

**EMISI GAS RUMAH KACA DAN HASIL PADI DARI PERLAKUAN
ALTERNATE WETTING AND DRYING DI LAHAN SAWAH
TADAH HUJAN**

Ali Pramono, Terry Ayu Adriani dan Prihasto Setyanto

Balai Penelitian Lingkungan Pertanian
Jln Raya Jakenan-Jaken Km 5 Pati-Jawa Tengah,
Email: ali_pramono@yahoo.com

ABSTRAK

Budidaya padi di lahan sawah merupakan salah satu sumber emisi gas rumah kaca terutama CH_4 . Pengelolaan air di lahan sawah dapat menurunkan emisi gas rumah kaca, salah satu diantaranya adalah dengan pengaturan cara pemberian air. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pengaturan air pada lahan sawah tadah hujan terhadap emisi gas rumah kaca dan hasil gabah. Penelitian dilaksanakan pada musim tanam gogo rancuh 2013 di lahan sawah tadah hujan, Jakenan-Pati, Jawa Tengah. Penelitian menggunakan rancangan acak kelompok dengan 3 perlakuan yaitu 1) Pengairan tergenang secara terus menerus (continuous flooding/CF), 2) Pengairan berselang (Alternate Wetting and Drying/AWD 25 cm), 3) Alternate Wetting and Drying site specific (AWDS), yaitu 2 kali pengeringan dengan interval 7 hari. Setiap perlakuan diulang 3 kali. Parameter yang diamati meliputi fluks GRK (CH_4 dan N_2O), tinggi muka air pH dan Eh, hasil dan komponen hasil padi. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pengaturan air dapat mengurangi emisi gas rumah kaca tanpa mengurangi hasil padi di lahan sawah tadah hujan. Perlakuan AWD dan AWDS dapat menurunkan emisi gas CH_4 masing-masing sebesar 38,6% dan 27,6% dibandingkan dengan perlakuan tergenang, namun tidak berbeda nyata. Hasil gabah tertinggi diperoleh dengan perlakuan AWD yaitu sebesar 6,94 ton GKG ha^{-1} .

Kata Kunci : Emisi gas rumah kaca, hasil padi, lahan sawah tadah hujan, pengaturan air

ABSTRACT

Rice cultivation in paddy fields are a source of greenhouse gas emissions mainly CH_4 . Land management can reduce greenhouse gas emissions, one of which is the setting of water. The aims of study is to determine the effect of water management in rainfed lowland area on greenhouse gas emissions and grain yield. The research was conducted on wet season in 2013 located in rainfed areas, Jakenan-Pati, Central Java. The study used a randomized block design with 3 treatments: 1) Continuous flooding / CF, 2) Alternate Wetting and Drying / AWD 25 cm, 3) Alternate Wetting and Drying 2 times at intervals of drying 7 days (AWD site specific / AWDS). Each treatment was replicated 3 times. The parameters

observed flux of GHGs (CH_4 and N_2O), daily water level, pH and Eh, yield and components of rice. These results indicated that water management can reduce greenhouse gas emissions without reducing rice yields in rainfed areas. AWD and AWDS treatments can reduce emissions of CH_4 respectively by 38.6% and 27.6% compared to the CF, but not significant. The highest of grain yield was obtained by AWD treatment 6.94 ton ha^{-1} .

Keywords: Greenhouse gas emissions, rice yields, rainfed lowland areas, water management

PENDAHULUAN

Tanaman padi memegang peran penting dalam pelepasan gas CH_4 dari lahan sawah. Kurang lebih 90% CH_4 yang dilepas dari lahan sawah ke atmosfer dipancarkan melalui tanaman dan sisanya melalui gelembung air (*ebullition*). Ruang udara pada pembuluh aerenkima yang terdapat pada daun, batang dan akar yang berkembang dengan baik menyebabkan pertukaran gas pada tanah tergenang (anaerobik) berlangsung cepat. Pembuluh aerenkima bertindak sebagai cerobong (*chimney*) untuk lepasnya CH_4 ke atmosfer (Jayadeva *et al.*, 2009). Upaya mitigasi terhadap emisi CH_4 dapat dilakukan melalui teknik budidaya dan penggunaan varietas rendah emisi CH_4 .

Salah satu cara menurunkan emisi GRK terutama CH_4 , diantaranya adalah dengan pengaturan air. Air merupakan kebutuhan utama dalam budidaya tanaman padi, namun tidak semua fase pertumbuhan padi membutuhkan air yang berlimpah. Adakalanya padi membutuhkan air dalam jumlah yang banyak, yaitu pada saat fase pembentukan anakan dan pengisian bulir malai, dan pada saat tertentu tanah dibiarkan dalam kondisi macak-macak untuk menciptakan kondisi kaya oksigen sehingga akar dapat berespirasi dan mikroorganisme penyubur tanah dapat beraktivitas meningkatkan kesuburan tanah. Pengairan berselang menurunkan emisi CH_4 dan telah diimplementasikan di beberapa negara, diantaranya adalah Cina, India dan Jepang (Richards and Sander, 2014).

Pada kondisi tergenang emisi gas CH_4 lebih tinggi daripada kondisi kering. Hal ini disebabkan kondisi tergenang merupakan kondisi yang ideal untuk mikroorganisme metanogen dalam melakukan aktivitas metabolismenya untuk menghasilkan gas CH_4 . Penggenangan sawah secara terus-menerus biasa dilakukan oleh petani padahal tanaman padi tidak selamanya membutuhkan air pada kondisi tergenang selama proses pertumbuhannya. Upaya menekan besarnya emisi gas CH_4 dari sistem pengairan selain dapat menurunkan emisi gas CH_4 juga dapat menghemat penggunaan air yang berlebihan.

Pada ekosistem lahan tadah hujan, petani biasanya menanam padi pada musim tanam pertama (disebut padi gogo rancah) dan padi musim tanam kedua (padi walik jerami). Padi gogo rancah merupakan istilah

sistem tanam benih padi secara langsung pada kondisi kering, sedangkan padi walik jerami dengan cara tanam pindah. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh pengaturan air di lahan tadah hujan terhadap emisi gas rumah kaca dan hasil padi gogo ranchah.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Kebun Percobaan Balingtan Jaken-Pati, Jawa Tengah ($6^{\circ}46'39,7''S$ dan $111^{\circ}11'53,0''E$) pada musim tanam gogo ranchah 2013 (bulan Oktober 2013-Mei 2014). Berdasarkan klasifikasi tanah, lokasi penelitian berjenis tanah Aeric Endoaquepts, dengan karakteristik lapisan olah mempunyai pH 5,7, tekstur pasir 34 %, debu 56 %, liat 10 %, C organik 0,18 %, N total 0,05 %, rasio C/N 3,39, P total 108,3 ppm, K total 319,1 ppm, KTK 8,69 cmol kg⁻¹, mikro elemen Fe 0,06 %, Ca 0,51 % dan Mg 0,04 %.

Perlakuan yang diterapkan adalah 1) Pengairan tergenang secara terus menerus (*continuous flooding/CF*), 2) Pengairan berselang (*Alternate Wetting and Drying/AWD* 25 cm, 3) *Alternate Wetting and Drying* 2 kali dengan interval pengeringan 7 hari (*AWD site specific/AWDS*). Varietas padi yang digunakan adalah Cisadane, yang termasuk padi dengan umur panjang. Rancangan percobaan menggunakan rancangan acak kelompok dengan 3 ulangan. Plot percobaan berukuran 5 m x 7 m. Pematang plot dilapisi dengan plastik sedalam 40 cm. Pengolahan tanah dilakukan secara sempurna. Penanaman dilakukan dengan cara tanam tugal dengan 5-10 benih per lubang. Jarak tanam yang digunakan 20 x 20 cm. Pupuk organik diberikan dengan takaran 5 ton ha⁻¹ diaplikasikan pada saat/setelah pengolahan tanah. Dosis pupuk anorganik yang digunakan adalah 120 kg N ha⁻¹, P pada takaran 60 kg P₂O₅ ha⁻¹, dan K dengan takaran 90 kg K₂O ha⁻¹. Pemupukan dilakukan 3 kali yaitu pertama pada 21 hari setelah tumbuh (HST), terdiri dari ¼ N, seluruh P, dan ½ K, pemupukan kedua pada 41 HST terdiri ½ N dan ½ K dan ketiga pada 56 HST terdiri dari ¼ N. Irigasi dilakukan dengan menggunakan air embung yang disalurkan melalui pipa PVC. Pencegahan serangan OPT dilakukan dengan penyemprotan pestisida apabila ada serangan hama dan penyakit tanaman.

Parameter yang diamati meliputi fluks GRK (CH₄ dan N₂O), tinggi muka air dan curah hujan harian, pH dan Eh, hasil dan komponen hasil padi. Pengukuran fluks GRK pada lahan sawah dilakukan seminggu sekali. Pengambilan sampel gas CH₄ dan N₂O dilakukan secara manual menggunakan boks berukuran 50 cm x 50 cm x 100 cm. Sampel diambil dengan menggunakan jarum suntik volume 10 ml dengan interval waktu pengambilan setiap menit ke-5, 10, 15, 20 dan 25. Sampel GRK dianalisis dengan menggunakan gas kromatografi, kemudian dihitung menjadi fluks atau emisi GRK dengan menggunakan rumus sebagai berikut (IAEA, 1993) :

$$E = \frac{dc}{dt} \times \frac{Vch}{Ach} \times \frac{mW}{mV} \times \frac{273,2}{273,2 + T}$$

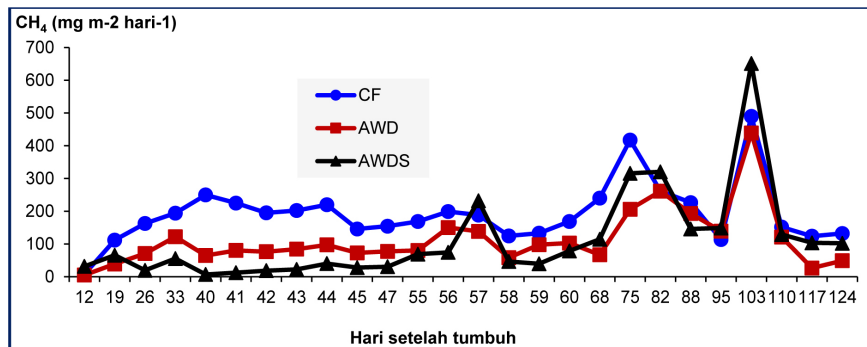
Keterangan :

E : Fluks gas $\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O}$ ($\text{mg m}^{-2} \text{ hari}^{-1}$)
dc/dt : Perbedaan konsentrasi $\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O}$ per waktu (ppm menit^{-1})
Vch : Volume boks (m^3)
Ach : Luas boks (m^2)
mW : Berat molekul $\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O}$ (g)
mV : Volume molekul $\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O}$ (22,4 l)
T : Temperatur rata-rata selama pengambilan contoh gas ($^{\circ}\text{C}$)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Fluks dan Emisi GRK

Pengaturan kondisi air sangat menentukan tinggi rendahnya fluks CH_4 . Pada kondisi tergenang (anaerobik), gas CH_4 dihasilkan optimum. Gambar 1 menunjukkan bahwa fluks CH_4 pada perlakuan tergenang (CF) hampir selalu lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan AWD. Pada semua perlakuan, fluks CH_4 meningkat terutama pada saat menjelang fase primordia. Setelah berbunga, fluks CH_4 mengalami penurunan dan kembali naik dan fluks CH_4 mencapai puncak pada 103 HST. Fluks tertinggi terdapat pada perlakuan AWDS yaitu sebesar $651 \text{ mg m}^{-2} \text{ hari}^{-1}$, diikuti oleh perlakuan tergenang sebesar $490 \text{ mg m}^{-2} \text{ hari}^{-1}$ dan AWD sebesar $439 \text{ mg m}^{-2} \text{ hari}^{-1}$. Sepuluh hari menjelang panen, lahan dikeringkan sehingga tinggi muka air berada di bawah permukaan tanah. Fluks CH_4 menurun pada masa pemasakan biji, hal ini disebabkan karena eksudat akar semakin berkurang dengan bertambahnya umur padi dan pengeringan membuat kondisi perakaran menjadi oksidatif.

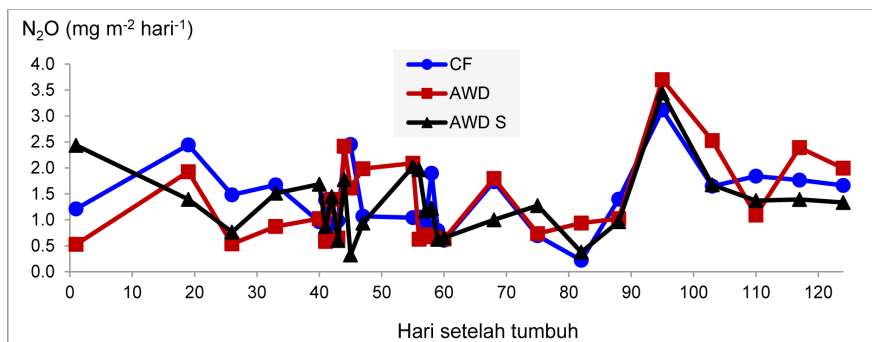


Gambar 1. Fluks CH_4 pada berbagai perlakuan pengaturan air pada MT Gogo Rancah 2013

Dinamika fluks N_2O dari berbagai perlakuan pengaturan air terlihat pada Gambar 2. Nampak bahwa antar perlakuan menunjukkan pola yang hampir sama. Perlakuan AWD dan AWDS menyebabkan kondisi basah dan kering, sehingga

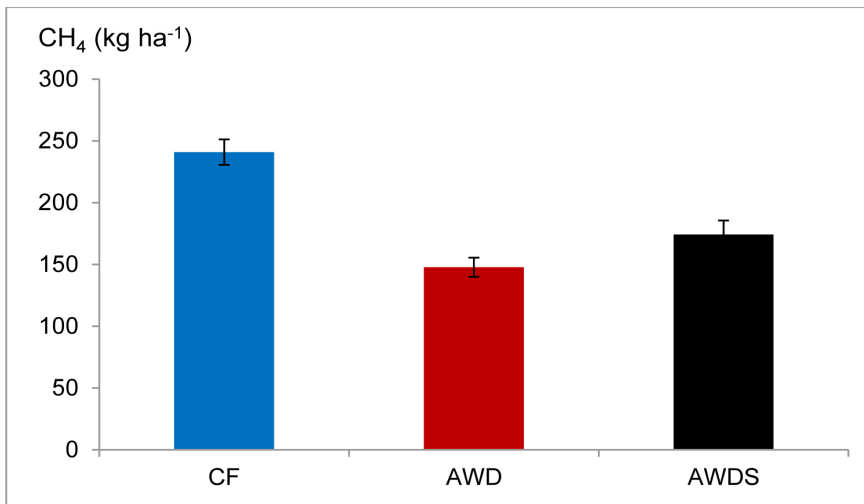
pembentukan N_2O lebih besar. Pemupukan nitrogen pada 21, 41 dan 56 HST menyebabkan kenaikan fluks N_2O . Setelah pemupukan pertama, fluks terlihat turun kemudian naik lagi pada 32 HST pada semua perlakuan. Pada 41 HST semua perlakuan digenangi kemudian dilakukan pemupukan II, pengamatan fluks diamati secara intensif setiap hari. Nampak bahwa setelah digenangi, fluks N_2O turun, dan kemudian meningkat pada 2 dan 4 hari setelah pemupukan, namun berfluktuasi. Hal yang sama juga terjadi pada pemupukan III (setelah 56 HST). Fluks N_2O mencapai puncaknya pada 95 HST, tertinggi terdapat pada perlakuan AWD yaitu sebesar $3,7 \text{ mg m}^{-2} \text{ hari}^{-1}$. Hal ini berkebalikan dengan fluks CH_4 , ketika kondisi oksidatif maka fluks CH_4 menurun dan N_2O meningkat drastis. Hal ini disebabkan karena pengaruh kondisi air, dimana pada perlakuan AWD dan AWDS tinggi muka airnya menurun dan Eh nya mengalami kenaikan.

N_2O dihasilkan dari proses nitrifikasi dan denitrifikasi (Davidson *et al.*, 1986) dan dipengaruhi oleh pH, kelembaban tanah, dan ketersediaan substrat C dan N (Law *et al.*, 2011). Kedua proses nitrifikasi dan denitrifikasi dapat terjadi secara bersamaan dalam tanah secara aerobik dan anaerobik dengan kadar air tanah antara 60-80% ruang pori terisi air (*water-filled pore space/WFPS*), dan denitrifikasi meningkat ketika WFPS melebihi 80% (Davidson *et al.*, 1986). Selanjutnya, emisi N_2O dapat dirangsang oleh aplikasi pupuk N dan amandemen tanah organik (Aulakh *et al.*, 1984; Wang *et al.*, 2012). Dekomposisi bahan organik menghasilkan senyawa C yang labil (Chatterjee *et al.*, 2008) yang meningkatkan denitrifikasi dalam tanah dan menghasilkan gas N_2O (Perez *et al.*, 2010).



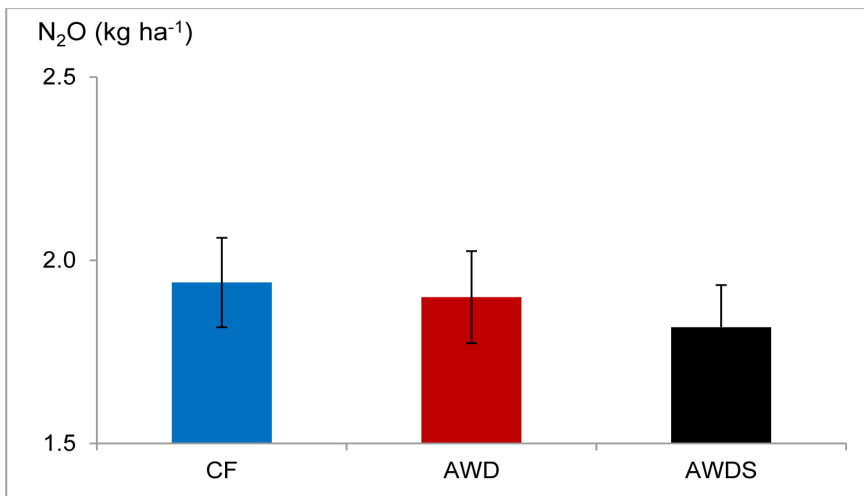
Gambar 2. Fluks N_2O pada berbagai perlakuan pengaturan air pada MT Gogo Rancah 2013

Emisi CH_4 tertinggi terdapat pada perlakuan tergenang yaitu sebesar $240,9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ musim}^{-1}$, sedangkan perlakuan AWD dan AWDS masing-masing sebesar $147,8$ dan $174,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ musim}^{-1}$ (Gambar 3). Perlakuan AWD dan AWDS menurunkan emisi CH_4 masing-masing sebesar $38,6\%$ dan $27,6\%$ secara signifikan. Hal ini berarti bahwa pengaturan air irigasi pada lahan sawah sangat mempengaruhi emisi CH_4 . Dengan adanya periode kering pada fase anakan aktif dan sebelum fase primordia, kondisi oksidatif di sekitar perakaran menyebabkan pembentukan CH_4 relatif sedikit dibandingkan pada kondisi reduktif.



Gambar 3. Emisi CH₄ pada berbagai perlakuan pengaturan air pada MT Gogo Rancah 2013

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa ketiga perlakuan mengemisi N₂O yang hampir sama, hal ini berdasarkan baik dari pola fluks maupun besarnya emisi. Perlakuan tergenang memberikan nilai emisi N₂O sebesar 1,94 kg ha⁻¹ musim⁻¹, sedangkan perlakuan AWD dan AWDS masing-masing sebesar 1,89 dan 1,82 kg ha⁻¹ musim⁻¹.



Gambar 4. Emisi N₂O pada berbagai perlakuan pengaturan air pada MT Gogo Rancah 2013

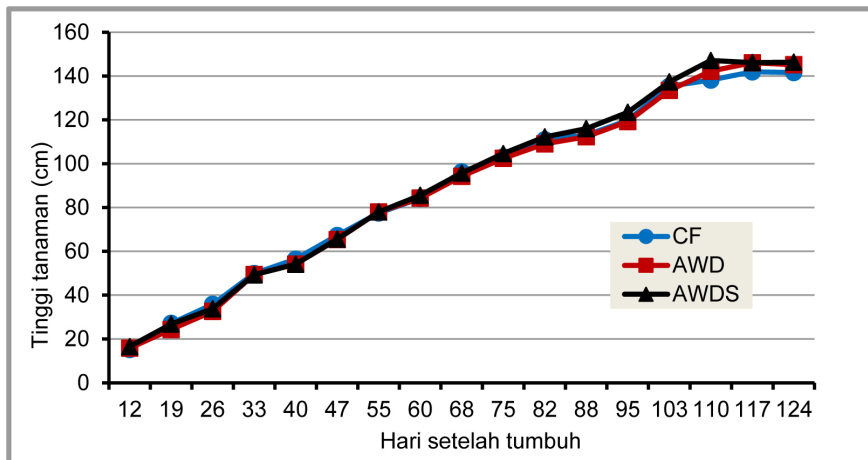
Hasil dan Komponen Hasil

Hasil gabah kering giling (GKG) tertinggi diperoleh dengan pengairan AWD yaitu sebesar 6,94 ton ha⁻¹, diikuti oleh pengairan tergenang dan AWDS masing-masing sebesar 6,92 dan 6,46 ton ha⁻¹, namun tidak berbeda nyata. Perlakuan tergenang menghasilkan jumlah biji per malai dan persentase gabah isi tertinggi, namun jumlah malai per rumpunnya paling rendah (Tabel 1). Demikian juga berat 1000 butir biji, perlakuan tergenang paling tinggi diantara perlakuan lainnya. Berat jerami segar tertinggi diperoleh pada perlakuan AWD, diikuti AWDS dan tergenang, sehingga indeks biomas (jumlah gabah/biomasa) tertinggi pada perlakuan tergenang. Ketiga perlakuan menunjukkan penampilan tanaman yang hampir seragam, hal ini ditunjukkan oleh tinggi tanaman dan jumlah anakan yang hampir tidak berbeda nyata (Gambar 5 dan 6).

Tabel 1. Hasil dan komponen hasil

Perlakuan	Malai per rumpun	Biji per malai	Gabah isi (%)	Berat jerami segar (Ton ha ⁻¹)	Berat 1000 butir (Gr)	GKG (Ton ha ⁻¹)	Indeks biomas
CF	18,1 a	67,9 a	69,8 a	9,2 a	29,3 a	6,9 a	0,48
AWD	19,0 a	64,3 a	63,4 a	10,5 a	28,8 a	6,9 a	0,44
AWDS	18,8 a	67,9 a	65,8 a	10,2 a	29,2 a	6,5 a	0,44

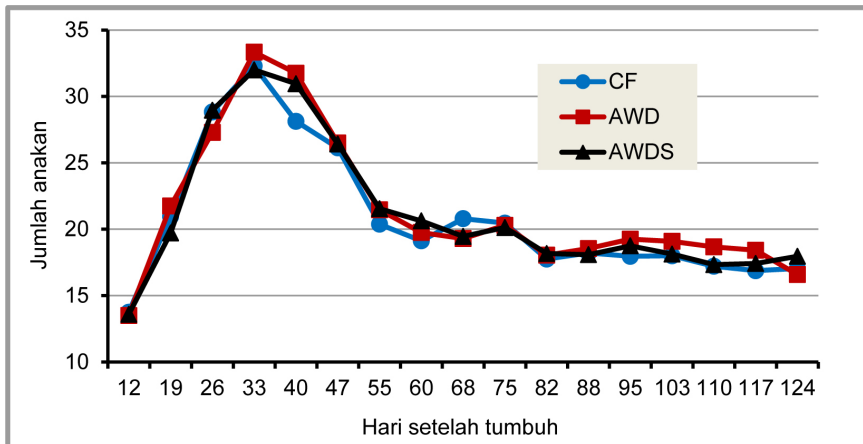
Keterangan : Angka yang diikuti oleh huruf yang sama dalam kolom yang sama berarti berbeda tidak nyata pada taraf uji 5 %



Gambar 5. Tinggi tanaman pada berbagai perlakuan pengaturan air pada MT Gogo Rancah 2013

Hasil perhitungan GWP menunjukkan bahwa perlakuan pengairan tergenang menghasilkan *global potential warming* (GWP) tertinggi yaitu sebesar 6596 kg/ha, diikuti oleh perlakuan AWDS dan AWD masing-masing sebesar 4254 dan

4896 kg/ha (Tabel 2). Penurunan GWP dengan perlakuan AWD sebesar 35%, sedangkan perlakuan AWDS menurunkan GWP sebesar 26% dibandingkan dengan perlakuan pengairan tergenang. Indeks emisi menunjukkan besarnya emisi gas rumah kaca (dinyatakan dalam ton) yang dilepaskan dalam menghasilkan 1 ton gabah. Indeks emisi terendah dicapai dengan perlakuan AWD, diikuti perlakuan AWDS dan paling tinggi terdapat pada perlakuan tergenang. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan AWD paling rendah dalam melepaskan emisi GRK dan tertinggi perolehan hasil gabahnya.



Gambar 6. Jumlah anakan pada berbagai perlakuan pengaturan air pada MT Gogo Rancah 2013

Tabel 2. GWP pada berbagai perlakuan pengaturan air pada MT Gogo Rancah 2013

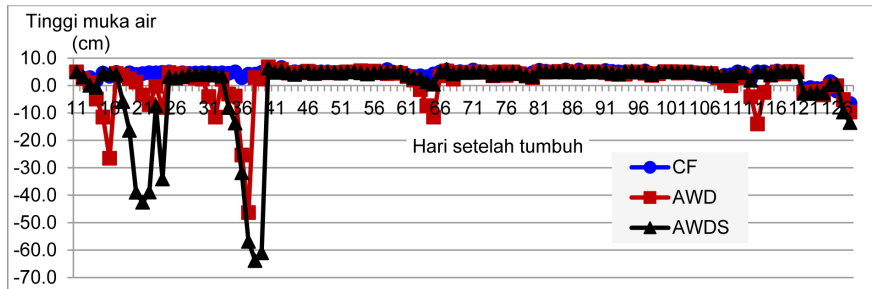
Perlakuan	CH ₄	N ₂ O	GWP (CO ₂ -e) Kg ha ⁻¹	Hasil GKG	Indeks Emisi
CF	240,9 a	1,94 a	6596,7	6920	0,95
AWD	147,8 a	1,89 a	4254,4	6940	0,61
AWDS	174,3 a	1,82 a	4896,2	6460	0,76

Keterangan : Angka yang diikuti oleh huruf yang sama dalam kolom yang sama berarti berbeda tidak nyata pada taraf uji 5 %

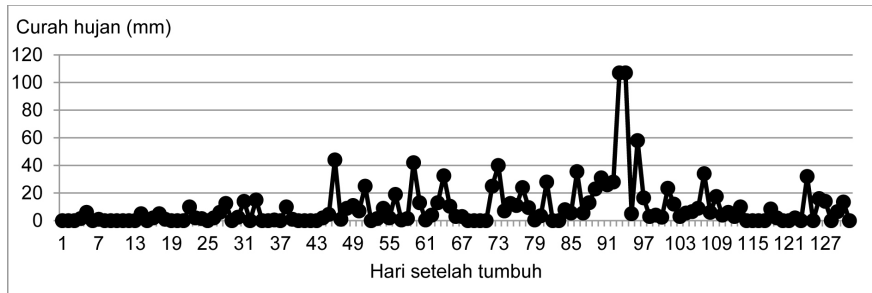
Tinggi Muka Air

Hasil pengamatan terhadap tinggi muka air menunjukkan bahwa pada 10 HST semua plot mendapatkan pengairan yang cukup dan ketinggian air diatur 5 cm dari permukaan tanah. Pada perlakuan tergenang (CF) tinggi muka air dipelihara 5 cm hingga satu minggu sebelum panen. Perlakuan AWD dan AWDS menunjukkan penurunan muka air permukaan, karena pada awal penelitian belum terjadi hujan (Gambar 7). Sumber air di lahan sawah tadah hujan sepenuhnya tergantung pada

air hujan. Frekuensi curah hujan mulai meningkat pada awal Desember 2013 atau sekitar 35 HST. Untuk mencukupi kebutuhan air pada tanaman di awal musim tanam pada penelitian ini dilakukan pengairan yang berasal dari air embung (*water reservoir*). Sebelum 21 HST kondisi tinggi permukaan air mulai menurun, dan pada 21 HST diairi hingga 5 cm pada semua plot penelitian, kemudian dilakukan pemupukan I. Setelah 21 HST, tinggi muka air pada plot AWD dan AWDS menurun lagi dan pada 41 HST diairi lagi hingga 5 cm untuk pemupukan II. Setelah pemupukan II, frekuensi hujan mulai meningkat dan mencapai puncaknya pada bulan Januari. Selama masa tanam padi Gogo Rancah ini (Nopember 2013-Pebruari 2014), curah hujan tercatat 1215 mm (Gambar 8) sehingga tinggi muka air permukaan relatif sama pada semua perlakuan.



Gambar 7. Tinggi muka air pada berbagai perlakuan pengaturan air pada MT Gogo Rancah 2013

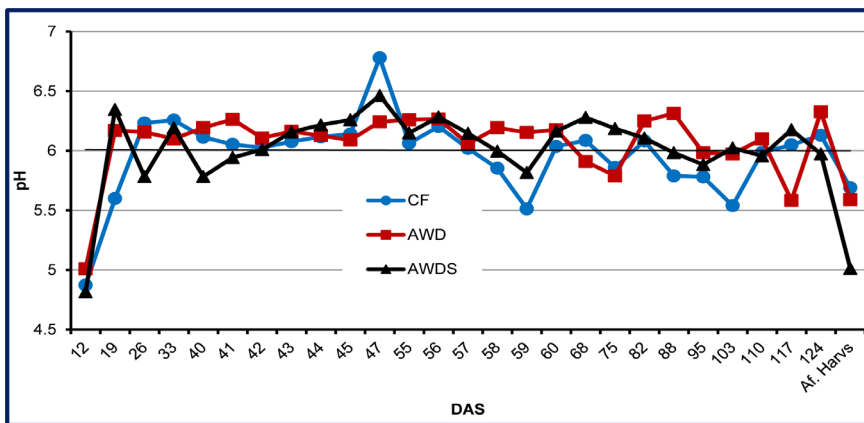


Gambar 8. Curah hujan harian selama MT Gogo Rancah 2013 (Oktober 2013-Maret 2014)

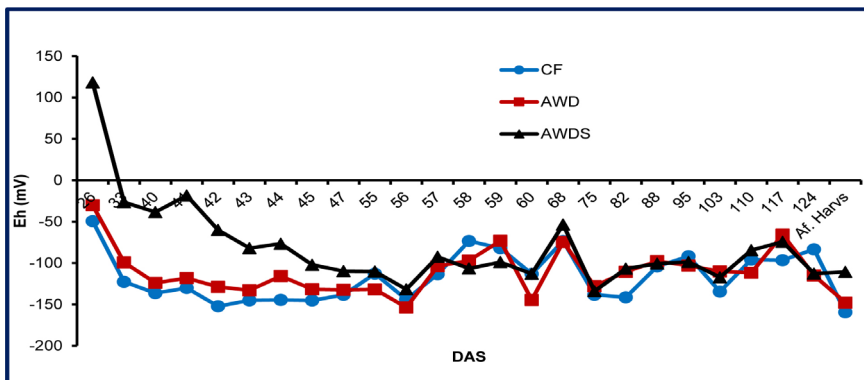
pH dan Eh

Pengamatan pH dan Eh bersamaan pada waktu sampling. Hasil pengukuran pH menunjukkan bahwa pada awal pengamatan pH berkisar 5. Semakin tinggi kadar air tanah, pH semakin meningkat. Hal ini disebabkan karena sifat tanah di lokasi penelitian yang memiliki pH rendah pada kondisi kering, dan tinggi bila tergenang. Sejak tanaman berumur 41 HST (setelah pemupukan II), kondisi tanah tergenang, pH tanah naik dan mencapai $> 6-6,5$ (Gambar 9). Kondisi tanah

dengan pH sekitar 6 dan bersifat reduktif yang ditunjukkan dengan nilai Eh hingga -150 mV (Gambar 10). Kondisi ini sangat optimum untuk pembentukan CH_4 oleh metanogen. Pada saat kondisi anakan maksimum sampai primordia bunga, tanaman banyak menghasilkan eksudat akar yang terdiri dari karbohidrat dan asam-asam organik dan kemudian menurun hingga fase pemasakan. Diantara asam-asam organik itu adalah asam-asam malat, tartrat, suksinat, sitrat dan laktat (Aulakh *et al.*, 2001). Jika hal ini berlangsung secara anaerob (ada genangan air) maka proses degradasi bahan organik menjadi tidak sempurna sehingga menghasilkan gas CH_4 . Pada masa menjelang panen, genangan air mulai dikeringkan untuk mempercepat pemasakan gabah, yaitu pada saat tanaman berumur 119-126 HST. Akibatnya, pH tanah menurun drastis dan gas N_2O terlepas lebih banyak. Hal yang sama juga dilaporkan oleh Ariani dan Setyanto (2010).



Gambar 9. Pengukuran pH pada berbagai perlakuan pengaturan air pada MT Gogo Rancah 2013



Gambar 10. Pengukuran Eh pada berbagai perlakuan pengaturan air pada MT Gogo Rancah 2013

KESIMPULAN

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa perlakuan AWD dapat mengurangi emisi gas rumah kaca tanpa mengurangi hasil padi di lahan sawah tadah hujan. Perlakuan AWD dan AWDS dapat menurunkan emisi gas CH₄ masing-masing sebesar 38,6% dan 27,6% dibandingkan dengan perlakuan tergenang, namun tidak berbeda nyata. Hasil gabah tertinggi diperoleh dengan perlakuan AWD yaitu sebesar 6,94 ton GKG ha⁻¹.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini didanai oleh Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan melalui proyek penelitian internasional “Technology Development for Circulatory Food Production Systems Responsive to Climate Change: Development of Mitigation Option for Greenhouse Gas Emissions from Agricultural Lands in Asia (MIRSA-2).”

DAFTAR PUSTAKA

- Ariani M dan P Setyanto. 2010. Pengaruh Pemberian Jerami dan Pupuk Kandang terhadap Emisi N₂O dan Hasil Padi pada Sistem Integrasi Tanaman-Ternak. Jurnal Penelitian Pertanian Tanaman Pangan, Vol. 29 No.1:36-41.
- Aulakh MS, Rennie DA, Paul EA. 1984. Gaseous Nitrogen Losses from Soil Under Zero-Till as Compared with Conventional-Till Management Systems. Environ Qual 13:130–136.
- Aulakh MS, R Wassmann, C Bueno, J Kreuzweiser and H Rennenberg. 2001. Characterization of Root Exudates at Different Growth Stages of Ten Rice (*Oryza sativa*) Cultivars, Plant Biology, Vol 3 Issue 2. p.139-148. DOI: 10.1055/s-2001-12905.
- Chatterjee A, Vance GF, Pendall E, Stahl PD. 2008 Timber Harvesting Alters Soil Carbon Mineralization and Microbial Community Structure in Coniferous Forests. Soil Biol Biochem 40:1901–1907.
- Davidson EA, Swank WT, Perry TO. 1986. Distinguishing between Nitrification and Denitrification Sources of Gaseous Nitrogen-Production in Soil. Appl Environ Microbiol 52:1280–1286.
- IAEA. 1993. Manual on Measurement of Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agricultural, Vienna, Austria. International Atomic Energy Agency.
- Jayadeva HM, Prabhakara Setty TK, Gowda RC, Devendra R, Mallikarjun GB, Bandi AG. 2009. Methane Emission as Influenced by Different Crop Establishment Techniques and Organic Manures. – *Agricultural Science Digest* 29(4): 241-245.

- Law Y, Lant P, Yuan Z. 2011. The Effect of pH on N₂O Production under Aerobic Conditions in a Partial Nitrification System. *Water Res* 45:5934–5944.
- Perez CA, Carmona MR, Farina JM, Armesto JJ. 2010. Effects of Nitrate and Labile Carbon on Denitrification of Southern Temperate Forest Soils. *Chil J Agric Res* 70:251–258.
- Richards M, and Sander BO. 2014. Alternate wetting and drying in irrigated rice. CCAFS Info Note. CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS). Copenhagen, Denmark.
- Wang J, Pan X, Liu Y, Zhang X, Xiong Z. 2012. Effects of Biochar Amendment in Two Soils on Greenhouse Gas Emissions and Crop Production. *Plant Soil* 360:287–298.