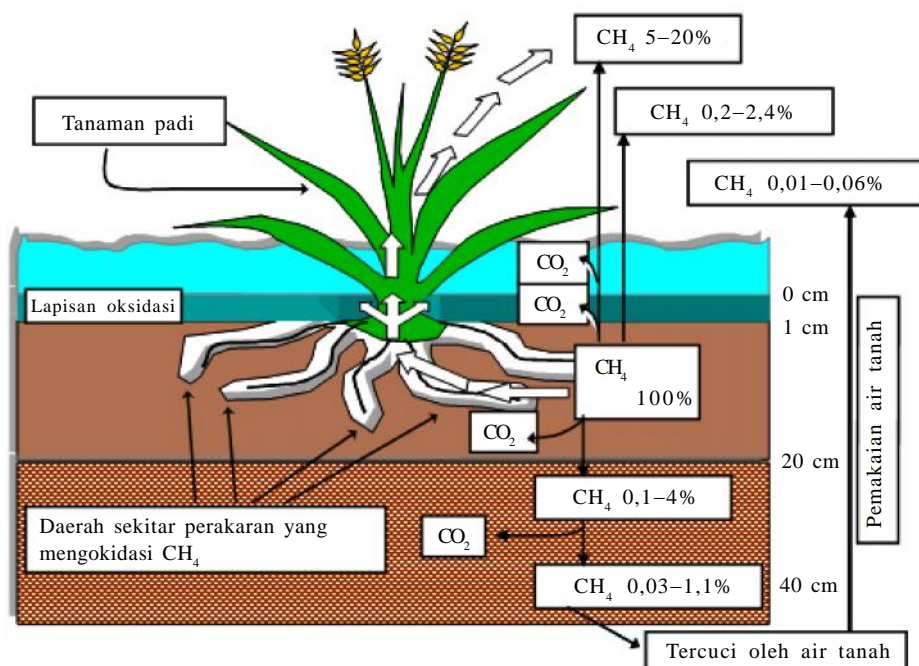
Reaksi tanah (pH tanah) merupakan salah satu faktor penting penentu produksi metana pada tanah sawah. Sebagian besar bakteri metanogen bersifat neutrofilik atau tumbuh optimal pada kisaran pH mendekati netral

(Whalen 2005). Peningkatan pH akan meningkatkan produksi CH_4 serta degradasi bahan organik dan sebaliknya (Conrad 1989).

Praktik budi daya padi sawah berpengaruh terhadap besarnya metana yang dilepaskan ke atmosfer. Aplikasi bahan organik akan meningkatkan produksi metana melalui pengaruhnya terhadap penurunan Eh dan penyediaan sumber C (Schutz *et al.* 1990). Namun demikian, laju dan tingkat produksi metana bergantung pada jumlah dan kualitas bahan organik yang diaplikasikan (nisbah C/N, kadar selulosa, derajat humifikasi). Aplikasi jerami padi (nisbah C/N tinggi) meningkatkan produksi metana secara nyata (Wihardjaka *et al.* 2012), sedangkan penambahan kompos (telah terhumifikasi, nisbah C/N rendah) tidak memberikan pengaruh.

Rejim air adalah faktor utama yang menentukan iklim mikro pada pertanian padi. Kompleksitas iklim mikro menjadi lebih besar karena fluktuasi intensitas sinar matahari, suhu, reaksi tanah (pH), potensial redoks (Eh), konsentrasi O_2 dalam air genangan, dan status hara tanah (Watanabe dan Roger 1985). Proses ini diilustrasikan dalam Gambar 1.

Produksi metana di perakaran tanaman padi ditentukan oleh eksudasi akar, ketersediaan oksigen, kapasitas oksidasi perakaran, dan rongga aerenkhima akar. Bahan organik yang dihasilkan dari eksudasi akar, akar yang membusuk, dan pasokan bahan organik segar akan menghasilkan metana. Metana yang dihasilkan sebagian terlepas melalui rongga aerenkhima (5–20%), melalui gelembung ebullisi (0,2–2,4%), terperkolasi ke lapisan tanah bawah (0,1–4%), dan sebagian teroksidasi menjadi CO_2 (Watanabe dan Roger 1985).



Gambar 1. Dinamika produksi dan emisi metana (CH_4) dari lahan sawah (Watanabe dan Roger 1985).

MITIGASI EMISI GAS METANA DARI LAHAN SAWAH

Mitigasi emisi metana pada prinsipnya berupaya meningkatkan konsentrasi oksigen pada lapisan anaerobik tanah dan zona perakaran (rizosfer) dan menurunkan pasokan karbon yang mudah terurai. Upaya mitigasi dengan menerapkan sistem budi daya tanaman padi yang efektif dan efisien tetap mempertimbangkan hasil tanaman yang nyata.

Beberapa peneliti telah melaporkan hasil-hasil penelitian mitigasi emisi gas metana dari lahan sawah dengan beberapa teknologi dalam budi daya tanaman padi. Emisi metana yang diukur melalui pendekatan pengelolaan lahan sawah beragam. Oleh karena itu, kombinasi beberapa teknologi dalam budi daya padi sawah merupakan upaya mitigasi emisi metana yang efektif tanpa menurunkan produktivitas tanaman padi. Komponen teknologi yang telah dianjurkan dan diadopsi petani di lahan sawah meliputi penggunaan varietas unggul, penggunaan bahan organik dan pupuk anorganik, sistem pengaturan air, dan sistem olah tanah.

Varietas Padi

Tanaman padi mempunyai peranan penting dalam pelepasan metana ke atmosfer karena dapat meningkatkan proses metanogenesis melalui pelepasan eksudat akar yang kaya akan sumber karbon tersedia. Akar tanaman padi mampu melakukan pertukaran oksigen, dapat membentuk keseimbangan termodinamik karena sekitar 60–90% CH₄ diproduksi di lapisan rizosfer melalui pembuluh aerenkhima tanaman (Johnson *et al.* 2007).

Emisi gas metana pada berbagai varietas padi ditentukan oleh perbedaan sifat fisiologi dan morfologi masing-masing varietas. Kemampuan varietas mengemisi gas CH₄ bergantung pada rongga aerenkhima, jumlah anakan, biomassa padi, pola perakaran dan daya oksidasi, eksudat akar, dan aktivitas mikroorganisme di sekitar perakaran (Holzapfel-Pschorn *et al.* 1986; Neue dan Roger 1993).

Fluks emisi gas metana antarvarietas padi yang dibudidayakan di lahan sawah beragam. Keragaman tersebut berkaitan erat dengan kondisi air dan karakteristik tanah antarlokasi yang beragam pula. Varietas IR64 menghasilkan emisi gas metana lebih rendah dibandingkan dengan varietas lain yang umum digunakan petani (Tabel 1). Setyanto dan Abubakar (2006) melaporkan varietas Cisadane mengemisi gas metana lebih tinggi dibandingkan dengan varietas IR64, Memberamo, dan Way Apoburu, yang terkait dengan produksi biomassa Cisadane yang lebih tinggi daripada ketiga varietas tersebut.

Pelepasan varietas baru seperti Tukad Balian dan Way Apoburu memberikan harapan baru karena kemampuannya dalam mengurangi emisi gas metana ke atmosfer. Balitbangtan (2011) mengungkapkan bahwa varietas Ciherang, Cisantana, Tukad Balian, Memberamo, Inpari 1, Dodokan, Way Apoburu, dan IR64 termasuk varietas yang rendah emisi GRK, sedangkan varietas yang berumur relatif dalam seperti Cisadane, IR72, dan Ciliwung termasuk varietas dengan emisi GRK tinggi. Beberapa varietas padi yang ditanam pada lahan sawah tadah hujan menunjukkan bahwa indeks emisi varietas Way Apoburu lebih rendah daripada Dodokan, Silugonggo, Cisantana, Sintanur, IR64, dan Mentik yang nilainya masing-masing adalah 5,5; 7,0; 9,9; 11,2; 11,5; 20,2; 27,1 kg CH₄ per ton gabah yang dihasilkan (Wihardjaka 2007).

Tabel 1. Emisi gas metana (CH₄) beberapa varietas padi dari lahan sawah, 1996>2002.

Varietas	Emisi gas CH ₄ (kg/ha/musim)									
	1996–1997		1997–1998		1998–1999		1999–2000		2000–2001	
	MH ¹	MK ¹	MH ¹	MK ¹	MH ¹	MK ¹	MH ²	MK ²	MH ²	MK ²
Cisadane	538	461	48	148	292	179	–	–	–	–
Memberamo	440	215	40	121	124	100	–	–	–	–
IR64	246	194	39	66	121	73	44	–	242	148
IR36	357	–	45	101	136	99	–	–	–	–
Dodokan	412	282	–	–	75	74	–	–	–	–
IR72	–	421	–	–	–	–	–	–	–	–
Batang Anai	–	226	66	169	–	–	–	–	–	–
Muncul	–	–	–	–	146	108	–	–	–	–
Maros	–	–	31	117	–	–	–	–	–	–
Widas	–	–	–	–	–	–	61	–	–	–
Way Apoburu	–	–	–	–	–	–	60	–	200	74
Tukad Unda	–	–	–	–	–	–	–	–	139	169
Tukad Balian	–	–	–	–	–	–	–	–	134	97
Tukad Petanu	–	–	–	–	–	–	–	180	135	–
Ciherang	–	–	–	–	–	–	–	–	217	124
Cisantana	–	–	–	–	–	–	–	–	164	102

MH = musim hujan, MK = musim kemarau.

Sumber: ¹Wihardjaka *et al.* (1999b), ²Suharsih *et al.* (2002).

Besarnya eksudat akar yang dihasilkan di perakaran tanaman padi beragam dengan periode tumbuh antarvarietas sehingga berpengaruh pula terhadap keragaman pasokan eksudat akar bagi bakteri metanogen. Produksi eksudat akar tinggi terjadi pada fase pertumbuhan anakan maksimum hingga fase keluar bunga (Kludze *et al.* 1993). Varietas padi berumur panjang seperti Cisadane diduga memiliki kemampuan fotosintesis lebih baik daripada varietas lainnya sehingga banyak menghasilkan asimilat yang mengandung bentuk C yang mudah terdegradasi dari eksudat akar. Selain itu, nilai eksudat akar ditentukan pula oleh susunan dan jumlah akar masing-masing varietas padi. Makin banyak dan merata perakaran tanaman, makin besar distribusi eksudat ke dalam lapisan tanah (Setyanto 2004). Selain itu, akar padi mampu melakukan pertukaran gas dalam rangka menjaga keseimbangan termodinamik, yaitu kapasitas pengoksidasi akar. Pertukaran gas ini menyebabkan konsentrasi O_2 di sekitar perakaran tanaman meningkat dan konsentrasi CH_4 teroksidasi secara biologis oleh bakteri metanogen (Whalen 2005).

Pembenah Organik

Emisi gas metana dari petakan sawah yang diberi pupuk kandang dan kompos relatif lebih rendah dibandingkan dengan yang diberi pupuk hijau dan jerami segar. Pupuk organik matang dengan nisbah C/N rendah, seperti pupuk kandang dan kompos, mengemisi gas metana lebih rendah daripada pupuk organik dengan nisbah C/N lebih tinggi, seperti jerami segar dan pupuk hijau (Tabel 2). Di lahan sawah tadah hujan, emisi metana pada pemberian jerami melapak ($73,3 \pm 6,6$ kg CH_4 /ha/musim) nyata lebih rendah daripada pemberian jerami segar ($93,5 \pm 4$ kg CH_4 /ha/musim) dengan takaran masing-masing 5 t/ha (Wihardjaka *et al.* 2012). Penelitian Setyanto *et al.* (1997) menunjukkan bahwa peningkatan takaran pupuk kandang juga meningkatkan emisi metana dari lahan sawah (Tabel 3).

Besarnya fluks CH_4 akibat pemberian bahan organik sangat bergantung pada besarnya kandungan C organik tanah dan tingkat dekomposisinya atau nisbah C/N.

Tabel 3. Pengaruh pupuk kandang terhadap emisi gas metana (CH_4) dari lahan sawah tahun 1996.

Takaran pupuk kandang (t/ha)	Emisi metana (kg CH_4 /ha/musim)	
	Musim hujan	Musim kemarau
Tanpa pupuk kandang	90	89
Pupuk kandang 2,5 t/ha	78	96
Pupuk kandang 5 t/ha	84	101

Sumber: Setyanto *et al.* (1997).

Penggunaan pupuk kandang matang dapat memperbaiki produksi padi sawah sekaligus menurunkan emisi gas metana yang dilepaskan ke atmosfer dari lahan sawah dengan tingkat kesuburan tanah rendah. Menurut Yagi dan Minami (1990), penambahan jerami 6 t/ha dapat meningkatkan emisi metana 1,8–3,3 kali lebih besar dibandingkan dengan hanya memberikan pupuk anorganik. Penambahan jerami padi 9 t/ha meningkatkan emisi metana 3,5 kali lebih besar. Penambahan jerami yang sudah menjadi kompos (terhumifikasi) tidak menyebabkan emisi metana yang tinggi.

Pemberian bahan organik berupa jerami, pupuk kandang mentah, dan pupuk kandang nyata meningkatkan emisi gas metana dibandingkan dengan yang dipupuk N saja. Emisi metana tertinggi dihasilkan pada perlakuan jerami, diikuti pupuk kandang mentah dan pupuk kandang matang. Hasil penelitian Lu *et al.* (2000) di China menunjukkan bahwa asal pupuk kandang memengaruhi besarnya fluks metana. Perlakuan pupuk anorganik, jerami padi, kotoran babi, dan kotoran sapi masing-masing mengemisi metana 6, 141, 191, dan 43 kg CH_4 /ha.

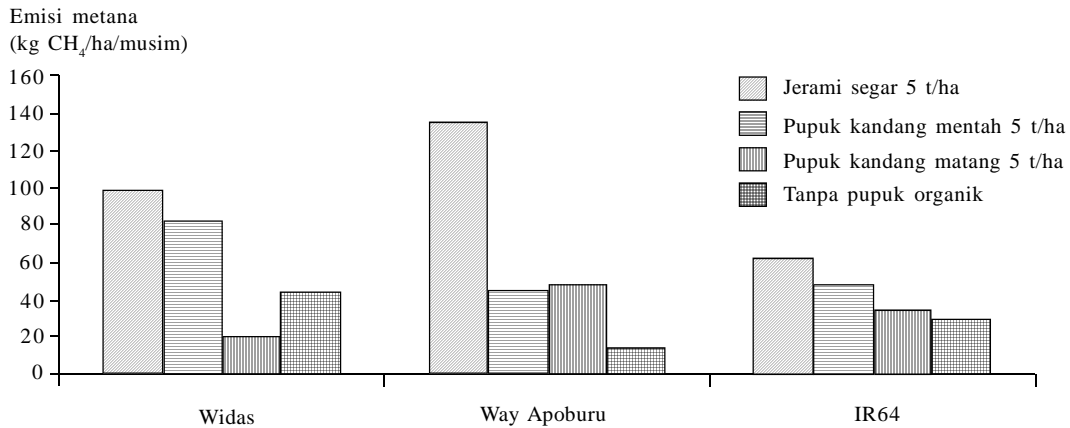
Rata-rata emisi gas metana dari lahan sawah yang ditanami varietas IR64 lebih rendah dibandingkan dengan emisi gas metana dari lahan sawah yang ditanami varietas Widas dan Way Apoburu. Emisi terendah dicapai oleh varietas Way Apoburu dari lahan sawah yang dipupuk 90 kg N/ha, yaitu 13,7 kg/ha/musim, sedangkan emisi tertinggi dicapai oleh varietas yang sama dengan pemberian jerami 5 t/ha (Gambar 2).

Tabel 2. Fluks metana (CH_4) dan hasil gabah dengan beberapa sumber bahan organik di lahan sawah di Jawa Tengah tahun 1997.

Sumber bahan organik	Fluks metana (kg CH_4 /ha/musim)		Hasil gabah (t/ha)	
	MH	MK	MH	MK
Tanpa bahan organik	89	200	3,13	2,14
Pupuk kandang	189	225	6,27	2,35
Jerami segar	165	340	5,90	2,61
Kompos	156	–	4,71	–
Pupuk hijau <i>Sesbania</i> sp.	–	330	–	2,25

MH = musim hujan, MK = musim kemarau.

Sumber: Wihardjaka *et al.* (1999a).



Gambar 2. Emisi gas metana dari beberapa varietas padi dengan pemberian bahan organik, Jakenan, MH 2000/2001 (Mulyadi *et al.* 2001a).

Pupuk Anorganik

Penggunaan pupuk anorganik secara intensif dalam budi daya tanaman pertanian mulai diperkenalkan sejak dimulainya Revolusi Hijau. Pupuk anorganik sebagai pupuk dengan kandungan hara siap tersedia bagi tanaman telah menggeser peran pupuk organik dalam beberapa dekade sehingga ketergantungan petani terhadap pupuk anorganik masih nyata. Penggunaan pupuk anorganik berperan besar terhadap emisi dan mitigasi gas metana dari lahan sawah.

Kemampuan reduksi tertinggi diperoleh pada pemupukan ZA yang diberikan 2 atau 3 kali dengan rata-rata kemampuan reduksi 10,7% dan 17,3% dibandingkan dengan tanpa pupuk N. Pemupukan urea pril yang diberikan 2 atau 3 tahap dan urea tablet hanya mereduksi metana masing-masing 6,9; 8,0; 4,1%. Hasil padi sawah tadah hujan relatif tinggi dengan pemberian pupuk ZA (Tabel 4). Pupuk N yang mengandung sulfat menyebabkan terjadinya persaingan antara bakteri metanogen dan bakteri pereduksi sulfat dalam memperoleh ion hidrogen. Menurut Jakobsen *et al.* (1991), persaingan antara bakteri pereduksi sulfat dan bakteri pembentuk metana dalam memperoleh sumber energi dan meman-

faatkan substrat dalam tanah terutama senyawa organik akan menghambat pembentukan metana. Proses redoks di lahan sawah yang tergenang adalah berkurangnya oksigen tanah, reaksi NO_3^- , Mn^{4+} , Fe^{3+} , SO_4^{2-} , dan reduksi CO_2 , di mana reduksi $\text{SO}_4^{2-} + 9\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow \text{HS}^-$ dengan potensial redoks 0 hingga -150 mV, sedangkan reduksi $(\text{CH}_2\text{O})_n \rightarrow \frac{1}{2} n \text{CO}_2 + \frac{1}{2} n \text{CH}_4$ terjadi pada potensial redoks -150 hingga -220 mV (Ponnamperuma 1972).

Pemupukan urea tablet dan ZA mengemisi gas metana lebih rendah dibandingkan urea pril. Hasil yang sama dikemukakan oleh Schultz *et al.* (1989), bahwa emisi metana makin kecil dengan penambahan urea. Diduga karena penyerapan NH_4^+ oleh tanaman akan diikuti oleh pelepasan H^+ sehingga pH tanah di sekitar perakaran tanaman turun. Turunnya pH tanah diduga berdampak negatif terhadap produksi gas metana. Selain itu, ion sulfat sebagai hasil samping dari hidrolisis ZA dapat memperlambat penurunan redoks potensial (Eh) tanah yang kemungkinan disebabkan oleh teroksidasinya SO_3^{2-} menjadi SO_4^{2-} . Senyawa sulfat dan sulfit diduga toksik bagi bakteri metanogen (Schultz *et al.* 1989; Kumar dan Viyol 2009).

Pupuk urea yang diberikan ke dalam tanah dihidrolisis oleh enzim urease menjadi CO_2 dan NH_3 , mengakibatkan

Tabel 4. Pengelolaan pupuk nitrogen di lahan sawah terhadap emisi gas metana dan hasil gabah tahun 1998.

Pengelolaan pupuk N	Emisi metana (kg/ha/musim)		Hasil gabah (t/ha)	
	MH	MK	MH	MK
Tanpa N	207	185	3,15	3,79
Urea pril, diberikan dua tahap	188	176	5,81	4,46
Urea pril, diberikan tiga tahap	186	174	5,81	4,76
ZA, diberikan dua tahap	181	168	6,63	4,46
ZA, diberikan tiga tahap	175	164	6,68	5,86
Urea tablet, diberikan sekaligus	197	184	7,62	4,83

MH = musim hujan, MK = musim kemarau.

Sumber: Setyanto *et al.* (1999).

peningkatan pH ke arah alkalis dan penurunan redoks potensial yang diduga dapat meningkatkan emisi gas metana (Schultz *et al.* 1989). Nitrogen diserap tanaman padi dalam bentuk NH_4^+ , akar diseimbangkan dengan pelepasan H^+ di sekitar perakaran padi, sehingga kemasaman tanah di daerah perakaran meningkat yang dapat menghambat perkembangan bakteri metanogen (Johnson *et al.* 2007).

Pemberian pupuk N berperan penting dalam memperbaiki pertumbuhan tanaman padi. Sementara itu, pemupukan N berdampak negatif terhadap pembentukan gas metana di dalam tanah, artinya semakin baik pertumbuhan tanaman padi semakin besar kemampuannya menekan pembentukan gas metana. Terhambatnya emisi gas metana diduga karena proses difusi oksigen ke lapisan reduksi tanah lebih baik sehingga gas yang terbentuk dioksidasi oleh bakteri pereduksi metana yang sangat aktif dengan adanya oksigen pada kondisi anaerobik. Gas metana yang terbentuk sebagian dioksidasi sebelum terlepas ke atmosfer. Selain itu, pupuk N yang mengandung sulfat (ZA) dapat menyebabkan terjadinya persaingan antara bakteri metanogen dan bakteri pereduksi sulfat dalam memperoleh hidrogen sehingga pembentukan metana terhambat (Schultz *et al.* 1989).

Sistem Pengaturan Air

Tanah tergenang merupakan kondisi ideal bagi bakteri metanogen dalam pembentukan gas metana. Emisi gas metana tertinggi dicapai pada kondisi tanah sawah yang digenangi secara terus-menerus, baik dengan sistem tanam pindah maupun tanam benih langsung. Sistem irigasi berselang terputus (*intermitten*) dapat menekan emisi gas metana dan menghasilkan gabah yang tidak berbeda jauh dengan sistem tergenang (Tabel 5 dan 6).

Sistem Olah Tanah

Besarnya emisi gas metana dari lahan padi gogoranch dengan sistem tanpa olah tanah (TOT) lebih kecil dibandingkan dengan emisi metana pada sistem olah tanah sempurna (OTS) seperti terlihat pada Gambar 3. Tanah diolah sempurna berarti tanah diolah dengan bajak dua kali kemudian diratakan dengan menggunakan 'garu'. Pengembalian jerami padi ke dalam tanah menghasilkan emisi metana lebih tinggi dibandingkan dengan pemberian pupuk kandang dengan takaran yang sama. Sistem olah tanah dan pemberian jerami segar 5 t/ha pada musim tanam

Tabel 5. Emisi gas metana pada kombinasi sistem olah tanah, cara tanam, dan cara pemberian air, 1997–1999.

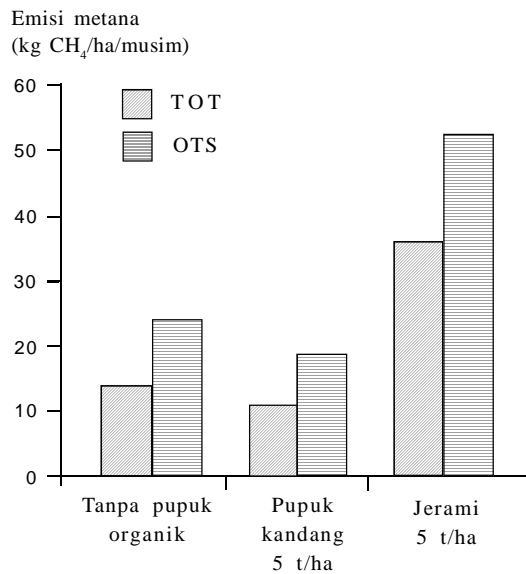
Perlakuan	Emisi metana (kg/ha/musim)			
	MK 1997	MH 1997/98	MH 1998/99	MK 1999
OTS, tapin, tergenang	100	146	93	318
OTS, tapin, irigasi berselang	35	46	68	160
OTS, tabela, irigasi berselang	31	46	56	98
OTS, tabela, tergenang	94	92	74	106
OTS, tabela, macak-macak	75	65	–	–
TOT, tabela, irigasi berselang	21	19	42	69
TOT, tabela, tergenang	–	–	57	75

OTS = olah tanah sempurna (tanah dibajak dua kali dan diratakan dengan 'garu'); TOT = tanpa olah tanah, tapin = tanam pindah, tabela = tanam benih langsung, MH = musim hujan, MK = musim kemarau. Sumber: Suharsih *et al.* (1999, 2001).

Tabel 6. Hasil gabah padi varietas Memberamo pada kombinasi olah tanah, cara tanam, dan cara pemberian air, 1997–1999.

Perlakuan	Hasil gabah (t/ha)			
	MK 1997	MH 1997/98	MH 1998/99	MK 1999
OTS, tapin, tergenang	6,39	3,20	6,12	4,53
OTS, tapin, <i>intermitten</i>	5,70	2,98	6,12	4,63
OTS, tabela, <i>intermitten</i>	5,44	3,31	5,61	4,76
OTS, tabela, tergenang	6,59	3,35	6,06	4,84
OTS, tabela, macak-macak	5,89	3,15	–	–
TOT, tabela, <i>intermitten</i>	6,22	2,99	5,92	4,51
TOT, tabela, tergenang	–	–	5,81	4,40

OTS = olah tanah sempurna; TOT = tanpa olah tanah, tapin = tanam pindah, tabela = tanam benih langsung, MH = musim hujan, MK = musim kemarau. Sumber: Suharsih *et al.* (1999, 2001).



Gambar 3. Emisi gas metana dari cara olah tanah, pemupukan N dan pemberian bahan organik pada gogorancan, Jakenan MH 2000/2001; TOT = tanpa olah tanah, OTS = olah tanah sempurna (Mulyadi *et al.* 2001b).

padi gogorancan MH 1999/2000 menghasilkan emisi gas metana lebih tinggi dibandingkan dengan sistem olah tanah tanpa pemberian jerami segar (Mulyadi *et al.* 2002). Pengelolaan residu bahan organik dan sistem olah tanah meningkatkan sekuestrasi karbon dalam tanah (Dendooven *et al.* 2012).

Pada perlakuan pupuk kandang maupun jerami padi, emisi metana pada TOT lebih kecil daripada pada OTS. Pada kondisi rejim air yang sama, perlakuan TOT mampu menekan emisi metana 37,1% tanpa memengaruhi hasil padi dibandingkan dengan OTS. Rendahnya nilai emisi metana pada perlakuan TOT diduga karena jumlah biomassa yang dikembalikan ke dalam tanah lebih sedikit dibandingkan dengan perlakuan OTS. Selain itu, laju dekomposisi bahan organik tanah pada sistem TOT berlangsung lebih lambat dibandingkan pada sistem OTS. Laju dekomposisi cadangan C tanah lebih cepat pada sistem OTS sehingga pelepasan C lebih tinggi dibandingkan pada sistem TOT. Emisi C pada sistem olah tanah proporsional dengan volume tanah yang dirusak (Reicosky dan Ancher 2007).

STRATEGI MITIGASI EMISI GAS METANA DARI LAHAN SAWAH

Beberapa teknologi anjuran sebagian besar telah diterapkan petani dalam budi daya padi sawah untuk memperoleh hasil yang optimal. Namun, penerapan teknologi tersebut dapat berdampak terhadap emisi gas metana. Upaya mitigasi emisi gas metana dapat dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa komponen teknologi yang telah diadopsi petani, antara lain: 1)

penggunaan varietas Tukad Balian, Way Apoburu, Maros, Widas, dan Ciherang yang relatif cocok dibudidayakan di lahan sawah, berdaya hasil tinggi, dan berpotensi menurunkan emisi metana, 2) pemberian pupuk organik matang (pupuk kandang dan kompos) yang mengemisi gas metana lebih rendah daripada pupuk organik mentah, seperti jerami segar dan pupuk hijau, 3) penggunaan bahan organik yang telah dikomposkan karena penambahan bahan organik segar akan meningkatkan fluks metana dari lahan sawah, di mana bahan organik segar umumnya mempunyai nisbah C/N tinggi sehingga jika terjadi penguraian secara anaerobik dihasilkan metana tinggi, 4) penggunaan pupuk nitrogen yang mengandung sulfur (ZA) karena mampu mereduksi metana lebih besar daripada pupuk urea pril dan urea tablet, 5) penggunaan pupuk anorganik lambat urai karena dapat memberikan emisi metana lebih rendah, 6) irigasi berselang karena emisi gas metana pada cara pemberian air secara terus-menerus lebih besar daripada pengairan berselang, dan 7) sistem tanpa olah tanah karena mengemisi gas metana lebih rendah daripada sistem olah tanah sempurna.

Pemulia Indonesia telah banyak menghasilkan varietas padi unggul tipe baru yang toleran terhadap cekaman lingkungan dan tahan terhadap organisme pengganggu tanaman. Namun, varietas-varietas tersebut hendaknya juga disertai informasi terkait besarnya emisi metana yang dihasilkan sehingga varietas berdaya hasil tinggi sekaligus mengemisi metana rendah dapat menjadi salah satu aksi adaptasi dan mitigasi perubahan iklim.

Menurut Boer (2003), dampak penerapan teknologi mitigasi dapat bersifat positif atau negatif terhadap hasil tanaman. Penerapan teknologi penurunan emisi gas metana sebagian besar berdampak positif terhadap hasil padi (Tabel 7). Komponen teknologi di lahan sawah irigasi berupa pemakaian varietas unggul dan irigasi terputus-putus berpotensi tinggi menekan emisi metana, sedangkan di lahan sawah tadah hujan penerapan sistem tanpa olah tanah atau olah tanah konservasi berpotensi tinggi menurunkan emisi metana.

KESIMPULAN

Laju emisi metana dari tanah sawah ditentukan oleh berbagai faktor alami, antara lain kondisi iklim, suhu, sumber karbon, karakteristik tanah, dan kondisi pertanaman padi. Laju emisi metana di lahan sawah beragam sesuai dengan keberagaman kondisi lingkungan pertumbuhan tanaman, morfologi dan fisiologi tanaman, serta praktik budi daya spesifik lokasi. Emisi metana antar-varietas padi ditentukan oleh morfologi dan fisiologi, kapasitas oksidasi perakaran, eksudasi akar, dan rongga aerenkhima masing-masing varietas padi. Beberapa varietas padi yang mengemisi metana rendah adalah Ciherang, Cisantana, Tukad Balian, Memberamo, Inpari 1, Dodokan, Way Apoburu, dan IR64, sedangkan varietas

Tabel 7. Dampak penerapan teknologi mitigasi emisi gas metana terhadap hasil tanaman padi.

Teknologi mitigasi	Potensi penurunan metana (kg/ha)	% perubahan hasil emisi tanaman	Wilayah target pelaksanaan
Lahan sawah irigasi			
Tanpa olah tanah	22,9	-10,8	Jawa Barat, Sumatera, Kalimantan
Substitusi urea dengan amonium sulfat (AS)	10,0	+6,5	Jawa Timur, Bali, Nusa Tenggara
Substitusi urea pril dengan urea tablet	18,1	+20,5	Jawa, Bali
Sebar benih langsung	37,0	+4,3	Jawa, Sumatera, Sulawesi Selatan, Bali
Irigasi berselang	55,5	+5,4	Jawa, Sumatera, Sulawesi Selatan, Bali
Mengganti varietas	90,0	-15,6	Jawa Barat
Lahan sawah tadah hujan			
Tanpa olah tanah	42,0	-8,4	Jawa Barat, Sumatera, Kalimantan
Substitusi urea dengan amonium sulfat (AS)	29,8	+6,7	Jawa Timur, Bali, Nusa Tenggara
Substitusi urea pril dengan urea tablet	20,0	+10,8	Jawa, Bali
Mengganti varietas	33,0	+40,0	Jawa Barat

Sumber: Boer (2003).

dengan emisi metana tinggi antara lain Cisadane, IR72, dan Ciliwung.

Upaya mitigasi emisi gas metana dari lahan sawah dilaksanakan dengan tanpa mengorbankan aspek produksi beras, dan cara mitigasi yang dipilih harus bersifat spesifik lokasi melalui pengelolaan lahan sawah yang tepat. Pendekatan yang paling efektif dalam menurunkan emisi metana dari lahan sawah adalah dengan mengintegrasikan komponen teknologi, antara lain pemberian bahan organik setelah dikomposkan atau fermentasi biogas, pengelolaan air dengan irigasi terputus-putus, penanaman kultivar atau varietas padi unggul dengan emisi metana rendah, dan pemupukan anorganik secara bertahap atau lambat urai.

Strategi penurunan emisi metana dari tanah sawah beririgasi meliputi penerapan sistem tanpa olah tanah, penggantian pupuk urea pril dengan amonium sulfat atau urea tablet, penerapan tanam benih langsung, penerapan irigasi berselang, dan penggantian varietas padi dengan varietas padi unggul dengan emisi rendah. Untuk lahan sawah tadah hujan, strategi penurunan emisi meliputi penerapan sistem tanpa olah tanah, penggantian pupuk urea pril dengan amonium sulfat atau urea tablet, dan penggantian varietas padi dengan varietas padi unggul dengan emisi rendah.

DAFTAR PUSTAKA

- Balitbangtan. 2011. Pedoman Umum Mitigasi Perubahan Iklim Sektor Pertanian. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian, Jakarta.
- Boer, R. 2003. Masalah gas rumah kaca: hubungannya dengan lingkungan pertanian. *Dalam* A. Sofyan, S.Y. Jatmiko, dan J. Sasa (Ed.). *Prosiding Seminar Nasional Peningkatan Kualitas Lingkungan dan Produk Pertanian*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor. hlm. 1–20.
- Cicerone, R.J., J.D. Shetterand, and C.C. Delwiche. 1983. Seasonal variation of methane flux from a California rice paddy. *J. Geophysical Res.* 88: 11022–11024.
- 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. pp. 301–343.
- Conrad, R., H. Schutz, and M. Babel. 1987. Temperature limitation of hydrogen turn over and methanogenesis in anoxic paddy soils. *FEM Microbiol. Ecol.* 45: 281–289.
- Dendooven, L., L. Patino-Zúniga, N. Verhulst, M. Luna-Guido, R. Marsch, and B. Govaerts. 2012. Global warming potential of agricultural systems with contrasting tillage and residue management in the central highlands of Mexico. *Agric. Ecosyst. Environ.* 152: 50–58.
- Dubey, S.K. 2005. Microbial ecology of methane emission in rice agroecosystem: A review. *Appl. Ecol. Environ. Res.* 3(2): 1–27.
- Environmental Ministry. 2010. Indonesian Second National Communication under the United Nations Framework Convention on Climate Change: Climate Change Protection for Present and Future Generation. Ministry of Environment, Republic of Indonesia.
- Franklin, M.J., W.J. Wiebe, and W.B. Whitman. 1988. Populations of methanogenic bacteria in a Georgia Salt Marsh. *Appl. Environ. Microbiol.* 54(5): 1151–1157.
- Holzappel-Pschorn, A.R., R. Conrad, and W. Seiler. 1986. Effect of vegetation on the emission of methane from submerged rice paddy soil. *Plant and Soil* 92: 223–233.
- Jakobsen, P., W.H. Patrick, Jr, and B.G. William. 1991. Sulfide and methane formation in soils and sediments. *Soil Sci.* 132: 279–287.
- Johnson, J.M.F., A.J. Franzluebbers, S.L. Weyers, and D.C. Reicosky. 2007. Agricultural opportunities to mitigate greenhouse gas emissions. *Environmental Pollution* 150: 107–124.
- Kiene, R.P., R.S. Oremland, A. Catena, L.G. Miller, and D.G. Capone. 1986. Metabolism of reduced methylated sulfur compounds in anaerobic sediments and by a pure culture on an estuarine methanogens. *Appl. Environ. Microbiol.* 52: 1037–1045.
- Kimura, M., Y. Miura, A. Watanabe, T. Katoh, and H. Haraguchi. 1991. Methane emission from paddy field (Part 1). Effect of

- fertilization, growth stage and midsummer drainage: Pot experiment. *Environ. Sci.* 4: 265–271.
- Kludze, H.K., R.D. DeLaune, and W.H. Patrick, Jr. 1993. Aerenchyma formation and methane and oxygen exchange in rice. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 386–391.
- Kumar, J.I.N. and S. Viyol. 2009. Short term diurnal and temporal measurement of methane emission in relation to organic carbon, phosphate and sulphate content of two rice fields of central Gujarat, India. *J. Environ. Biol.* 30(2): 241–246.
- Lu, W.F., W. Chen, B.W. Duan, W.M. Guan, Y. Lu, and R.S. Lantin. 2000. Methane emissions and mitigation options in irrigated rice fields in Southeast China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 58: 65–73.
- Majumdar, D. 2003. Methane and nitrous oxide emission from irrigated rice fields: Proposed mitigation strategies. *Curr. Sci.* 84(10): 1317–1326.
- Mulyadi, R. Nuriwan, I.J. Sasa, dan S. Partohardjono. 2001a. Emisi gas metan dari berbagai varietas dan bahan organik di lahan sawah tadah hujan. Laporan Hasil Penelitian T.A. 2000. Loka Penelitian Tanaman Pangan Jakenan.
- Mulyadi, Suharsih, dan I.J. Sasa. 2001b. Emisi gas metan dari cara olah tanah, pemupukan N dan pemberian bahan organik pada gogorancah. Laporan Hasil Penelitian MH 2000/2001. Loka Penelitian Tanaman Pangan Jakenan.
- Mulyadi, Suharsih, I.J. Sasa, dan P. Setyanto. 2002. Penggunaan bahan organik pada padi dan emisi gas metan dari lahan sawah. Prosiding Seminar Nasional Sistem Produksi Tanaman Pangan Berwawasan Lingkungan. Puslitbangtan, Bogor. hlm. 71–78.
- Neue, H.U. and P.A. Roger. 1993. Rice agriculture: factors controlling emission. *In: M.A.K. Khalil and M. Shearer (Eds.). Global Atmospheric Methane. NATO ASI/ARW Series.*
- Neue, H.U. and R.L. Sass. 1994. Trace gas emissions from rice fields. *Environ. Sci. Res.* 48: 119–147.
- PEACE. 2007. Indonesia dan Perubahan Iklim: Status Terkini dan Kebijakannya. Bank Dunia, DFID, PEACE, Jakarta.
- Pierzynski, G.M., J.T. Sims, and G.F. Vance. 2000. *Soil and Environmental Quality. Second Edition.* CRC Press, Boca Raton, London.
- Ponnamperuma, F.N. 1972. The chemistry of submerged soil. *Adv. Agron.* 24: 29–96.
- Ponnamperuma, F.N. 1985. Straw as a source of nutrients for wetland rice. *In Organic Matter and Rice. International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines.* pp. 311–328.
- Reicosky, D.C. and D.W. Ancher. 2007. Moldboard plow tillage depth and short-time carbon dioxide release. *Soil and Tillage Res.* 94: 109–121.
- Romesser, J.A., R.S. Wolfe, F. Mayer, E. Spiess, and A. Walther-Mauruschal. 1979. *Methanogenium*, a genus of marine methanogenic bacteria, and characterization of *Methanogenium marisnigri* sp. *Arch. of Microbiol.* 121: 147–153.
- Sass, R.L. and R.J. Cicerone. 1999. Photosynthate allocations in rice plants: food production or atmospheric methane. <http://www.pnas.org/cgi/content/99/19/11993>.
- Schutz, H., A. Holzapfel-Pschorn, R. Conrad, H. Rennenberg, and W. Seiler. 1989. A 3-year continuous record on the influence of daytime season and fertilizer treatment on methane emission rate from an Italian rice paddy field. *J. Geophys. Res.* 94: 16405–16416.
- Schutz, H., W. Seiler, and H. Rennenberg. 1990. Soil and land use related sources and sinks of methane (CH₄) in the context of the global methane budget. *In A.F. Bouwman (Ed.). Soils and the Greenhouse Effects.* John Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore. pp. 269–285.
- Seiler, W., A. Holzapfel-Pschorn, R. Conrad, and D. Scharffe. 1984. Methane emission from rice paddies. *J. Atmos. Chem.* 1: 241–268.
- Setyanto, P. 2004. Mitigasi gas metan dari lahan sawah. *Dalam: Agus, F., A. Adimihardja, S. Hardjowigeno, A.M. Fagi, dan W. Hartatik (Ed.). Tanah Sawah dan Teknologi Pengelolannya.* Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor. hlm. 287–303.
- Setyanto, P. and R. Abubakar. 2006. Evaluation of methane emission and potential mitigation from flooded rice field. *J. Litbang Pert.* 25(4): 139–148.
- Setyanto, P., Mulyadi, dan Z. Zaini. 1997. Emisi gas N₂O dari beberapa sumber pupuk nitrogen di lahan sawah tadah hujan. *Penelitian Pertanian Tanaman Pangan* 16(1): 14–18.
- Setyanto, P., Suharsih, A. Wihardjaka, dan A.K. Makarim. 1999. Pengaruh pemberian pupuk anorganik terhadap emisi gas metan pada lahan sawah. *Risalah Seminar Hasil Penelitian Emisi Gas Rumah Kaca dan Peningkatan Produktivitas Padi di Lahan Sawah.* Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan, Bogor. hlm. 36–43.
- Suharsih, P. Setyanto, dan A.K. Makarim. 1999. Emisi gas metan dari lahan sawah akibat pengaturan air tanaman padi. *Risalah Seminar Hasil Penelitian Emisi Gas Rumah Kaca dan Peningkatan Produktivitas Padi di Lahan Sawah.* Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan, Bogor. hlm. 54–61.
- Suharsih, P. Setyanto, dan A.K. Makarim. 2001. Pengaruh pengelolaan air terhadap emisi gas CH₄ pada lahan sawah di Jakenan, Jawa Tengah. *Prosiding Seminar Nasional Budidaya Tanaman Pangan Berwawasan Lingkungan.* Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan, Bogor. hlm. 61–66.
- Suharsih, T. Soepiawati, dan A.K. Makarim. 2002. Pengaruh cara pengolahan tanah dan pengaturan air terhadap emisi gas metan pada lahan sawah irigasi. *Prosiding Seminar Nasional Sistem Produksi Tanaman Pangan Berwawasan Lingkungan.* Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan, Bogor. hlm. 59–64.
- Vogels, G.D., J.T. Keltjens, and C. Vander Drift. 1988. Biochemistry of methane production. pp. 707–770. *In A.J.B Zehnder, (Ed.). Biology of Anaerobic Organisms.* John Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore.
- Watanabe, I. and P.A. Roger. 1985. Ecology of flooded rice fields. *In Wetland Soils: Characterization, Classification, and Utilization.* International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines. pp. 229–243.
- Whalen, S.C. 2005. Biogeochemistry of methane exchange between natural wetlands and the atmosphere. *Environm. Engin. Sci.* 22(1): 73–92.
- Wihardjaka, A. 2007. Methane emissions from some rice cultivars in rainfed rice field. *Jurnal Biologi Indonesia* 4(3): 143–152.
- Wihardjaka, A., P. Setyanto, dan A.K. Makarim. 1999a. Pengaruh penggunaan bahan organik terhadap hasil padi dan emisi gas metan pada lahan sawah. *Risalah Seminar Hasil Penelitian Emisi Gas Rumah Kaca dan Peningkatan Produktivitas Padi di Lahan Sawah.* Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan, Bogor. hlm. 44–53.
- Wihardjaka, A., P. Setyanto, dan A.K. Makarim. 1999b. Pengaruh beberapa varietas padi terhadap emisi gas metan pada lahan sawah. *Risalah Seminar Hasil Penelitian Emisi Gas Rumah Kaca dan Peningkatan Produktivitas Padi di Lahan Sawah.* Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan, Bogor. hlm. 62–71.
- Wihardjaka, A., S.D. Tandjung, B.H. Sunarminto, and E. Sugiharto. 2012. Methane emission from direct seeded rice under the influences of rice straw and nitrification inhibitor. *Indones. J. Agric. Sci.* 13(1): 1–11.
- Yagi, K. and K. Minami. 1990. Effect of organic matter application of methane emission from some Japanese paddy fields. *Soil Sci. Plant Nutr.* 36: 599–610.
- Yagi, K., K. Minami, and G.R. Breitenbeck. 1990. Emission and production of methane from paddy fields. *Transactions of the 14th International Congress of Soil Science. Vol. II. International Society of Soil Science, Kyoto.* pp. 238–243.
- Zeikus, J.G. 1977. The biology of methanogenic bacteria. *Bacteriol. Rev.* 41(2): 514–541.