

## MODEL DENITRIFICATION DECOMPOSITION (DNDC) UNTUK ESTIMASI EMISI GAS CH<sub>4</sub> PADA BUDIDAYA PADI METODE SRI

*Denitrification Decomposition (DNDC) Model of Estimation CH<sub>4</sub> Emissions in Rice Cultivation through SRI Method*

**Badi'atun Nihayah<sup>1</sup>, Bayu Dwi Apri Nugroho<sup>1, \*)</sup>, Nur Aini Iswati Hasanah<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada, Jl. Flora, Bulaksumur, Yogyakarta, Indonesia 55281

<sup>2</sup>Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, Jakarta, Indonesia

Email<sup>\*)</sup>: [nihayah.ba@mail.ugm.ac.id](mailto:nihayah.ba@mail.ugm.ac.id)

Diterima: Juni 2021  
Disetujui: Maret 2022

### ABSTRACT

Rice cultivation is one of the agricultural sectors that contributes to GHGs, especially CH<sub>4</sub>. This study integrates technological components between varieties, fertilizers, and intermittent irrigation through the System of Rice Intensification cultivation method to reduce CH<sub>4</sub> gas emissions. This study aims to determine the effect of variety and fertilization on CH<sub>4</sub> gas emissions during one growing season and perform simulation modeling for CH<sub>4</sub> emission estimation. The model used is Denitrification-Decomposition (DNDC), based on input data parameters of climatic conditions, soil properties, and agricultural management practices (fertilization, irrigation, tillage, biomass production). This study uses a Nested Design with two treatment factors, namely fertilization which consists of 1) Manure and MOL (P1); 2) Manure, ZA, SP36, and KCl (P2), and varieties treatment 1) Ciherang and 2) IR-64. Observation results showed that P2-C fertilization treatment resulted in a total emission of 13.41% lower CH<sub>4</sub> than P1-C and 39.43% P2-IR treatment compared to P1-IR. Similarly, the results of the DNDC simulation showed that fertilization treatment (P2) resulted in total CH<sub>4</sub> emissions from both varieties, i.e., Ciherang 53.57% and IR-64 was 58.74% lower than fertilization (P1). Evaluation model results from observations and simulations of DNDC for the average daily CH<sub>4</sub> flux, R<sup>2</sup> and RMSE values for each treatment, namely P1-C; P1-IR; P2-C and P2-IR respectively (R<sup>2</sup> = 0.65; RMSE = 13.19); (R<sup>2</sup> = 0.003; RMSE = 3.55); (R<sup>2</sup> = 0.17; RMSE = 32.06) and (R<sup>2</sup> = 0.35; RMSE = 12.25). In conclusion, DNDC model results are not satisfactory enough, and it needs calibration.

**Keywords:** CH<sub>4</sub> emission; DNDC model; fertilizer; paddy; System of Rice Intensification

### ABSTRAK

Budidaya padi merupakan salah satu sektor pertanian yang menyumbang emisi gas rumah kaca terutama CH<sub>4</sub>. Upaya penurunan emisi gas CH<sub>4</sub> pada penelitian ini dilakukan dengan mengintegrasikan komponen teknologi antara varietas, penggunaan pupuk dan irigasi

berselang melalui metode budidaya *System of Rice Intensification*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh varietas dan pemupukan terhadap emisi gas CH<sub>4</sub> selama satu musim tanam serta melakukan pemodelan simulasi untuk estimasi emisi CH<sub>4</sub>. Model yang digunakan adalah *Denitrification-Decomposition* (DNDC) berdasarkan parameter data *input* kondisi iklim, sifat tanah dan praktik manajemen pertanian (termasuk pemupukan, irigasi, pengolahan tanah, produksi biomassa). Rancangan yang digunakan adalah Nested Design dengan dua faktor perlakuan, yaitu pemupukan yang terdiri dari 1) Pupuk kandang dan MOL (P1); 2) Pupuk kandang, ZA, SP36 dan KCl (P2); dan perlakuan varietas 1) Ciherang dan 2) IR-64. Hasil observasi menunjukkan bahwa perlakuan pemupukan P2-C menghasilkan total emisi CH<sub>4</sub> 13,41% lebih rendah daripada P1-C dan perlakuan P2-IR 39,43% dibanding P1-IR. Begitu pula hasil simulasi DNDC yang menunjukkan bahwa perlakuan pemupukan (P2) menghasilkan total emisi CH<sub>4</sub> dari kedua varietas, yaitu Ciherang 53,57% dan IR-64 sebesar 58,74% lebih rendah dibanding pemupukan (P1). Evaluasi model antara hasil observasi dan simulasi DNDC menunjukkan nilai R<sup>2</sup> dan RMSE setiap perlakuan, yaitu P1-C; P1-IR; P2-C dan P2-IR berturut-turut sebesar (R<sup>2</sup> = 0,65; RMSE = 13,19); (R<sup>2</sup> = 0,003; RMSE = 3,55); (R<sup>2</sup> = 0,17; RMSE = 32,06) dan (R<sup>2</sup> = 0,35; RMSE = 12,25). Sehingga dapat dikatakan bahwa hasil simulasi DNDC belum cukup memuaskan dan dibutuhkan kalibrasi.

**Kata kunci:** emisi CH<sub>4</sub>; model DNDC; padi; pupuk; *System of Rice Intensification*

## PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Beras merupakan makanan pokok bagi masyarakat Indonesia, budidaya padi berperan penting dalam meningkatkan produksi pangan nasional. Total produksi beras nasional pada tahun 2019 adalah sebesar 31,31 juta ton (BPS, 2020). Di sisi lain, produksi beras merupakan salah satu penyebab terjadinya perubahan iklim (IRRI, 1990). Pada praktiknya, di Indonesia padi sawah dibudidayakan dua sampai tiga kali dalam setahun. Hal ini menjadi masalah penting terutama untuk keberlanjutan dan perkembangan pertanian yang ramah lingkungan.

Penanaman padi sawah dengan penggenangan air dinilai dapat menghasilkan emisi gas rumah kaca di antaranya yaitu karbondioksida (CO<sub>2</sub>), metana (CH<sub>4</sub>) dan nitrogen oksida (N<sub>2</sub>O) (Rivera, *et al.*, 2017). Di bidang pertanian, gas-gas ini dilepaskan dari proses saat material organik terurai atau masukan mineral yang digunakan sebagai substrat dalam proses siklus nutrisi. Salah satu sumber emisi gas yang dihasilkan dari lahan sawah yaitu CH<sub>4</sub> sebesar 5-19% dari jumlah CH<sub>4</sub> antropogenik global (Smith, *et al.*,

2007). CH<sub>4</sub> diproduksi di zona anaerobik oleh metanogen, 60-90% kemudian dioksidasi oleh metanotrof dalam zona aerobik rizosfer dan diubah menjadi CO<sub>2</sub> (Le Mer & Roger, 2001). Proses tersebut dipengaruhi oleh banyak faktor lingkungan seperti atmosfer, karakteristik tanaman dan sifat tanah (Sutton-Grier & Megonigal, 2011). Tanah juga menyediakan substrat karbon menjadi mikroba sebagai media produksi CH<sub>4</sub> dan meningkatkan pertumbuhan tanaman dalam pengangkutan CH<sub>4</sub> (Le Mer & Roger, 2001). Karakteristik tanaman seperti biomassa dan eksudasi akar juga merupakan pengatur terpenting dalam metabolisme CH<sub>4</sub> di tanah (Tong, *et al.*, 2010).

Variabel lingkungan lainnya meliputi suhu tanah, pH, potensial redoks (Eh) dan salinitas tanah juga mempengaruhi metabolisme CH<sub>4</sub> (Wang, *et al.*, 2017). Jalur emisi CH<sub>4</sub> yang terakumulasi pada tanah sawah yang tergenang adalah sebagai berikut: difusi pada air tergenang, kehilangan melalui ebulisi (gelembung) dan pengangkutan melalui sistem aerenkima pada tanaman padi. Di sawah yang beriklim sedang, lebih dari 90% CH<sub>4</sub> diemisikan melalui tanaman (Schütz, *et al.*, 1989).

Penelitian sebelumnya menyebutkan emisi gas CH<sub>4</sub> dari lahan budidaya padi dapat ditentukan oleh beberapa faktor di antaranya sifat-sifat tanah, pengaturan sistem irigasi, pemupukan dan varietas tanaman (Wihardjaka, 2015). Berdasarkan faktor-faktor tersebut, maka pada penelitian ini menggunakan faktor varietas dan pemupukan yang berbeda untuk mengetahui besarnya emisi gas CH<sub>4</sub> yang dihasilkan selama satu musim tanam. Adapun varietas yang digunakan, Ciherang dan IR64, keduanya merupakan varietas yang banyak digunakan oleh petani di Indonesia dengan luas masing-masing, yaitu 5.011.968 ha dan IR64 seluas 1.139.395 ha (BBPADI, 2019). Varietas Ciherang dan IR64 merupakan varietas yang memiliki produktivitas tinggi dan rendah emisi gas rumah kaca (Balitbangtan, 2016). Faktor lain yang digunakan pada penelitian ini untuk mengetahui besarnya emisi gas CH<sub>4</sub> adalah pemupukan.

Upaya penurunan emisi gas CH<sub>4</sub> dari budidaya padi lahan sawah pada penelitian ini adalah dengan mengintegrasikan komponen teknologi antara varietas padi rendah emisi, pupuk kandang matang, pupuk anorganik dan metode budidaya *System of Rice Intensification*. Penerapan metode budidaya *System of Rice Intensification* atau dikenal dengan SRI dinilai dapat meningkatkan hasil produksi dan dapat mengurangi ketergantungan pada irigasi menggenang dan kebutuhan *input* lainnya dengan mengubah pengelolaan tanaman, tanah, air dan nutrisi (Stoop, *et al.*, 2002). Penerapan metode SRI dengan sistem irigasi terputus efektif dalam penurunan CH<sub>4</sub>. Xunhua, *et al.*, (2000) dalam penelitiannya melaporkan bahwa irigasi berselang atau drainase sawah secara berkala dapat menurunkan emisi CH<sub>4</sub> sekitar 32%.

Beberapa tahun terakhir, model simulasi telah dikembangkan untuk memprediksi emisi gas rumah kaca dari agroekosistem pertanian. Pendekatan model merupakan alat yang efektif untuk mengoptimalkan praktik manajemen

lapangan dalam memitigasi emisi gas rumah kaca dari lahan pertanian (Abdalla, *et al.*, 2010). Model *Denitrification Decomposition* (DNDC) adalah salah satu model yang menyimulasikan karbon (C) dan nitrogen (N) jalur biogeokimia di lahan pertanian (Giltrap, *et al.*, 2010). Model DNDC telah banyak digunakan dalam memprediksi emisi gas rumah kaca di beberapa negara iklim subtropis seperti China, Jepang, Korea Selatan dan lain-lain. Penggunaan model DNDC untuk memprediksi gas rumah kaca di Indonesia yang merupakan iklim tropis masih belum banyak digunakan, sehingga perlu dikaji lebih dalam terkait faktor lingkungannya. Rahmat, *et al.*, (2018) telah melakukan penelitian terkait pemodelan DNDC pada budidaya padi metode SRI menggunakan tiga rezim air yang berbeda. Hasil simulasi model DNDC dalam memprediksi fluks gas CH<sub>4</sub> menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan terhadap data aktual di lapangan.

### Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis fluks emisi gas CH<sub>4</sub> yang dihasilkan dari budidaya padi metode SRI dengan varietas dan pemupukan yang berbeda. Selain itu, penelitian ini akan memodelkan emisi gas CH<sub>4</sub> dari setiap perlakuan selama satu musim tanam dengan menggunakan model *Denitrification Decomposition* (DNDC).

### METODE PENELITIAN

#### Alat dan Bahan

Alat untuk *monitoring* lingkungan mikro terdiri dari *rain gauge* ECRN-100, *pyranometer* PYR *total solar radiation* (sensor radiasi matahari), VP-4 *humidity temperature sensor* dan *data logger* EM50 untuk menyimpan data. Sensor 5-TE untuk mengetahui kondisi tanah diantaranya suhu, kelembapan dan daya hantar listrik. *Software* yang digunakan untuk mengunduh data adalah ECH20. Untuk mengukur derajat keasaman tanah (pH), digunakan pH

meter merk Mettler Toledo tipe SevenGo Duo pH. ORP meter tipe ORP-169E untuk mengukur potensial redoks (Eh). Alat yang digunakan untuk pengambilan sampel gas metana adalah *chamber* berbentuk tabung dengan diameter 25 cm dengan dilengkapi kipas, termometer digital, suntikan volume 50-65 ml, tabung vakum plain 10 ml, jarum, selang dan kantong plastik serta *chamber-based* yang dipasang permanen hingga panen. Alat yang dibutuhkan sebagai tempat penanaman padi berupa *box* berbahan *fiberglass* berukuran 150 x 100 x 40 cm. Kelengkapan untuk irigasi adalah tandon air, pipa ukuran ¾ inci, *valve input* dan *output* pipa air.

Bahan-bahan yang dibutuhkan pada penelitian ini diantaranya padi dengan dua varietas yang berbeda, yaitu: Ciherang dan IR64, yang diperoleh dari Balai Besar Penelitian Padi Balitbangtan Kementerian Pertanian. Tanah yang berasal dari sawah budidaya padi di Turi, Sleman; dan pupuk kandang matang dengan komposisi C Organik 12% dan C/N rasio 15%. Mikro Organisme Lokal (MOL) buatan sendiri (Tabel 1 dan Tabel 2).

**Tabel 1.** Hasil pengujian kandungan N, P dan K total pada MOL

Jenis MOL	Bahan	Parameter	Kandungan (%)
MOL N	Bayam, taugé, air rendaman	N-Total	1,55
		P-Total	0,28
		K-Total	0,42
MOL P	Bonggol pisang, air rendaman	N-Total	2,32
		P-Total	0,07
		K-Total	0,31
MOL K	Limbah teh, air rendaman beras, starter dan gula	N-Total	2,53
		P-Total	0,08
		K-Total	0,21

Sumber: Laporan Hasil Pengujian MOL di Laboratorium Balitbangtan Tahun 2020

**Tabel 2.** Hasil pengujian kandungan N, P dan K total pada Pupuk Anorganik

Jenis Pupuk	Parameter	Kandungan (%)
ZA	N-Total	0,98
	P-Total	0,36
	K-Total	
SP36	N-Total	1,40
	P-Total	0,07
	K-Total	0,21
KCl	N-Total	2,19
	P-Total	0,20
	K-Total	33,81

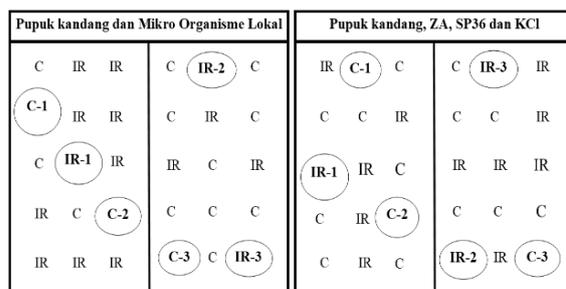
Sumber: Laporan Hasil Pengujian MOL di Laboratorium Balitbangtan Tahun 2020

### Metode

Penelitian ini menggunakan model fisik Nested Design atau dikenal dengan Rancangan Tersarang. Rancangan penelitian terdiri dari 2 faktor, yaitu pemupukan dan varietas.

- 1) Pemupukan
  - P1 : kandang matang dan MOL
  - P2 : kandang matang, ZA, SP36 dan KCl
- 2) Varietas
  - C : Ciherang
  - IR : IR64

Faktor pemupukan (A) mempunyai keragaman yang bebas dan varietas (B) tidak mempunyai keragaman bebas namun keragamannya terletak di dalam faktor A. Masing-masing faktor terdiri dari 2 taraf dan diulang 3 kali. Plot percobaan dapat disajikan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Plot desain rancangan percobaan

Jadwal, jenis dan dosis pemupukan setiap perlakuan disajikan pada Tabel 3 dan Tabel 4.

**Tabel 3.** Jenis dan dosis pupuk perlakuan P1

Umur Tanaman (HST)	Jenis Pupuk	Perbandingan	Dosis (liter/ha)
10		1 : 10	
20	MOL	1 : 8	
30	N	1 : 6	40
40		1 : 5	
45-90	Mol P dan K	1 : 5	

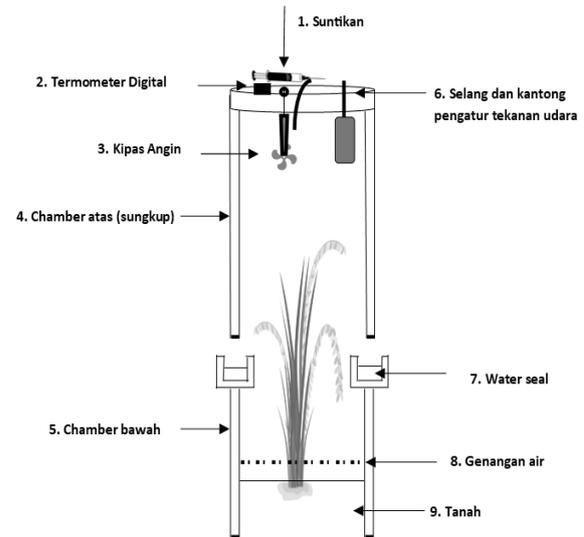
**Tabel 4.** Jenis dan dosis pupuk perlakuan P2

Umur Tanaman (HST)	Jenis Pupuk	Dosis (kg/ha)
10	ZA ; SP36 dan KCl	75 ; 100 ; 50
25	ZA	150
40	ZA dan KCl	75 ; 50

Pada penelitian ini pemindahan bibit dilakukan pada 11 hari setelah semai dengan penanaman satu lubang satu bibit dan jarak tanam 30 x 30 cm. Irigasi yang digunakan, yaitu berselang (*intermittent*) dengan pengaturan tinggi muka air pada 0-40 HST 2 cm di atas permukaan tanah dan -3 cm pada 46-90 HST. Penyiangan dilakukan secara manual menggunakan tangan setiap 10 hari sekali.

Pengambilan sampel gas metana dilakukan setiap dua minggu sekali. *Chamber based* dipasang secara permanen dari awal tanam hingga panen pada setiap sehingga tidak ada perubahan. *Chamber* (sungkup) yang telah dilengkapi dengan termometer, suntikan, kantong tedlar diletakkan pada *chamber*. Kipas angin kemudian dinyalakan selama 1 menit dan sampel gas mulai diambil menggunakan suntikan dilengkapi dengan selang dengan keran 3 arah yang terhubung ke *chamber*.

Sampel gas tersebut dimasukkan ke dalam tabung *vacuum plain* dan ditutup dengan cat kuku. Pengambilan sampel gas dilakukan tiga kali dengan interval waktu 0, 10 dan 20 menit. Sampel gas diambil setiap 14 hari sekali pada pukul 09.00 WIB dari awal tanam hingga akhir panen. Skema alat untuk pengambilan data gas CH<sub>4</sub> dapat dilihat pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Skema alat pengambilan gas CH<sub>4</sub>

Hasil analisis gas metana menggunakan Gas *Chromatography* yang dilengkapi dengan *Flame Ionization Detector* (FID) berupa nilai satuan ppm yang dianalisa di Laboratorium Balai Penelitian Lingkungan Pertanian, Jakenan, Pati. Untuk penentuan fluks emisi gas metana berdasarkan laju perubahan konsentrasi gas per satuan waktu menggunakan Persamaan 1.

$$E = \frac{\delta C}{\delta t} \times h_{ch} \times \frac{mW}{mV} \times \frac{273.2}{273.2+T} \dots\dots (1)$$

Keterangan:

- $E$  = Fluks CH<sub>4</sub> (mg/m<sup>2</sup>/menit)
- $\frac{\delta C}{\delta t}$  = Perbedaan konsentrasi CH<sub>4</sub> per waktu pengambilan (ppm/menit)
- $h_{ch}$  = Tinggi *chamber* (cm)
- $mW$  = Berat molekul CH<sub>4</sub> (g)
- $mV$  = Volume molekul CH<sub>4</sub> (22,41 liter pada suhu dan tekanan standar)
- $T$  = Suhu selama sampling (°C)

Total fluks dihitung dengan menggunakan persamaan Numeric Simpson yang ditunjukkan oleh Persamaan 2.

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{b-a}{6} \left[ f(a) + 4f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b) \right] \dots\dots (2)$$

Keterangan:

a = Waktu awal budidaya padi

b = Waktu akhir budidaya padi

**Model Denitrification Decomposition (DNDC)**

Untuk memodelkan estimasi gas CH<sub>4</sub> dengan menggunakan software DNDC versi 9.5. Parameter data *input* untuk DNDC disajikan pada Tabel 5.

**Tabel 5.** Parameter *input* model DNDC

Tipe	Sub tipe	Satuan
Lokasi	Nama tempat	
	Letak lintang	
Iklim	Curah hujan	mm
	Suhu (min dan maks)	°C
	Konsentrasi N pada air hujan	mg N/liter
	Konsentrasi NH <sub>3</sub> di atmosfer	(µg N/m <sup>3</sup> )
	Konsentrasi CO <sub>2</sub> di atmosfer	ppm
Tanah	Tekstur	%
	Berat jenis	g/cm <sup>3</sup>
	Porositas	
	Permeabilitas	cm/jam
	Kapasitas lapang	
	Titik layu	
	pH	
	C-Organik ( <i>Soil Organic Carbon</i> )	%
	N-Total	%
	Rasio C/N	
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> di permukaan tanah	
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> di permukaan tanah	
	P tersedia	
	K tersedia	
Tanaman	Jenis tanaman	
	Waktu tanam	
	Waktu panen	
	Hasil panen	kg

Pengolahan tanah	Waktu pengolahan	
	Alat	
Pemupukan	Waktu pemupukan	
	Metode pemupukan	
	Jumlah pupuk	kg N/ha
Irigasi	Waktu	
	Jumlah	cm
Penggenangan	Waktu penggenangan awal	
	Waktu penggenangan akhir	

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Kondisi Iklim dan Tanah**

Penelitian ini dilakukan di Kebun Tridharma, Universitas Gadjah Mada, Banguntapan, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta yang terletak pada 7°48'14,7" LS 110°24'48,9"BT. Penelitian dilakukan di dalam *screen net* yang berupa jaring halus dan rapat untuk mengurangi risiko serangan hama dan hewan pengganggu tanaman. Penelitian berlangsung pada 12 Oktober 2020 - 4 Februari 2021. Hasil analisa tekstur tanah yang digunakan dalam penelitian ini yaitu pasir berlempung (*sandy loam*) yang terdiri dari 56% pasir, 24% debu, dan 20% liat dengan porositas tanah sebesar 52,8%. Kapasitas lapang sebesar 30,68% dan titik layu 9,3%. *Monitoring* iklim yang terdiri dari suhu udara, kelembapan udara, radiasi matahari dan curah hujan dari pemasangan sensor disajikan pada Tabel 6.

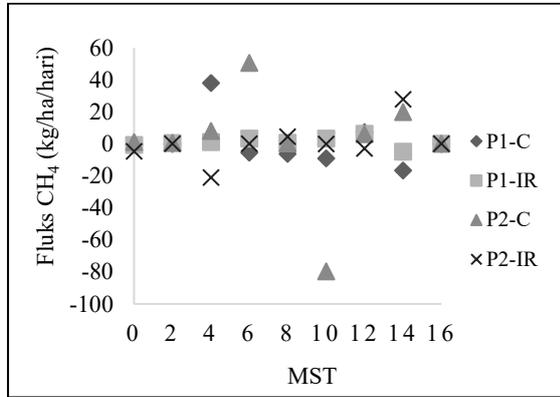
**Tabel 6.** Kondisi iklim mikro di lokasi penelitian

Parameter	T (°C)	RH	Rad. Mthr (W/m <sup>2</sup> )	Curah Hujan (mm)
Min	21,6	44	7,3	-
Maks	38,3	94,7	1032,7	-
Rerata	26,9	80,8	151,3	-
Total	-	-	-	1491

**Fluks Emisi Gas CH<sub>4</sub>**

Fluks merupakan pola perubahan laju gas CH<sub>4</sub> selama satu periode musim tanam. Berdasarkan keempat perlakuan (P1-C, P1-IR, P2-C, dan P2-IR) diperoleh nilai fluks

dan total fluks yang berbeda-beda antar perlakuan. Gambar menunjukkan perubahan laju emisi gas CH<sub>4</sub> dari awal budidaya hingga panen (0-16 MST) pada ke-empat perlakuan menggunakan budidaya metode SRI.



Gambar 3. Fluks CH<sub>4</sub> hasil observasi

Hasil analisa menunjukkan bahwa pola fluks emisi CH<sub>4</sub> semua perlakuan cenderung fluktuatif. Fluks CH<sub>4</sub> tertinggi untuk perlakuan pemupukan kandang dengan MOL pada varietas Ciherang (P1-C) sebesar 37,87 kg/ha/hari ketika umur 4 MST. Pada waktu tersebut tanaman padi memasuki fase vegetatif dengan jumlah anakan semakin banyak, sehingga kerapatan dan jumlah pembuluh aerenkima meningkat yang mengakibatkan kapasitas pengangkutan CH<sub>4</sub> menjadi lebih besar (Aulakh, *et al.*, 2000).

Selain itu, kondisi ini dapat disebabkan adanya penggenangan pada fase vegetatif selama 40 HST dengan kelembapan tanah berkisar antara 0,32 – 0,35 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>. Sedangkan, nilai fluks CH<sub>4</sub> perlakuan P1-C adalah terendah, yaitu sebesar -16,75 kg/ha/hari pada fase pematangan umur 14 MST, saat tersebut terjadi pengeringan lahan hingga panen. Fluks CH<sub>4</sub> yang bernilai negatif menunjukkan adanya proses absorpsi atau penyerapan CH<sub>4</sub> yang berkaitan dengan aktivitas mikroba dan kondisi cuaca.

Pada perlakuan pemupukan yang sama untuk varietas IR-64, pola fluks emisi CH<sub>4</sub> mengalami kenaikan dari fase vegetatif hingga fase generatif dan mencapai puncak tertinggi pada 12 MST sebesar 6,19

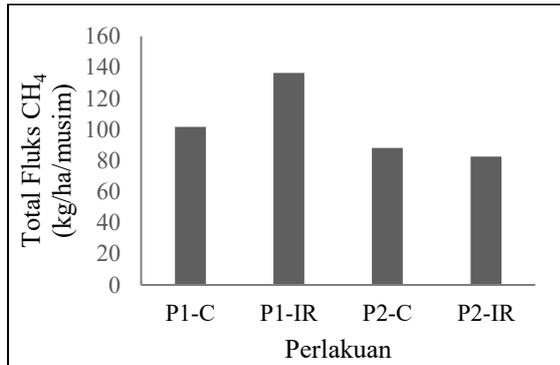
kg/ha/hari. Jika dilihat dari kondisi tanah, pada fase tersebut kelembapan tanah berada pada nilai 0,36 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> dengan pH netral sebesar 6,88. Menurut Wang, *et al.*, (1993), CH<sub>4</sub> optimum diproduksi pada pH mendekati netral. Fluks CH<sub>4</sub> terendah yaitu sebesar -4,49 kg/ha/hari umur 14 MST sama halnya dengan varietas Ciherang. Pola fluks emisi CH<sub>4</sub> pada perlakuan pemupukan P2 varietas Ciherang (P2-C) selama fase vegetatif cenderung meningkat dan puncaknya pada umur 6 MST sebesar 50,48 kg/ha/hari ketika tanaman padi memasuki fase anakan maksimum dengan rata-rata jumlah anakan sebesar 26.

Apabila dilihat dari kondisi tanah, pada umur 6 MST tersebut merupakan masa peralihan dari tergenang ke pengeringan lahan sebelum adanya penurunan tinggi muka air menjadi 3 cm di bawah permukaan tanah. Fluks CH<sub>4</sub> tersebut merupakan nilai tertinggi di antara semua perlakuan. Memasuki fase generative, yaitu saat bunting dan pembungaan pada 10 MST, terjadi proses absorpsi sebesar -79,78 kg/ha/hari. Berbeda dengan perlakuan yang lainnya, pada varietas IR-64 fluks CH<sub>4</sub> tertinggi dicapai pada saat umur 14 MST atau fase pemasakan sebesar 27,89 kg/ha/hari dan terendah -21,08 kg/ha/hari ketika 4 MST. Kondisi lingkungan tanah pada 4 MST dan 14 MST tidak berbeda nyata, ketika umur 4 MST kelembapan tanah yaitu 0,37 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> dan 14 MST 0,38 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>. Jumlah anakan pada 4 MST juga masih mengalami penambahan.

#### Total Fluks Emisi Gas CH<sub>4</sub>

Total fluks emisi CH<sub>4</sub> diperoleh berdasarkan pola perubahan setiap minggu selama satu periode masa tanam padi yang diplotkan pada Gambar 4. Keempat perlakuan menunjukkan bahwa total fluks emisi CH<sub>4</sub> dalam satu musim tanam padi tertinggi yaitu pada perlakuan pemupukan kandang dan MOL (P1) varietas IR-64 sebesar 136,36 kg/ha/musim dan Ciherang yaitu 101,74 kg/ha/musim. Sedangkan pada pemupukan antara kandang matang, ZA, SP36 dan KCl (P2) untuk varietas Ciherang

sebesar 88,09 kg/ha/musim dan IR-64, yaitu 82,58 kg/ha/musim. Hasil tersebut lebih besar dari total fluks emisi CH<sub>4</sub> yang dilaporkan oleh Arif, *et al.*, (2015) pada budidaya padi menggunakan metode SRI varietas Ciherang, yaitu sebesar 35,77 kg/ha/musim.



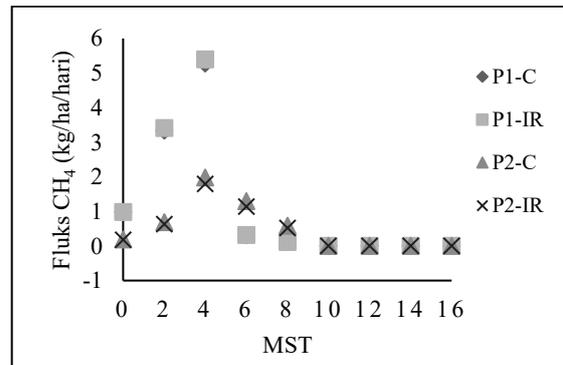
**Gambar 4.** Total fluks CH<sub>4</sub> semua perlakuan berdasarkan hasil observasi

Penelitian menggunakan varietas yang sama dilakukan oleh Yuniarti, *et al.*, (2020) dengan aplikasi pupuk kompos serta tambahan urea, SP36 dan KCl di lahan sawah tadah hujan dengan metode jajar legowo 2 : 1 menghasilkan total emisi sebanyak 153 kg/ha/musim. Total fluks emisi CH<sub>4</sub> varietas Ciherang berdasarkan pengukuran secara langsung di lapangan pada penelitian ini lebih rendah dari metode lain, yaitu jajar legowo 2:1.

Faktor pemupukan menunjukkan hasil total fluks emisi CH<sub>4</sub> yang berbeda, pemupukan kandang, ZA, SP36 dan KCl (P2) menghasilkan total fluks CH<sub>4</sub> lebih rendah dibanding pupuk kandang dan MOL (P1). Apabila dilihat berdasarkan perbedaan pemupukan, perlakuan pemupukan (P2) varietas Ciherang menghasilkan 13,42% dan IR-64 sebesar 39,43% emisi CH<sub>4</sub> lebih rendah dari pemupukan (P1). Sedangkan dari faktor varietas yang berbeda dengan perlakuan pemupukan yang sama, Ciherang menghasilkan emisi CH<sub>4</sub> 25,38% lebih rendah dari IR-64 pada pemupukan (P1) dan varietas IR-64 menghasilkan emisi CH<sub>4</sub> 6,25% lebih rendah dibanding Ciherang untuk perlakuan pemupukan (P2).

### Model Denitrification Decomposition (DNDC)

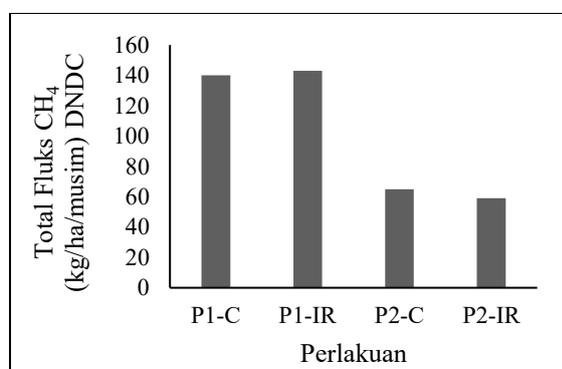
Model DNDC merupakan suatu model yang dikembangkan untuk mensimulasikan siklus biogeokimia C dan N serta emisi gas rumah kaca pada ekosistem padi sawah (Li, *et al.*, 1992). Parameter data input yang dibutuhkan untuk menjalankan model termasuk kondisi iklim (curah hujan, suhu udara), sifat tanah (tekstur, berat jenis, pH, SOC, kandungan nitrat dan amonium), dan praktik manajemen pertanian (pemupukan, irigasi, pengolahan tanah, produksi biomassa). Hasil simulasi fluks emisi CH<sub>4</sub> masing-masing perlakuan selama satu periode musim tanam disajikan pada Gambar 5.



**Gambar 5.** Fluks CH<sub>4</sub> hasil model DNDC

Berdasarkan Gambar 5, terlihat bahwa fluks CH<sub>4</sub> untuk semua perlakuan mengalami peningkatan dari 0-4 MST saat fase vegetatif kemudian mengalami penurunan dari 6-8 MST dan terjadi proses absorpsi pada 10 MST dan 16 MST ketika panen. Puncak emisi dari semua perlakuan (P1-C, P1-IR, P2-C dan P2-IR) terjadi saat umur 4 MST berturut-turut, yaitu 5,27 kg/ha/hari, 5,39 kg/ha/hari, 1,98 kg/ha/hari, dan 1,79 kg/ha/hari. Sedangkan fluks terendah dari semua perlakuan terjadi pada 10 MST (P1-C, P1-IR) sebesar -0,001 kg/ha/hari dan (P2-C, P2-IR) -0,002 kg/ha/hari. Berdasarkan hasil yang diperoleh, DNDC mensimulasikan perubahan pola emisi gas CH<sub>4</sub> yang sama pada semua perlakuan. Dimana puncak emisi terjadi pada 4 MST ketika fase vegetatif atau pertumbuhan anakan,

sehingga berpengaruh juga terhadap eksudat akar yang memungkinkan bakteri metanogen terbentuk (Kludze, *et al.*, 1993). Penurunan fluks emisi CH<sub>4</sub> terjadi pada 6 MST saat terjadi pengeringan dan penurunan tinggi muka air. Pada penelitiannya, Zhao, *et al.*, (2020) menyebutkan bahwa penurunan fluks CH<sub>4</sub> terjadi pada periode aerasi drainase tanah. DNDC menyimulasikan kenaikan Eh tanah ketika oksigen pada tanah merupakan akseptor elektron dominan setelah peristiwa drainase, dengan demikian fluks CH<sub>4</sub> rendah dikarenakan adanya penghambatan produksi CH<sub>4</sub> dan oksidasi CH<sub>4</sub> meningkat.



**Gambar 6.** Total fluks emisi CH<sub>4</sub> model DNDC

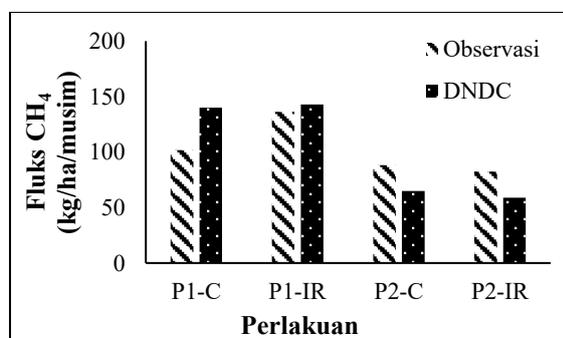
Hasil simulasi menunjukkan bahwa total emisi gas CH<sub>4</sub> dalam satu musim tanam tertinggi, yaitu pada perlakuan pemupukan kandang dan MOL (P1) dari kedua varietas yaitu IR-64 (P1-IR) sebesar 143 kg/ha/musim dan Ciherang (P1-C) 140 kg/ha/musim. Sedangkan pada perlakuan pemupukan kandang, ZA, SP36 dan KCl (P2) dari kedua varietas, yaitu Ciherang (P2-C) sebesar 65 kg/ha/kg/musim dan IR-64 (P2-IR) 59 kg/ha/musim. Berdasarkan hasil simulasi tersebut, dapat dilihat bahwa perlakuan pemupukan yang berbeda pada perlakuan (P2) varietas Ciherang menghasilkan emisi gas CH<sub>4</sub> 53,57% dan IR-64 sebesar 58,74% lebih rendah dibanding perlakuan pemupukan (P1). Sedangkan untuk perlakuan pemupukan yang sama (P1) dengan varietas berbeda menunjukkan bahwa Ciherang menghasilkan emisi gas CH<sub>4</sub> 2,09% lebih rendah dibanding IR-64 P1. Sedangkan

untuk perlakuan pemupukan (P2) varietas IR-64 menghasilkan emisi gas CH<sub>4</sub> 9,23% lebih rendah dibanding varietas Ciherang. Varietas yang berbeda dalam perlakuan pemupukan yang sama menunjukkan selisih total fluks CH<sub>4</sub> yang rendah dibanding dengan perlakuan pemupukan yang berbeda pada varietas yang sama. Hasil simulasi penelitian ini dapat disimpulkan bahwa DNDC tidak spesifik menyimulasikan emisi CH<sub>4</sub> berdasarkan varietas. Babu, *et al.*, (2006) dalam penelitiannya menyebutkan bahwa model DNDC dapat membedakan antara dua varietas jika terdapat data parameter tanaman yang relevan (potensi hasil biomassa: rasio bulir, daun, batang, akar, rasio C/N). Namun, DNDC dapat menyimulasikan emisi CH<sub>4</sub> berdasarkan perlakuan pemupukan. Perlakuan pemupukan kandang dan MOL dari kedua varietas menghasilkan total emisi yang lebih tinggi dibanding pemupukan kandang, ZA, SP36 dan KCl. Hal ini dapat disebabkan oleh perlakuan pemupukan (P2) dengan penambahan ZA yang mengandung ammonium sulfat dapat menghambat pembentukan bakteri metanogen. Le Mer & Roger, (2001) dalam penelitiannya menyebutkan bahwa pada tingkat biokimia, enzim yang mengoksidasi CH<sub>4</sub> mengikat dan bereaksi dengan ammonium. Mekanisme penghambatan CH<sub>4</sub> oleh ammonium ini terjadi ketika ammonium pada tanah jauh berlimpah daripada CH<sub>4</sub> karena metanotrof memiliki afinitas (kecenderungan unsur atau senyawa untuk membentuk ikatan kimia) yang relatif rendah (Yang, *et al.*, 2011). Berbeda pada perlakuan pemupukan (P1) yang menggunakan pupuk kandang dan MOL berbentuk cair, N yang terkandung adalah nitrat. Menurut Cai, *et al.*, (2013), nitrat merupakan pupuk yang mudah hilang melalui pencucian (*leaching*). Wang, *et al.*, (1992) melaporkan bahwa penambahan pupuk berbasis nitrat dapat meningkatkan Eh tanah sebesar 220 mV dan dapat menghambat produksi CH<sub>4</sub>. Namun, efek penghambatan tersebut bersifat jangka pendek karena adanya proses denitrifikasi

yang kuat pada nitrat. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa kedua pupuk nitrogen (nitrat dan ammonium) berkontribusi terhadap pengurangan emisi CH<sub>4</sub> ditingkat yang berbeda. Alasan lain, yaitu penggunaan pupuk nitrogen berbasis nitrat yang digunakan pada penelitian ini berbentuk cair, saat setelah diaplikasikan kemudian terjadi hujan sehingga ada proses *leaching* dan belum dapat terserap secara optimal oleh tanaman padi.

**Perbandingan Total Emisi CH<sub>4</sub> Hasil Observasi dan Simulasi**

Berdasarkan Gambar 7 total fluks hasil observasi dan simulasi membentuk pola atau kecenderungan naik dan turun relatif sama. Namun, jika dilihat dari selisih keduanya, pada perlakuan pemupukan (P1) menunjukkan bahwa hasil simulasi total emisi CH<sub>4</sub> varietas Ciherang 27,32% dan IR-64 4,65% lebih tinggi daripada hasil observasi. Sedangkan pada perlakuan pemupukan (P2), hasil simulasi total emisi CH<sub>4</sub> varietas Ciherang 26,21% dan 28,55% lebih rendah dibanding hasil observasi.



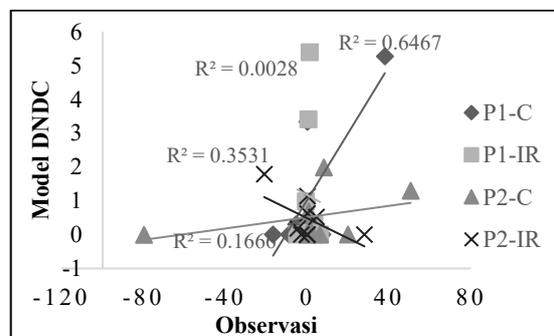
Gambar 7. Total Emisi CH<sub>4</sub> hasil observasi dan model DNDC

**Evaluasi Model**

Model dievaluasi menggunakan koefisien determinasi (R<sup>2</sup>) dan *root mean square error* (RMSE). Hasil uji koefisien determinasi (R<sup>2</sup>) dan nilai RMSE semua perlakuan dalam satu musim disajikan pada Gambar 8 dan Tabel 7.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai R<sup>2</sup> tertinggi berturut-turut dari semua perlakuan P1-C 0,65 P2-IR 0,35 ; P2-C 0,17 dan P1-IR 0,003. Koefisien determinasi

dikatakan kuat apabila nilainya mendekati 1, sehingga pada perlakuan P1-C, hasil simulasi mendekati observasi. Hasil serupa dinyatakan oleh Katayanagi, *et al.*, (2016) dalam penelitiannya yang menyebutkan bahwa hasil simulasi DNDC mendekati observasi dengan nilai R<sup>2</sup> sebesar 0,86. Namun, berbeda dengan perlakuan yang lain, nilai R<sup>2</sup> berada di bawah 0,5 yang mengindikasikan bahwa hasil simulasi jauh dari observasi. Hal ini dapat disebabkan karena perbedaan nilai fluks CH<sub>4</sub> pada hasil observasi memiliki selisih yang besar terhadap simulasi, misalnya pada perlakuan P2-C nilai fluks CH<sub>4</sub> observasi ketika 6 MST, yaitu 50,48 kg/ha/hari, sedangkan simulasi 1,3 kg/ha/hari.



Gambar 8. Hubungan fluks CH<sub>4</sub> hasil observasi terhadap model DNDC

Tabel 7. Nilai R<sup>2</sup> dan RMSE fluks CH<sub>4</sub> antara observasi terhadap model DNDC dalam satu musim

Metode Analisa	Perlakuan			
	P1-C	P1-IR	P2-C	P2-IR
R <sup>2</sup>	0,65	0,003	0,17	0,35
RMSE	13,19	3,55	32,06	12,25

Berdasarkan Tabel 7 terlihat bahwa nilai RMSE terendah dari semua perlakuan secara berurutan, yaitu P1-IR 3,55; P2-IR 12,25; P1-C 13,19 dan P2-C 32,06. Dalam ukuran akurasi, model simulasi dikatakan baik apabila nilai RMSE mendekati 0. Hasil analisis RMSE yang diperoleh hampir dari semua perlakuan menunjukkan nilai yang besar dan jauh dari 0, sehingga dapat dikatakan bahwa akurasi model simulasi terhadap observasi kurang baik. Dalam penelitiannya Babu, *et al.*, (2006)

menyebutkan nilai RMSE yang diperoleh, yaitu sebesar 19,37 dan berpendapat bahwa model DNDC dapat menyimulasikan seluruh fluks CH<sub>4</sub> rata-rata harian, tetapi akurasi tidak sepenuhnya memuaskan.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Total emisi CH<sub>4</sub> tertinggi dihasilkan pada perlakuan pemupukan menggunakan pupuk kandang dan MOL pada varietas IR-64 dan terendah pada perlakuan pemupukan kandang, ZA, SP36 dan KCl varietas IR-64. Model DNDC dapat menyimulasikan total emisi CH<sub>4</sub> berdasarkan perbedaan perlakuan pemupukan, dimana diketahui bahwa perlakuan pupuk kandang, ZA, SP36 dan KCl menghasilkan total emisi CH<sub>4</sub> lebih rendah daripada pupuk kandang, dan MOL. Namun, berdasarkan evaluasi model menggunakan koefisien determinasi (R<sup>2</sup>) dan RMSE untuk rata-rata fluks CH<sub>4</sub> harian menunjukkan bahwa akurasi hasil simulasi terhadap observasi belum cukup baik.

### Saran

Pada penelitian selanjutnya dalam memodelkan estimasi fluks emisi CH<sub>4</sub> sebaiknya dilakukan validasi dengan hasil penelitian serupa yang ada di Indonesia pada lokasi dan budidaya padi metode yang lain.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Deputi Bidang Penguatan Riset dan Pengembangan, Kementerian Riset dan Teknologi/Badan Inovasi Nasional pada Skema Penelitian Tesis Magister Tahun 2020 yang telah memberikan dana penelitian.

## DAFTAR REFERENSI

Abdalla, M., Jones, M., Yeluripati, J., Smith, P., Burke, J., & Williams, M. (2010). Testing DayCent and DNDC model simulations of N<sub>2</sub>O fluxes and

assessing the impacts of climate change on the gas flux and biomass production from a humid pasture. *Atmospheric Environment*, 44(25), 2961–2970. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.05.018>

Arif, C., Setiawan, B. I., Widodo, S., Rudiyanto, Hasanah, N. A. I., Mizoguchi, M. (2015). Pengembangan model jaringan saraf tiruan untuk menduga emisi gas rumah kaca dari lahan sawah dengan berbagai rejim air. *Jurnal Irigasi*, 10 (1), 1–10.

Aulakh, M. S., Bodenbender, J., Wassmann, R., & Rennenberg, H. (2000). Methane transport capacity of rice plants. II. Variations among different rice cultivars and relationship with morphological characteristics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 58(1–3), 367–375. <https://doi.org/10.1023/A:1009839929441>

Babu, Y. J., Li, C., Frolking, S., Nayak, D. R., & Adhya, T. K. (2006). Field validation of DNDC model for methane and nitrous oxide emissions from rice-based production systems of India. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 74(2), 157–174. <https://doi.org/10.1007/s10705-005-6111-5>

Balitbangtan. (2016). Varietas Rendah Emisi Gas Rumah Kaca.

BBPADI. (2019). BBPADI - Top 10 Varietas Padi Tahun 2018.

BPS. (2020). *Badan Pusat Statistik*. pp. 335–358. <https://doi.org/10.1055/s-2008-1040325>

Cai, Z., Shan, Y., & Xu, H. (2007). Effects of nitrogen fertilization on CH<sub>4</sub> emissions from rice fields. *Soil Science and Plant Nutrition*, 53 (4), 353–361.

- <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2007.00153.x>
- Yunianti, I. F., Ningrum, H. Y., & Ariani, M. (2020). Pengaruh Pemberian Variasi Bahan Organik Terhadap Peningkatan Produksi Padi dan Penurunan Emisi Metana (CH<sub>4</sub>) di Lahan Sawah Tadah Hujan. *Jurnal Ecolab*, 14(2), 79–90. <https://doi.org/10.20886/jklh.2020.14.2.79-90>
- Giltrap, D. L., Li, C., & Sagar, S. (2010). DNDC: A process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 136(3–4), 292–300. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.06.014>
- IRRI. (1990). International Rice Research Institute. *Journal of Tropical Ecology*, 6(1), 90. <https://doi.org/DOI:10.1017/S0266467400004065>
- Katayanagi, N., Fumoto, T., Hayano, M., Takata, Y., Kuwagata, T., Shirato, Y., Sawano, S., Kajjura, M., Sudo, S., Ishigooka, Y., & Yagi, K. (2016). Development of a method for estimating total CH<sub>4</sub> emission from rice paddies in Japan using the DNDC-Rice model. *Science of The Total Environment*, 547, 429–440. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.149>
- Kludze, H. K., DeLaune, R. D., & Patrick Jr., W. H. (1993). Aerenchyma Formation and Methane and Oxygen Exchange in Rice. *Soil Science Society of America Journal*, 57(2), 386–391. <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700020017x>
- Le Mer, J., & Roger, P. (2001). Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *European Journal of Soil Biology*, 37(1), 25–50. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1164-5563\(01\)01067-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1164-5563(01)01067-6)
- Li, C., Frohling, S., & Frohling, T. A. (1992). A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 2. Model applications. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D9), 9777–9783. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/92JD00510>
- Rahmat, A., Arif, C., & Chadirin, Y. (2018). *Greenhouse Gas Estimation In Various Water Management Using Denitrification-Decomposition Model (DNDC) : 11–20.*
- Rivera, A., Bravo, C., & Buob, G. (2017). Climate Change and Land Ice. In *International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology*. <https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg0538>
- Schütz, H., Seiler, W., & Conrad, R. (1989). Processes involved in formation and emission of methane in rice paddies. *Biogeochemistry*, 7(1), 33–53. <https://doi.org/10.1007/BF00000896>
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., Howden, M., McAllister, T., Pan, G., Romanenkov, V., Schneider, U., & Towprayoon, S. (2007). Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118(1–4), 6–28. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.06.006>
- Stoop, W. A., Uphoff, N., & Kassam, A. (2002). A review of agricultural

- research issues raised by the system of rice intensification (SRI) from Madagascar: opportunities for improving farming systems for resource-poor farmers. *Agricultural Systems*, 71(3), 249–274. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(01\)00070-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0308-521X(01)00070-1)
- Sutton-Grier, A. E., & Megonigal, J. P. (2011). Plant species traits regulate methane production in freshwater wetland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(2), 413–420. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.11.009>
- Tong, C., Wang, W. Q., Zeng, C. S., & Marris, R. (2010). Methane (CH<sub>4</sub>) emission from a tidal marsh in the Min River estuary, southeast China. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 45(4), 506–516. <https://doi.org/10.1080/10934520903542261>
- Wang, Z. P., DeLaune, R. D., Masscheleyn, P. H., and Patrick, J. W. H. (1993). Soil Redox and pH Effects on Methane Production in a Flooded Rice Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 57(2), 382-385.
- Wang, C., Lai, D. Y. F., Sardans, J., Wang, W., Zeng, C., & Peñuelas, J. (2017). Factors related with CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from a paddy field: Clues for management implications. *PLoS ONE*, 12(1), 1–23. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169254>
- Wang, Z., Delaune, R. D., Lindau, C. W., & Patrick, W. H. (1992). Methane production from anaerobic soil amended with rice straw and nitrogen fertilizers. *Fertilizer Research*, 33(2), 115–121. <https://doi.org/10.1007/BF01051166>
- Wihardjaka, A. (2015). Mitigation of Methane Emission Through Lowland Management. *J. Litbang Pert.* 34(3), 95–104.
- Yang, N., Lü, F., He, P., & Shao, L. (2011). Response of methanotrophs and methane oxidation on ammonium application in landfill soils. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 92(5), 1073–1082. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3389-x>
- Zhao, Z., Cao, L., Deng, J., Sha, Z., Chu, C., Zhou, D., Wu, S., & Lv, W. (2020). Modeling CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission patterns and mitigation potential from paddy fields in Shanghai, China with the DNDC model. *Agricultural Systems*, 178(November 2019), 102743. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2019.10.2743>
- Xunhua, Z., Mingxing, W., Yuesi, W., Renxing, S., Jing, L., Heyer, J., Koegge, M., Papen, H., Jisheng, J., & Laotu, L. (2000). Mitigation Options for Methane, Nitrous Oxide and Nitric Oxide Emissions from Agricultural Ecosystems. *Advances in Atmospheric Sciences*, 17(1), 83–92. <https://doi.org/10.1007/s00376-000-0045-2>