© 2026 Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP
JURNAL ILMU LINGKUNGAN
Volume 24 Issue 6 (2026) : 1438-1447 *ISSN 1829-8907*

Emisi Gas Metana (CH_4) pada Budidaya Padi Sistem FONi dengan Variasi Tinggi Muka Air dan Jenis Pupuk

Ananda Azaria Khairunnisa[1], Chusnul Arif[1,2*], Satyanto Krido Saptomo[1,2], dan Jihan Nur Azizah[1,2]

[1]Program Studi Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik dan Teknologi, IPB University, Bogor, Indonesia
[2]Divisi Rekayasa Infrastruktur Berkelanjutan, Fakultas Teknik dan Teknologi, IPB University, Bogor, Indonesia; email: chusnul_arif@apps.ipb.ac.id

ABSTRAK

Budidaya padi sawah merupakan salah satu sumber emisi metana (CH_4) akibat dekomposisi bahan organik pada kondisi anaerob. Pengelolaan tinggi muka air dan pemupukan berperan penting dalam menentukan kondisi tanah yang memengaruhi pembentukan dan pelepasan CH_4. Sistem Fertigator Otomatis Nirdaya (FONi) memungkinkan tinggi muka air dikelola secara otomatis tanpa memerlukan energi eksternal, sehingga berpotensi mendukung pengelolaan air yang lebih efisien sekaligus menciptakan kondisi tanah yang dapat menekan emisi CH_4. Penelitian ini bertujuan menganalisis emisi CH_4 pada berbagai tinggi muka air dan jenis pupuk serta menentukan kombinasi perlakuan terbaik untuk mitigasi emisi CH_4 tanpa mengurangi produktivitas tanaman secara signifikan. Penelitian dilaksanakan di Kinjiro Farm, Kota Bogor, pada Februari–Juni 2026 dengan menerapkan empat pengelolaan air, yaitu tergenang (RT), basah (RB), kering (RK), dan berselang (RBe), yang dikombinasikan dengan pupuk organik dan anorganik. Kondisi media tanam dipantau secara kontinu menggunakan sensor parameter tanah yang terhubung dengan *data logger*, sedangkan sampel gas diambil menggunakan metode *closed chamber* dan dianalisis menggunakan *Gas Chromatography-Flame Ionization Detector* (GC-FID). Pengaruh tinggi muka air dan jenis pupuk terhadap emisi CH_4 dianalisis menggunakan *two-way ANOVA*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jenis pupuk memberikan pengaruh yang lebih kuat terhadap emisi CH_4 dibandingkan tinggi muka air. Emisi kumulatif tertinggi diperoleh pada kombinasi RT dengan pupuk organik sebesar 521,67 kg CH_4/ha/musim. Penerapan rezim air berselang (RBe) dan pupuk anorganik mampu menekan emisi dengan nilai terendah sebesar 180,73 kg CH_4/ha/musim. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kemampuan sistem FONi dalam mempertahankan dan mengatur tinggi muka air secara otomatis dapat dimanfaatkan untuk menerapkan rezim air berselang sebagai strategi mitigasi emisi CH_4 pada budidaya padi.

***Kata kunci*:** emisi metana, fertigator otomatis nirdaya, padi sawah, pengelolaan muka air, pupuk

ABSTRACT

Rice cultivation is a major source of methane (CH_4) emissions due to the decomposition of organic matter under anaerobic conditions. Water-level management and fertilization play important roles in determining soil conditions that influence CH_4 production and release. The Powerless Automatic Fertigator (FONi) system enables automatic water-level control without external energy input, offering the potential to improve water management efficiency while maintaining soil conditions that may suppress CH_4 emissions. This study aimed to analyze CH_4 emissions under different water levels and fertilizer types and to determine the best treatment combination for mitigating CH_4 emissions without significantly reducing crop productivity. The study was conducted at Kinjiro Farm, Bogor, Indonesia, from February to June 2026 using four water regimes: flooded (RT), wet (RB), dry (RK), and intermittent (RBe), combined with organic and inorganic fertilizers. Growing-medium conditions were continuously monitored using soil parameter sensors connected to a data logger, while gas samples were collected using the closed-chamber method and analyzed using Gas Chromatography–Flame Ionization Detection (GC-FID). The effects of water level and fertilizer type on CH_4 emissions were evaluated using two-way ANOVA. The results showed that fertilizer type had a stronger effect on CH_4 emissions than water level. The highest cumulative CH_4 emission was observed under the combination of the flooded regime (RT) and organic fertilizer, reaching 521.67 kg CH_4/ha/season. In contrast, the combination of the intermittent water regime (RBe) and inorganic fertilizer resulted in the lowest cumulative emission of 180.73 kg CH_4/ha/season. These findings demonstrate that the ability of the FONi system to automatically maintain and regulate water levels can facilitate the implementation of intermittent water regimes as a potential strategy for mitigating CH_4 emissions from rice cultivation.

***Keywords*:** methane emission, powerless automatic fertigator, rice cultivation, water management, fertilizer

Citation: Khairunnisa, A. A., Arif, C., Saptomo, S. K., dan Azizah, J. N (2026). Emisi Gas Metana (CH_4) pada Budidaya Padi Sistem FONi dengan Variasi Tinggi Muka Air dan Jenis Pupuk. Jurnal Ilmu Lingkungan, 24(6), 1438-1447, doi:10.14710/jil.24.6.1438-1447

1. PENDAHULUAN

Padi memegang peranan krusial sebagai komoditas tanaman pangan yang menjadi sumber kalori utama bagi mayoritas penduduk dunia (Yagi *et al.* 2020), dengan kawasan Asia menyumbang lebih dari 90% total produksi dan konsumsi beras global (FAO, 2004). Tidak terkecuali di Indonesia, padi menempati posisi strategis sebagai bahan pangan pokok. Tingginya permintaan beras seiring pertumbuhan penduduk mendorong intensifikasi budidaya padi sawah yang berisiko memberikan dampak signifikan terhadap lingkungan, khususnya melalui peningkatan emisi gas rumah kaca (GRK). Lahan sawah diketahui menjadi salah satu sumber emisi GRK pada sektor pertanian. Berdasarkan penelitian sebelumnya, sektor pertanian menyumbang sekitar 13,4% dari total emisi GRK nasional, di mana aktivitas pertanian bertanggung jawab atas 50% dari seluruh emisi metana antropogenik global (Vermeulen *et al.* 2012). Sebagai salah satu penyumbang terbesar dalam persentase tersebut, budidaya padi sawah pada sistem tergenang (konvensional) diketahui dapat menghasilkan besaran emisi mencapai 2.285,53 kg CO_2-eq/ha/musim (Hidayatulloh, 2025). Gas dominan yang dihasilkan dari budidaya padi ialah metana (CH_4), yang terbentuk melalui proses metanogenesis oleh mikroorganisme anaerob pada kondisi tanah tergenang dan minim oksigen (Wihardjaka dan Harsanti 2011). Metana memiliki potensi pemanasan global sekitar 28 – 36 kali lebih besar dibandingkan CO_2 dalam rentang waktu 100 tahun, sehingga keberadaannya menjadi salah satu kontributor penting terhadap pemanasan iklim jangka dekat (IPCC, 2021). Besarnya emisi metana dari lahan sawah dipengaruhi oleh sejumlah faktor, di antaranya sistem pengelolaan air, karakteristik tanah, penggunaan pupuk, varietas tanaman, serta musim tanam (Wihardjaka dan Harsanti 2021).

Upaya penurunan emisi GRK telah menjadi bagian dari komitmen Indonesia melalui *Enhanced Nationally Determined Contribution* (ENDC), yang menargetkan pengurangan emisi dari berbagai sektor termasuk sektor pertanian sebesar 0,3% (Pembengo dan Dude 2024). Di sisi lain, upaya mitigasi tidak dapat mengabaikan kebutuhan peningkatan produksi padi sebagai komoditas strategis nasional. Oleh karena itu, diperlukan teknologi budidaya yang mampu menekan emisi GRK tanpa mengurangi produktivitas tanaman. Pembentukan metana pada lahan sawah berkaitan erat dengan kondisi lingkungan tanah, terutama ketersediaan oksigen dan sumber karbon bagi mikroorganisme metanogen. Pengelolaan rezim air dapat menyebabkan perubahan kondisi aerob dan anaerob di dalam tanah. Pada kondisi tergenang, difusi oksigen ke dalam pori tanah menjadi terbatas sehingga proses metanogenesis berlangsung lebih intensif (Conrad, 2007). Sebaliknya, adanya periode pengeringan memungkinkan masuknya oksigen ke dalam tanah yang dapat mendukung proses oksidasi metana oleh bakteri metanotrof (Linquist *et al.* 2015). Selain kondisi air, ketersediaan bahan organik dari pupuk juga berkaitan dengan proses pembentukan metana. Pupuk organik dapat menjadi sumber substrat bagi mikroorganisme metanogen. Aplikasi pupuk organik padat komersial yang dilarutkan terlebih dahulu mampu menyuplai karbon organik terlarut (*Dissolved Organic Carbon*) yang bersifat labil. Fraksi DOC yang mudah di metabolisme ini dapat langsung dimanfaatkan oleh komunitas arkea metanogenik di zona perakaran tergenang, sehingga dinamika pelepasan metana (CH_4) terjadi lebih cepat dibandingkan perlakuan bahan organik padat biasa (Lu *et al.* 2000). Sedangkan pupuk anorganik umumnya mengandung karbon organik yang lebih rendah sehingga ketersediaan substrat untuk proses tersebut relatif lebih terbatas (Ramadhani *et al.* 2023).

Berbagai penelitian mengenai emisi metana pada budidaya padi telah dilakukan dengan fokus pada pengelolaan rezim air maupun pemupukan. Dari berbagai rezim air, salah satunya ialah sistem *alternate wetting and drying* (AWD) yang merupakan salah satu metode yang banyak diteliti karena berpotensi mengubah kondisi aerob dan anaerob di dalam tanah yang selanjutnya berkaitan dengan proses pembentukan metana (Chidthaisong *et al.* 2018). Pada sistem ini, air diberikan secara berselang sehingga sawah mengalami fase basah dan kering secara teratur (Budianto *et al.* 2020). Sistem AWD didasari pada konsep pengendalian rezim pengairan. Untuk skala kecil, sistem Fertigasi Otomatis Nirdaya (FONi) merupakan inovasi budidaya yang dapat mengendalikan tinggi muka air secara otomatis tanpa memerlukan energi. FONi telah diterapkan secara luas pada berbagai komoditas pertanian dengan rekam jejak peningkatan efisiensi irigasi yang signifikan. Pada budidaya hortikultura seperti terung, sistem ini terbukti mampu mengelola suplai air secara presisi dengan tingkat efisiensi aplikasi mencapai 98,9% (Fitry Hedianty *et al.* 2025). Teknologi irigasi bawah permukaan ini juga sukses diadaptasi ke dalam sistem minahortikultura terpadu, yang secara efektif mempertahankan stabilitas tinggi muka air di zona perakaran sekaligus mengoptimalkan produktivitas lahan (Valenzya, 2026). Selain itu, pengaplikasian FONi pada irigasi padi mampu meningkatkan produktivitas air hingga 2,7 kali lipat dibandingkan metode konvensional (Safitri *et al.* 2024). Keandalan sistem irigasi ini dalam mengatur ketersediaan air tanah pada dasarnya menciptakan dinamika siklus basah dan kering yang terkendali.

Kemampuan sistem FONi dalam mengatur tinggi muka air secara presisi memberikan peluang besar untuk mitigasi emisi gas rumah kaca. Beberapa studi terdahulu membuktikan bahwa pengaturan rezim air melalui irigasi evapotranspiratif secara efektif mampu menekan laju emisi metana (CH_4) pada tanaman padi (Hidayatulloh, 2025; Husaini, 2025). Meskipun demikian, kajian tersebut masih terbatas pada evaluasi pengaruh dinamika muka air secara mandiri. Di sisi lain, aplikasi pupuk organik sebagai komponen esensial kesuburan tanah diketahui menyuplai

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

substrat karbon yang rentan memicu lonjakan fluks CH_4. Oleh karena itu, penelitian yang mengkaji respons emisi metana secara komprehensif pada kombinasi variasi rezim air dan jenis pupuk dalam sistem FONi masih terbatas. Kajian ini sangat diperlukan sebagai bahan pertimbangan dalam pengembangan teknik budidaya padi yang ramah lingkungan sekaligus mendukung upaya pengurangan emisi gas rumah kaca pada sektor pertanian. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi total besaran emisi CH_4 yang dihasilkan pada setiap kombinasi perlakuan serta skenario mitigasi terbaik untuk menekan pelepasan emisi metana tanpa menurunkan produktivitas tanaman.

2. METODE PENELITIAN

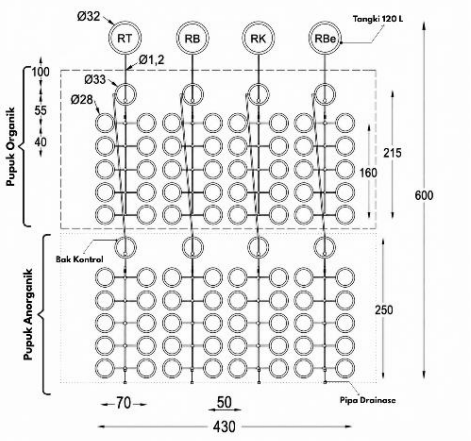
2.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada Februari - Juni 2026 di Kinjiro Farm, Hegarmanah IV, RT 01 RW 08, Kelurahan Gunung Batu, Kecamatan Bogor Barat, Kota Bogor, Jawa Barat. Sampel gas metana (CH_4) yang terkumpul selanjutnya dianalisis di Laboratorium Gas Rumah Kaca, Balai Perakitan dan Pengujian Lingkungan Pertanian, Kecamatan Jaken, Kabupaten Pati, Jawa Tengah. Alat yang digunakan berupa 80 pot berdiameter 30 x 35 cm yang disusun pada lahan 4,5 x 4 m dengan jarak tanam 30 cm. Sistem irigasi dipantau menggunakan *Automatic Weather Station* (AWS), tangki berkapasitas 120 liter, dan polybag. Pengambilan sampel gas metana dilakukan dengan metode *closed chamber* menggunakan seperangkat sungkup transparan, *base chamber, syringe* 50 ml, dan vial vakum. Bahan utama yang digunakan meliputi benih padi Sintanur, tanah sawah, dan *cocopeat,* dengan nutrisi yang berasal dari pupuk organik padat komersial (*EcoFarming*) yang diaplikasikan dalam bentuk larutan serta pupuk anorganik NPK (Mutiara 16-16-16).

2.2. Prosedur Penelitian

2.2.1. Persiapan Sistem Irigasi dan Penanaman

Penelitian menggunakan rancangan faktorial dengan 80-unit pot yang terdiri atas empat rezim pengairan dan dua jenis pupuk. Keseluruhan 80 pot difungsikan untuk menguji pemerataan distribusi air pada sistem FONi, sedangkan pengukuran emisi CH_4 dibatasi pada 2 ulangan akibat keterbatasan kapasitas laboratorium GC. Distribusi air dikendalikan menggunakan sistem Fertigator Otomatis Nirdaya (FONi) berbasis automatic water level control yang terintegrasi dengan bak pengontrol dan pipa drainase 15 cm untuk menjaga kestabilan tinggi muka air setiap perlakuan (Gambar 1).



Gambar 1. Skema Irigasi 2D Fertigator Otomatis Nirdaya (FONi) (mm)



(a) (b)

Gambar 2. Kondisi Aktual Tinggi Muka Air pada Pot Perlakuan (a) Kondisi Tergenang dengan Muka Air Positif, dan (b) Kondisi Penurunan Muka Air (Negatif)

Pengamatan pada penelitian ini dilakukan selama satu musim tanam, yaitu hingga tanaman berumur 104 Hari Setelah Tanam (HST). Empat skenario rezim air yang diterapkan meliputi : (1) Rezim tergenang (RT): muka air dipertahankan setinggi 2 cm hingga 70 HST, lalu diturunkan menjadi 0 cm dalam kondisi jenuh hingga panen; (2) Rezim basah (RB): muka air setinggi 1 cm hingga 20 HST, dan diturunkan menjadi 0 cm hingga panen; (3) Rezim kering (RK): muka air setinggi 1 cm hingga 20 HST, diturunkan menjadi 0 cm hingga 30 HST, lalu dikeringkan total hingga masa panen; dan (4) Rezim berselang (RBe): genangan awal setinggi 5 cm, dikeringkan pada 35 – 60 HST, dan digenangi kembali 5 cm pada 60 – 90 HST, lalu dikeringkan hingga masa panen. Visualisasi aktual dari kondisi pot yang tergenang maupun mengalami penurunan muka air pada skenario tersebut dapat dilihat pada Gambar 2. Sejalan dengan pengaturan rezim air tersebut, tahapan agronomi juga diaplikasikan secara terukur di lapangan. Bibit dipindah tanam pada umur 15 hari setelah semai, bersamaan dengan pengaplikasian pupuk. Untuk pemenuhan hara, diaplikasikan pupuk organik padat komersial *EcoFarming* dengan berat 30 gram padatan dan kandungan C-organik sebesar 51,06% (Wahyudi *et al.* 2025) yang dilarutkan dalam air hingga volume total 500 mL larutan per kelompok perlakuan pada 14, 28, 42, dan 56 HST. EcoFarming juga mengandung

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

3,35% N-total, 4,84% P_2O_5, dan 1,47% K_2O, dengan rasio C/N sebesar 15,24 dan pH 7,05. Selain itu, pada perlakuan pupuk anorganik diberikan dosis 5 gram dengan pengaplikasian dalam dua tahap, yaitu sebanyak 3 gram (60%) pada 5 HST, serta 2 gram (40%) pada 35 HST (Siwanto *et al.* 2015). Pemeliharaan rutin berupa pengontrolan air serta pengendalian hama secara manual tanpa pengaplikasian pestisida kimia.

2.2.2. Pengumpulan Data dan Pengambilan Sampel Gas

Kegiatan pengumpulan data dalam penelitian ini meliputi pemantauan parameter lingkungan serta pengukuran emisi gas metana (CH_4). Untuk data harian parameter iklim mikro yang dicatat otomatis berupa curah hujan, suhu udara, kelembapan relatif, dan radiasi matahari. Pengamatan juga dilakukan terhadap karakteristik tanah yang mencakup pH, suhu, kelembapan, serta daya hantar listrik yang diukur secara berkala menggunakan instrumen standar berupa pH meter dan data logger. Sementara itu, pengambilan sampel emisi CH_4 dilakukan secara periodik menggunakan metode *closed chamber* dengan mengacu pada SNI 9224-1:2023. Sampling dijadwalkan satu kali setiap minggu setelah fase pindah tanam pada rentang waktu pukul 09.00 – 11.00 WIB. Pada setiap sesi pengambilan sampel, *chamber* dipasangkan rapat pada *base chamber* yang telah tertanam pada masing-masing pot perlakuan. Pengambilan sampel diawali dengan pengisian air pada *chamber base* untuk menciptakan *water seal* yang menjamin kondisi kedap udara di dalam *chamber*. Untuk memastikan homogenitas distribusi gas di dalam *chamber*, dipasang kipas kecil bertenaga aki yang diaktifkan selama proses sampling berlangsung. Kemudian gas di dalam *chamber* diambil menggunakan alat suntik (*syringe*) berkapasitas 20 ml secara berulang dengan interval waktu pada menit ke-5, 10, 15, dan 20 melalui selang yang terhubung dengan katup tiga arah. Sampel gas tersebut disuntikkan ke dalam botol vial 10 ml yang kedap udara untuk dianalisis di laboratorium, bersamaan dengan pencatatan suhu internal pada *chamber* menggunakan termometer guna memantau fluktuasi temperatur selama sampling berlangsung.

2.2.3. Analisis Laboratorium dan Perhitungan Emisi Gas Metana (CH_4)

Pengujian konsentrasi gas metana dilakukan menggunakan metode *Gas Chromatography* (GC) yang dilengkapi dengan *Flame Ionization Detector* di Laboratorium Gas Rumah Kaca, Pati. Sebagai upaya preservasi, sampel gas yang telah diekstraksi ke dalam botol vial kaca 10 ml kedap udara berseptum butil disimpan pada suhu ruang. Pengiriman sampel menuju laboratorium dilakukan secara berkala setiap seminggu sekali, selama 15 minggu masa pengamatan. Frekuensi pengiriman ini ditetapkan agar sampel dapat dianalisis sesegera mungkin sebelum melewati batas waktu 28 hari setelah pengambilan sampel. Berdasarkan Faust dan Liebig (2018), sampel CH_4 di dalam vial kaca berseptum butil tetap stabil hingga 28 hari, sedangkan penyimpanan yang lebih lama dapat menyebabkan terjadinya perubahan konsentrasi gas. Hasil pembacaan alat berupa konsentrasi dalam ppm digunakan untuk menghitung laju emisi. Nilai fluks gas metana (CH_4) ditentukan berdasarkan perubahan konsentrasi per satuan waktu dengan menerapkan rumus perhitungan sebagaimana tercantum pada persamaan berikut (IAEA, 1993).

$$E = \frac{\delta C}{\delta t} \times \frac{V_{ch}}{A_{ch}} \times \frac{mW}{mV} \times \frac{273{,}2}{273{,}2 + T}$$

Keterangan:

E : Fluks CH_4 ($mg/m^2/menit$)

$\frac{\delta C}{\delta t}$: Perbedaan konsentrasi CH_4 per waktu pengambilan (ppm/menit)

V_{ch} : Volume chamber (m^3)

A_{ch} : Luas chamber (m^2)

mW : Berat molekul CH_4 (16,04 g/mol)

mV : Volume molekul CH_4 (22,41 liter/mol pada STP)

T : Temperatur selama sampling (°C)

Nilai fluks (E) yang diperoleh dari Persamaan 1 ($mg/m^2/menit$) selanjutnya dikonversi menjadi laju emisi harian ($mg/m^2/hari$) dengan mengalikan faktor 1.440 (60 menit/jam × 24 jam/hari) sebelum diintegrasikan ke dalam perhitungan emisi kumulatif. Interpretasi terhadap dinamika gas metana (CH_4) didasarkan pada nilai fluks yang dihasilkan. Nilai positif mengindikasikan bahwa lahan sawah berfungsi sebagai sumber emisi (*emitter*) ke atmosfer, sedangkan nilai negatif menandakan lahan berperan sebagai penyerap (*sink*) metana (Arif *et al.* 2015). Selanjutnya, untuk menghitung total emisi CH_4 selama seluruh periode pengamatan (7 – 104 HST), digunakan metode integrasi numerik aturan Simpson Komposit (*Composite Simpson's Rule*) sesuai persamaan berikut.

$$E_{total} = \frac{h}{3}\left[f(t_0) + 4\sum_{i=1,3,5..}^{n-1} f(t_i) + 2\sum_{j=2,4,6..}^{n-2} f(t_j) + f(t_n)\right] \times 10^{-2}$$

Keterangan:

E_{total} : Total emisi CH_4 selama satu musim tanam (kg/ha/musim)

h : Selang/interval waktu antar-pengamatan (hari)

t_0, t_n : Waktu pengamatan awal (0) dan pengamatan akhir (n)

$f(t_0), f(t_n)$: Fluks emisi CH_4 pada titik awal dan akhir pengamatan ($mg/m^2/hari$)

$f(t_i)$: Fluks emisi CH_4 pada titik pengamatan urutan ganjil (i = 1, 3, 5, …, n – 1)

$f(t_j)$: Fluks emisi CH_4 pada titik pengamatan urutan genap (j = 2, 4, 6, …, n – 2)

10^{-2} : Faktor konversi satuan dari mg/m^2 menjadi kg/ha

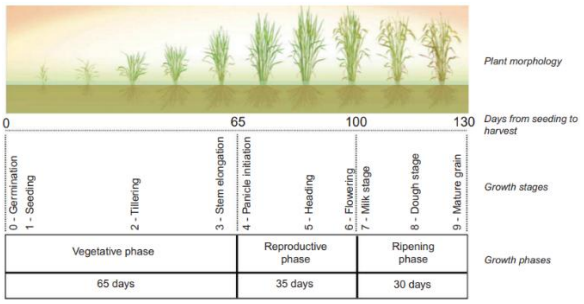
© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Total emisi gas metana (CH_4) yang diperoleh dari perhitungan integrasi *Numerical Simpson*, selanjutnya dievaluasi secara statistik. Analisis data dilakukan menggunakan *Two-Way* ANOVA pada taraf signifikansi 5% untuk mengetahui pengaruh utama sekaligus interaksi dari perlakuan tinggi muka air dan jenis pupuk terhadap emisi CH_4.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

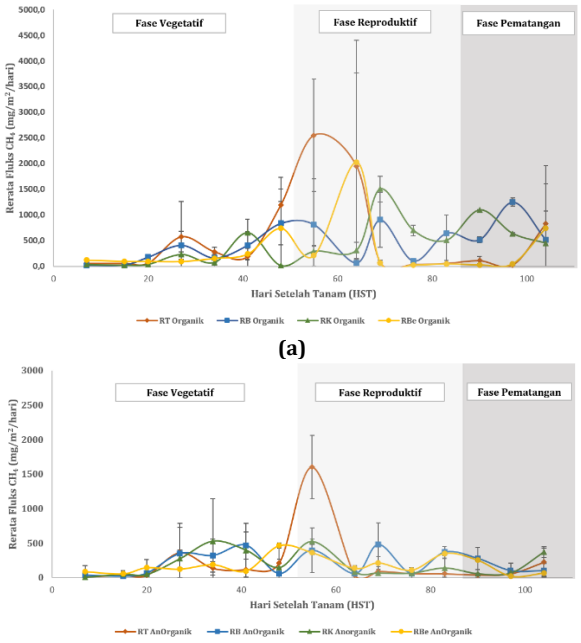
3.1. Fluks Metana (CH_4) Mingguan dan Puncak Emisi

Pengambilan sampel dan pengukuran emisi CH_4 secara berkala selama satu musim tanam memperlihatkan bahwa dinamika fluks sangat dipengaruhi oleh fase perkembangan fisiologis padi yang terlihat pada Gambar 3. Pada rentang fase vegetatif (7 – 41 HST), pelepasan gas ke atmosfer masih tergolong rendah. Laju emisi baru melonjak tajam ketika tanaman memasuki fase reproduktif (48 – 83 HST), yang tertera pada Gambar 3. Peningkatan ini terjadi karena sistem perakaran dan jaringan aerenkim tanaman telah berkembang maksimal, sehingga berfungsi sebagai jalur transportasi utama bagi CH_4 dari zona anaerobik tanah menuju atmosfer (Xuan *et al.* 2025). Selain faktor fisiologis tanaman, intensitas laju fotosintesis pada fase reproduktif turut mendorong produksi eksudat akar. Senyawa organik yang dilepaskan melalui eksudat tersebut berfungsi sebagai substrat karbon tambahan yang mendukung aktivitas mikroorganisme metanogen (Conrad 2020).



Gambar 3. Fase dan Tahap Pertumbuhan Padi (IRRI, 2009)

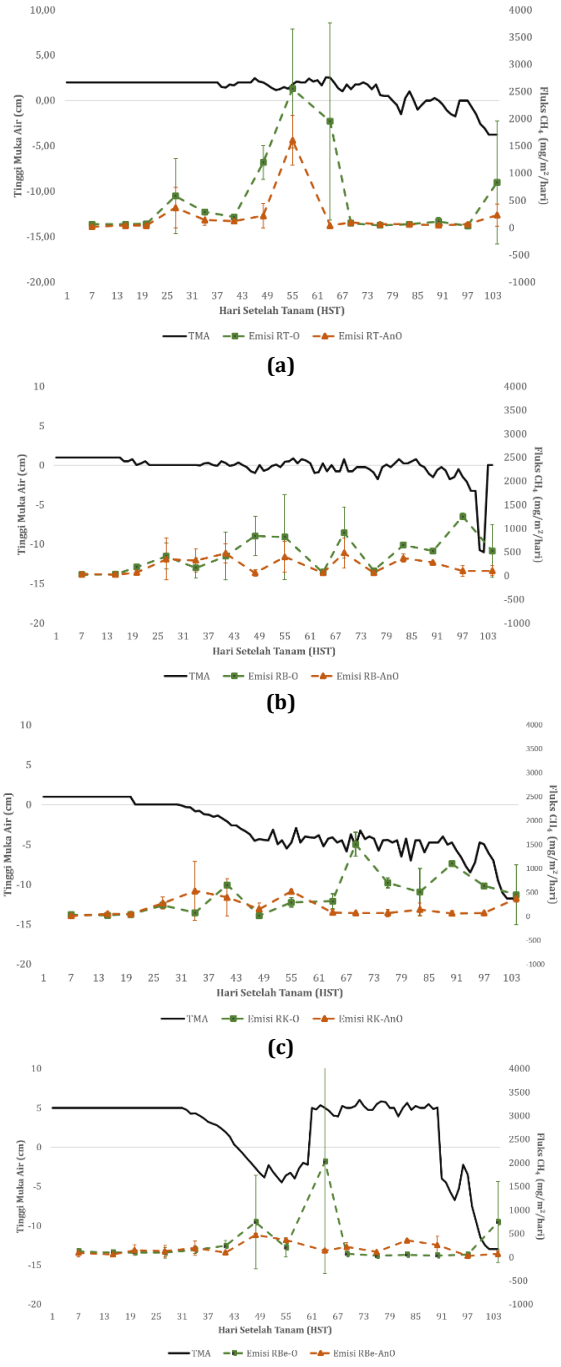
Jika dibandingkan antarperlakuan sumber nutrisi, pemberian pupuk organik memberikan dampak yang jauh lebih dominan terhadap peningkatan fluks CH_4 dibandingkan dengan pengaturan rezim air. Pada media dengan pupuk organik yang tertera pada Gambar 4a, ledakan emisi terjadi pada seluruh variasi rezim air dengan puncak emisi mencapai 2551,7 mg/m^2/hari di bawah kondisi tergenang. Sebaliknya, grafik pada media anorganik yang ditunjukkan pada Gambar 4b menampilkan kurva fluks yang jauh lebih landai dan stabil dengan nilai puncak emisi hanya 1602,6 mg/m^2/hari. Pola ini sejalan dengan bukti yang dikemukakan oleh Wihardjaka dan Harsanti (2021), yakni bahwa dekomposisi pupuk organik secara masif menyediakan substrat karbon yang langsung memicu aktivitas metanogenesis, sekalipun kondisi muka air di lahan mengalami fluktuasi.



Gambar 4. Rataan Fluks CH_4 dengan Perlakuan (a) Pupuk Organik, dan (b) Pupuk Anorganik

Respons fluks terhadap pengaturan tinggi muka air juga memperlihatkan pola yang spesifik, terlihat pada Gambar 5. Pada perlakuan RT, kondisi tanah yang terus-menerus berada dalam status reduktif menyebabkan puncak emisi muncul lebih awal dan lebih tinggi, sebelum akhirnya menurun saat muka air mulai disurutkan menjelang panen. Sementara itu, penerapan RBe menunjukkan kecenderungan penurunan fluks metana selama periode pengeringan lahan (35–60 HST). Meski begitu, proses *rewetting* pada 60 HST memicu lonjakan emisi seketika sebagai akibat dari adaptasi cepat mikroorganisme tanah terhadap perubahan aerasi, sebuah respons dinamis yang juga dilaporkan oleh Linquist *et al.* (2015). Adapun pada perlakuan RB dan RK dengan pupuk organik, emisi CH_4 tetap terukur dengan intensitas yang tinggi pada fase pematangan (90 – 104 HST) meski muka air berada di bawah permukaan tanah. Hal ini mengindikasikan bahwa ketersediaan bahan organik yang melimpah mampu mempertahankan zona-zona mikro anaerob di dalam pori tanah, sehingga proses metanogenesis tetap dapat berlangsung (Dubey 2005).

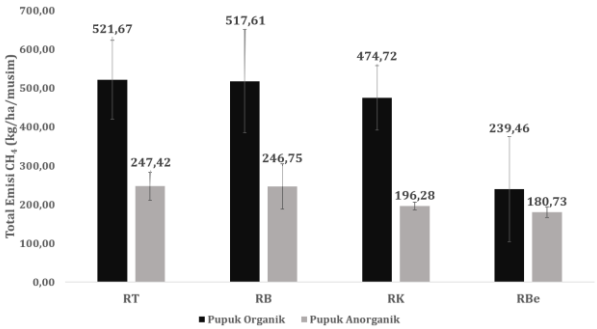
© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP



Gambar 5. Hubungan Tinggi Muka Air dan Fluks CH_4 pada (a) RT, (b) RB, (c) RK, dan (d) RBe

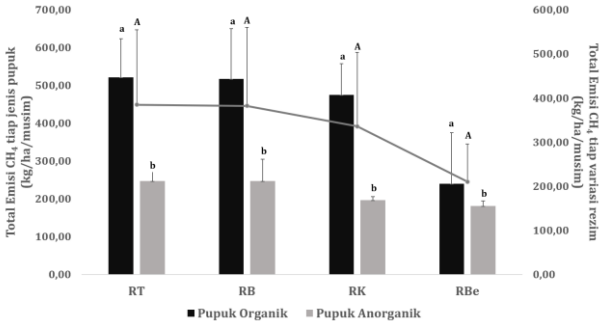
3.2. Total Emisi CH_4 Pada Berbagai Perlakuan

Berbeda dengan dinamika fluks CH_4 antarwaktu pengamatan yang fluktuatif, emisi kumulatif merepresentasikan total gas metana yang terlepas ke atmosfer dari awal tanam hingga tanaman siap panen (104 HST). Rentang waktu ini mencakup seluruh fase kritis tanaman dari vegetatif awal, reproduktif, hingga pematangan saat aktivitas metanogenesis berlangsung intensif. Oleh karena itu, emisi kumulatif menjadi parameter utama untuk menilai kontribusi nyata lahan terhadap emisi gas rumah kaca sekaligus indikator keberhasilan metode mitigasi rezim air. Akumulasi emisi CH_4 dari keempat variasi rezim air dan jenis pupuk terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Total Emisi CH_4 pada Berbagai Variasi Tinggi Muka Air dan Jenis Pupuk

Akumulasi emisi CH_4 menunjukkan pola penurunan yang konsisten seiring berkurangnya durasi genangan air pada kedua jenis pupuk. Perlakuan RT secara konsisten menjadi penyumbang emisi terbesar, sedangkan intervensi pengeringan lahan melalui RBe dimana secara numerik, perlakuan RBe menghasilkan emisi 54,1% lebih rendah dibandingkan RT pada pupuk organik dan 27,0% lebih rendah pada pupuk anorganik. Terlepas dari variasi rezim air yang diterapkan, akumulasi emisi pada perlakuan pupuk organik tetap lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan pupuk anorganik, bahkan mencapai dua kali lipat pada kondisi tergenang. Hal ini dikarenakan bahan organik menyediakan substrat karbon melimpah yang memicu aktivitas mikroorganisme metanogen (Wihardjaka dan Harsanti 2021). Dominasi pengaruh pupuk dalam melipatgandakan produksi gas metana ini dipertegas oleh hasil analisis ragam ANOVA pada Gambar 7.



Gambar 7. Pengaruh Jenis Pupuk Terhadap Rataan Emisi CH_4 (Garis Vertikal: Standar Deviasi; Huruf Berbeda Menunjukkan Perbedaan Nyata, $p < 0,05$)

Hasil ANOVA menunjukkan bahwa jenis pupuk berpengaruh sangat nyata terhadap emisi kumulatif CH_4 ($p < 0,01$; notasi a dan b), sedangkan rezim air ($p = 0,062$; notasi A) maupun interaksinya ($p = 0,263$) tidak signifikan. Tren penurunan emisi dari RT ke RBe secara visual tidak berbeda nyata secara statistik akibat tingginya simpangan baku, khususnya pada pupuk organik. Besarnya variabilitas antarulangan ini merupakan karakteristik umum pengukuran gas

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

rumah kaca pada lahan sawah, karena pelepasan metana sangat sensitif terhadap dinamika lingkungan mikro dan kerap terjadi secara episodik melalui mekanisme ebulisi (Jiang *et al.* 2019).

Tidak signifikannya pengaruh rezim air dan interaksi kedua perlakuan secara statistik dipicu oleh tingginya variabilitas data dan simpangan baku, di samping efek aerasi dari pengeringan lahan belum cukup kuat menekan aktivitas metanogen. Melimpahnya substrat karbon yang mudah terurai dari pupuk pada zona perakaran menjadi faktor pengendali utama yang mengaburkan (*masking effect*) dampak perbedaan rezim air serta mempertahankan tingginya laju metanogenesis.

Guna mengevaluasi tingkat kewajaran data yang didapat, hasil ini dikomparasikan dengan studi sawah tadah hujan di Pati oleh Wihardjaka *et al.* (2012) yang mencatat rentang emisi sebesar 58,3 – 112,2 kg/ha/musim. Rentang emisi pada penelitian ini 1,6 – 5 kali lipat lebih tinggi yang dipicu oleh dua perbedaan teknis utama. Pertama, penelitian acuan menerapkan sistem *direct seeded* dengan genangan yang baru terbentuk saat fase anakan aktif (tanah awal aerob), sedangkan penelitian ini menerapkan konsistensi sejak awal pengamatan yang memperpanjang durasi anaerobik. Kedua, penggunaan media pot dengan volume tanah terbatas membuat tanah lebih cepat jenuh air dan menciptakan kondisi anaerobik yang lebih intensif dibandingkan dengan hamparan sawah terbuka karena tidak adanya infiltrasi lateral maupun sirkulasi air irigasi. Tanpa adanya pergantian air tersebut, akumulasi sisa organik di perakaran yang digabungkan dengan pengaplikasian pupuk organik padat (*EcoFarming* dengan C-organik 51,06%) dalam bentuk larutan memicu lonjakan aktivitas metanogen. Kandungan C-organik yang tinggi ini melampaui kadar C-organik pada studi Wihardjaka *et al.* (2012) sebesar 41,98% pada materi segar dan 19,89% pada kompos. Pelarutan pupuk organik sebelum aplikasi secara langsung menyuplai fraksi *Dissolved Organic Carbon* (DOC) yang labil di zona perakaran. Ketersediaan C-organik terlarut dapat dimanfaatkan secara instan oleh mikroorganisme metanogen tanpa melalui jeda dekomposisi fisik yang panjang sehingga secara signifikan meningkatkan emisi CH_4 pada lahan sawah (Lu *et al.* 2000). Dengan demikian, ketersediaan karbon organik terbukti menjadi pengendali utama produksi akhir gas metana dalam agroekosistem sawah.

3.3. Hubungan Parameter Kondisi Tanah terhadap Emisi Metana (CH_4)

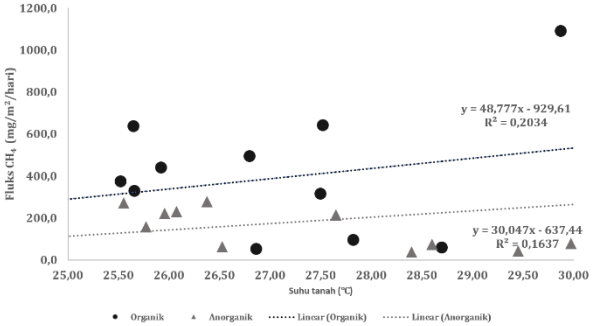
Pemantauan kondisi tanah pada kedalaman 0 – 5,2 cm dilakukan untuk memantau profil lingkungan mikro media tanam, di mana fluktuasi parameter tersebut dikendalikan oleh pengaturan tinggi muka air. Ringkasan batas nilai minimum dan maksimum dari seluruh parameter tanah disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai Minimum dan Maksimum Paramater Kondisi Tanah pada Setiap Jenis Pupuk

Parameter	Jenis Pupuk	Nilai Minimum	Nilai Maksimum
Suhu tanah (°C)	Organik	24,18	34,38
	Anorganik	24,55	32,18
Water Content (m^3/m^3)	Organik	0,36	0,47
	Anorganik	0,4	0,46
Bulk EC (mS/cm)	Organik	0,353	1,455
	Anorganik	0,358	1,62
pH	Organik	4,88	6,2
	Anorganik	4,6	6,1

Sumber data pengamatan langsung diolah (2026)

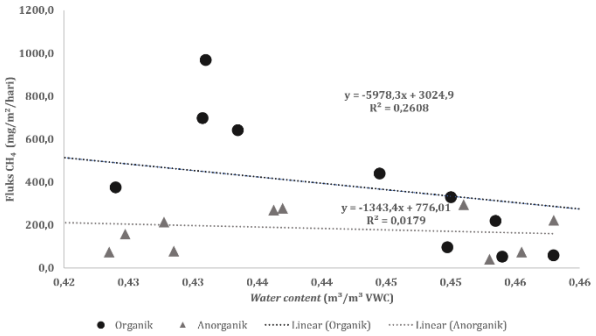
Berdasarkan analisis regresi linier pada Gambar 8, hubungan antara suhu tanah dan fluks CH_4 menunjukkan kecenderungan positif (R^2 = 0,16 – 0,20) yang mengindikasikan bahwa kenaikan suhu mempercepat laju reaksi enzimatik dan kapasitas metabolik bakteri metanogen (Conrad 2023). Meskipun demikian, nilai R^2 yang rendah membuktikan bahwa dinamika suhu hanya menunjukkan sebagian kecil variasi emisi di lapangan, sehingga pengaruhnya bersifat sekunder dibanding intensitas dan durasi anaerobik akibat penggenangan (Lakshani *et al.* 2023).



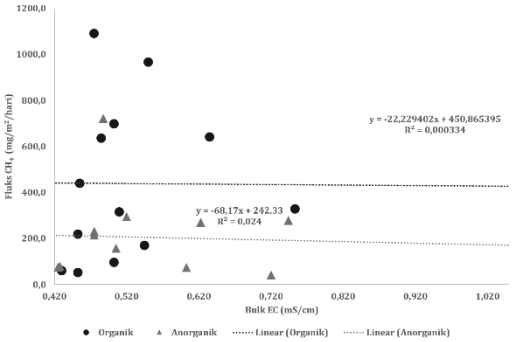
Gambar 8. Grafik Regresi Linier Antara Nilai Suhu Tanah Terhadap Fluks CH_4

Respons laju pelepasan gas metana terhadap tingkat kelembapan tanah disajikan pada Gambar 9. Hubungan antara kadar air dan fluks CH_4 memperlihatkan kecenderungan negatif, terutama pada perlakuan pupuk organik (R^2 = 0,260). Korelasi negatif ini dipicu oleh beberapa mekanisme lapangan, di mana penurunan kadar air saat tahap pengeringan membuka pori-pori tanah dan memicu pelepasan masif gas metana yang sebelumnya terperangkap di lapisan bawah (Barbosa *et al.* 2021). Selain itu, saat tanah kembali jenuh air, aktivitas fisiologis tanaman telah menurun sehingga genangan tidak lagi didukung oleh pasokan eksudat akar segar, yang diperparah oleh *lag effect* akibat penekanan populasi metanogen selama fase pengeringan.

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

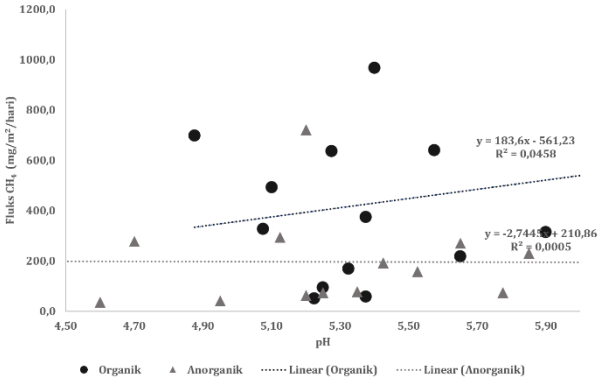


Gambar 9. Grafik Regresi Linier Antara Nilai Kelembapan Tanah Terhadap Fluks CH_4



Gambar 11. Grafik Regresi Linier Antara Nilai *Bulk EC* Tanah Terhadap Fluks CH_4

Keterkaitan antara pH tanah dan laju emisi CH_4 disajikan pada Gambar 10. Evaluasi regresi menunjukkan korelasi yang sangat lemah (R^2 = 0,0005 – 0,045). Selama pengamatan, rataan pH tanah berkisar antara 4,60 – 5,90 akibat akumulasi asam organik dari dekomposisi biomassa secara anaerobik (Kögel-Knabner *et al.* 2010). Kisaran tersebut tergolong masam dan berada di bawah rentang optimum bagi aktivitas metanogen yang berada pada angka 6,5 – 7,5. Dari hasil tersebut, didapatkan variasi pH yang terjadi belum cukup kuat untuk memicu perubahan laju emisi secara nyata.



Gambar 10. Grafik Regresi Linier Antara Nilai pH Tanah Terhadap Fluks CH_4

Dinamika konsentrasi ion terlarut (*bulk EC*) dan dampaknya terhadap fluks CH_4 diuraikan pada Gambar 11. Hubungan antara *bulk EC* dan fluks CH_4 menunjukkan kecenderungan negatif dengan nilai regresi yang mendekati nol (R^2 < 0,03). Nilai EC terukur masih berada pada kisaran rendah (0,353 – 1,620 mS/cm) sehingga belum menimbulkan tekanan osmotik yang mampu menghambat aktivitas bakteri metanogen, di mana efek inhibisi umumnya baru bekerja pada tingkat salinitas yang melampaui ambang batas toleransi (Malyan *et al.* 2016).

Secara keseluruhan, lemahnya korelasi seluruh parameter tanah terhadap fluks CH_4 menunjukkan bahwa kondisi fisik – kimia tanah dalam penelitian ini hanya berfungsi sebagai faktor pendukung. Faktor pengendali utama yang menentukan besaran emisi metana tetap dikendalikan oleh ketersediaan substrat karbon dari jenis pupuk serta fase perkembangan tanaman selama musim tanam.

3.4. Penentuan Skenario Optimal untuk Mitigasi Emisi Metana (CH_4)

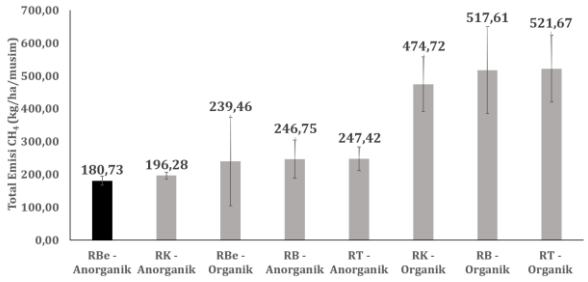
Evaluasi efektivitas skenario mitigasi emisi CH_4 didasarkan pada akumulasi fluks selama satu musim tanam sebagaimana disajikan pada Tabel 2 dan Gambar 12. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa jenis pupuk merupakan faktor pengendali utama produksi metana di lapangan. Emisi kumulatif pupuk anorganik (180,73– 247,42 kg/ha/musim) konsisten lebih rendah dibandingkan pupuk organik (239,46 – 521,67 kg/ha/musim) karena biomassa organik langsung menyuplai substrat karbon bagi metanogen (Wihardjaka dan Harsanti 2021), sehingga pengaruhnya mendominasi dan menutupi variasi akibat rezim air.

Tabel 2. Perbandingan Total Emisi dari Dua Ulangan pada Setiap Kombinasi Perlakuan Rezim Air dan Pupuk

Pupuk Organik			
Jenis Rezim	Ulangan 1 (kg/ha/musim)	Ulangan 2 (kg/ha/musim)	Total (kg/ha/musim)
RT	593,62	449,73	521,67
RB	611,49	423,73	517,61
RK	533,25	416,19	474,72
Rbe	335	143,91	239,46
Pupuk Anorganik			
Jenis Rezim	Ulangan 1 (kg/ha/musim)	Ulangan 2 (kg/ha/musim)	Total (kg/ha/musim)
RT	272,93	221,92	247,42
RB	287,91	205,59	246,75
RK	189,27	203,29	196,28
RBe	190,46	171,01	180,73

Sumber data diolah dari hasil uji laboratorium BRMP Lingkungan Pertanian

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP



Gambar 12. Perbandingan Total CH_4 pada Berbagai Skenario Mitigasi

Meskipun secara statistik pengaruh rezim air tidak berbeda nyata akibat variabilitas fluks gas di lapangan, terdapat tren penurunan emisi yang konsisten dari RT menuju RBe pada kedua jenis pupuk (Gambar 12). Pengaturan tinggi muka air pada penerapan RBe membatasi durasi kondisi anaerobik tanah, sehingga proses metanogenesis dapat ditekan (Linquist *et al.* 2015). Berdasarkan parameter tersebut, kombinasi RBe dan pupuk anorganik menjadi skenario mitigasi paling optimal dengan capaian emisi kumulatif terendah sebesar 180,73 kg/ha/musim. Rendahnya emisi pada kombinasi tersebut diduga berkaitan dengan terbatasnya suplai substrat karbon serta terputusnya kondisi anaerobik tanah secara berkala selama musim tanam. (Kartikawati dan Nursyamsi 2013).

Dilihat dari perspektif agronomis berkelanjutan, penentuan skenario mitigasi harus menyelaraskan target penurunan emisi dengan kebutuhan pemeliharaan kesuburan tanah jangka panjang. Aplikasi bahan organik sering kali tetap dibutuhkan untuk memperbaiki sifat fisik tanah, meskipun berisiko memicu lonjakan emisi akibat melimpahnya suplai karbon bagi metanogen (Wihardjaka *et al.* 2012). Pada pupuk organik, penerapan RBe menghasilkan emisi CH_4 54,1% lebih rendah secara numerik dibandingkan RT. Hasil ini menunjukkan potensi pengelolaan air berselang untuk menekan emisi CH_4 pada sistem budidaya yang tetap memerlukan aplikasi pupuk organik.

4. KESIMPULAN

Jenis pupuk merupakan faktor yang berpengaruh nyata terhadap emisi CH_4, dengan penggunaan pupuk organik menghasilkan emisi kumulatif tertinggi sebesar 521,67 kg CH_4/ha/musim. Meskipun rezim air dan interaksinya dengan jenis pupuk tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan secara statistik, terdapat kecenderungan penurunan emisi dari kondisi tergenang menuju berselang. Kombinasi rezim berselang dan pupuk anorganik menghasilkan emisi CH_4 terendah sebesar 180,73 kg CH_4/ha/musim. Pada penggunaan pupuk organik, penerapan rezim berselang mampu menurunkan emisi CH_4 sebesar 54,1% dibandingkan kondisi tergenang, menunjukkan potensi pengelolaan air berselang sebagai strategi mitigasi emisi tanpa menghilangkan penggunaan pupuk organik. Dengan demikian, kemampuan sistem FONi dalam mempertahankan dan mengatur tinggi muka air secara otomatis dapat dimanfaatkan untuk menerapkan pengairan berselang sebagai salah satu strategi mitigasi emisi CH_4 pada budidaya padi. Penelitian lanjutan perlu meningkatkan resolusi pengamatan pada fase transisi *rewetting* serta mengintegrasikan pemantauan potensial redoks (Eh) tanah secara kontinu untuk menjelaskan hubungan antara dinamika muka air dan fluks CH_4 secara lebih baik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kegiatan ini didukung oleh Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Direktorat Jenderal Riset dan Pengembangan, Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi sesuai dengan Kontrak Pelaksanaan Program Penelitian Tahun Anggaran 2026 Nomor: 005/C3/DT.05.00/PL-KLN/2026.

DAFTAR PUSTAKA

Arif C, Setiawan BI, Widodo S, Rudiyanto, Hasanah NAI, Mizoguchi M. (2015). Pengembangan Model Jaringan Saraf Tiruan untuk Menduga Emisi Gas Rumah Kaca dari Lahan Sawah dengan berbagai Rejim Air. *JI*. 10(1):1. doi:10.31028/ji.v10.i1.1-10.

Bagus BM, Supriadi A, Hidayat S, Salehudin S. (2020). Model Irigasi Hemat Air Perpaduan *System Of Rice Intensification* (SRI) Dengan *Alternate Wetting And Drying* (AWD) Pada Padi Sawah. *J. Tek. Pengair.* 11(2):128–136. doi:10.21776/ub.pengairan.2020.011.02.06.

Barbosa PM, Melack JM, Amaral JHF, Linkhorst A, Forsberg BR. (2021). Large Seasonal and Habitat Differences in Methane Ebullition on the Amazon Floodplain. *JGR Biogeosciences*. 126(7):e2020JG005911. doi:10.1029/2020JG005911.

Chidthaisong A, Cha-un N, Rossopa B, Buddaboon C, Kunuthai C, Sriphirom P, Towprayoon S, Tokida T, Padre AT, Minamikawa K. (2018). Evaluating The Effects Of Alternate Wetting And Drying (AWD) On Methane And Nitrous Oxide Emissions From A Paddy Field In Thailand. *Soil Science and Plant Nutrition*. 64(1):31-38. doi:10.1080/00380768.2017.1399044.

Conrad R. (2020). Importance Of Hydrogenotrophic, Aceticlastic And Methylotrophic Methanogenesis For Methane Production In Terrestrial, Aquatic And Other Anoxic Environments: A Mini Review. *Pedosphere*. 30(1):25–39. doi:10.1016/S1002-0160(18)60052-9.

Conrad R. (2023). Complexity Of Temperature Dependence In Methanogenic Microbial Environments. *Front. Microbiol.* 14:1232946. doi:10.3389/fmicb.2023.1232946.

Conrad R. (2007). Microbial Ecology of Methanogens and Methanotrophs.

Dubey SK. (2005). Microbial Ecology Of Me Thane Emission In Rice Agroecosystem: A Review. *Appl Ecol Env Res*. 3(2):1–27. doi:10.15666/aeer/0302_001027.

[FAO] Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2004). Rice is Life : The International Year of Rice 2004. Roma (IT):FAO.

Faust DR, Liebig MA. (2018). Effects Of Storage Time And Temperature On Greenhouse Gas Samples In

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Exetainer Vials With Chlorobutyl Septa Caps. *MethodsX*. 5:857–864. doi:10.1016/j.mex.2018.06.016.

Fitry Hedianty R, Indra Setiawan B, Arif C. (2025). Study The Application Of Automatic Unpowered Fertigator (Foni) In Eggplant (Solanum Melongena) Cultivation. *JTEP*. 13(3):499–512. Doi:10.19028/Jtep.013.3.499-512.

Hidayatulloh A. (2025). Pengembangan Model Optimasi Irigasi untuk Mitigasi Global Warming Potential [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor].

Husaini MIA. (2025). Analisis Sistem Irigasi Evapotranspiratif terhadap Emisi Gas Metana (CH_4) pada Budidaya Padi dengan Berbagai Skenario Tinggi Muka Air [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.

[IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge (GB): Cambridge University Press.

Jiang Y, Carrijo D, Huang S, Chen J, Balaine N, Zhang W, Van Groenigen KJ, Linquist B. (2019). Water Management To Mitigate The Global Warming Potential Of Rice Systems: A Global Meta-Analysis. *Field Crops Research*. 234:47–54. doi:10.1016/j.fcr.2019.02.010.

Kartikawati R, Nursyamsi D. (2013). Pengaruh Pengairan, Pemupukan, dan Penghambat Nitrifikasi terhadap Emisi Gas Rumah Kaca di Lahan Sawah Tanah Mineral. *J. Ecolab*. 7(2):93–107. doi:10.20886/jklh.2013.7.2.93-107.

Kögel-Knabner I, Amelung W, Cao Z, Fiedler S, Frenzel P, Jahn R, Kalbitz K, Kölbl A, Schloter M. (2010). Biogeochemistry of Paddy Soils. *Geoderma*. 157(1–2):1–14. doi:10.1016/j.geoderma.2010.03.009.

Lakshani MMT, Deepagoda TKKC, Li Y, Hansen HFE, Elberling B, Nissanka SP, Senanayake DMJB, Hamamoto S, Babu GLS, Chanakya HN, *et al.* (2023). Impact of Water Management on Methane Emission Dynamics in Sri Lankan Paddy Ecosystems. *Water*. 15(21):3715. doi:10.3390/w15213715.

Linquist BA, Anders MM, Adviento-Borbe MAA, Chaney RL, Nalley LL, Da Rosa EFF, Van Kessel C. (2015). Reducing Greenhouse Gas Emissions, Water Use, And Grain Arsenic Levels In Rice Systems. *Global Change Biology*. 21(1):407–417. doi:10.1111/gcb.12701.

Lu Y, Wassmann R, Neue H-U, Huang C. [2000]. Dynamics of Dissolved Organic Carbon and Methane Emissions in a Flooded Rice Soil. *Soil Science Soc of Amer J*. 64(6):2011–2017. doi:10.2136/sssaj2000.6462011x.

Malyan SK, Bhatia A, Kumar A, Gupta DK, Singh R, Kumar SS, Tomer R, Kumar O, Jain N. (2016). Methane Production, Oxidation And Mitigation: A Mechanistic Understanding And Comprehensive Evaluation Of Influencing Factors. *Science Of The Total Environment*. 572:874–896. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.07.182.

Pembengo W, Dude S. (2024). Upaya Implementasi NDC (Nationally Determined Contribution) Guna Mencapai Ketahanan Iklim (Climate Resilience) Di Bidang Pertanian. *JAI*. 11(1):803–810. doi:10.29303/abdiinsani.v11i1.1303.

Ramadhani WS, Vernandes D, Afandi A, Bucharie H. (2023). Pengaruh Aplikasi Kompos Dan Pupuk Npk Terhadap Kemantapan Agregat Tanah Pada Pertanaman Jagung (Zea Mays L.). *JAT*. 11(4):661. doi:10.23960/jat.v11i4.8238.

Safitri D. (2024). Kinerja Fertigator Otomatis Nirdaya (FONi) dengan Irigasi Bawah Permukaan pada Budidaya Padi SRI-Salibu [tesis]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.

Siwanto TS, Melati M. (2015). Peran Pupuk Organik dalam Peningkatan Efisiensi Pupuk Anorganik pada Padi Sawah (Oryza sativa L.). *J Agron Indonesia*. 43(1):8. doi:10.24831/jai.v43i1.9582.

Valenzya W. (2025). Penerapan Fertigator Otomatis Nirdaya Untuk Mina-Hortikultura [tesis]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.

Vermeulen SJ, Campbell BM, Ingram JSI. 2012. Climate Change and Food Systems. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 37(1):195–222. doi:10.1146/annurev-environ-020411-130608.

Wihardjaka A, S Harsanti E. (2011). Potensi Produksi Gas Metana dari Tanah Sawah Tadah Hujan di Daerah Pantai Utara bagian timur Jawa Tengah. *J. Ecolab*. 5(2):68–88. doi:10.20886/jklh.2011.5.2.68-88.

Wihardjaka A. (2021). Dukungan Pupuk Organik Untuk Memperbaiki Kualitas Tanah Pada Pengelolaan Padi Sawah Ramah Lingkungan. *J. Pangan*. 30(1):53–64. doi:10.33964/jp.v30i1.496

Wihardjaka A, Tandjung SD, Sunarminto BH, Sugiharto E. Methane Emission From Direct Seeded Rice Under The Influences Of Rice Straw And Nitrification Inhibitor.

Yagi K, Sriphirom P, Cha-un N, Fusuwankaya K, Chidthaisong A, Damen B, Towprayoon S. (2020). Potential And Promisingness Of Technical Options For Mitigating Greenhouse Gas Emissions From Rice Cultivation In Southeast Asian Countries. *Soil Science and Plant Nutrition*. 66(1):37–49. doi:10.1080/00380768.2019.1683890.

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP