

## Peningkatan Produktivitas Padi Sawah Tadah Hujan Melalui Penerapan Teknologi Adaptif Dampak Perubahan Iklim

*Improving Productivity of Rainfed Lowland Rice Through Applying Adaptive Technology on Climate Change Impact*

Anicetus Wihardjaka\*, Ali Pramono, Mas Teddy Sutriadi

Balai Penelitian Lingkungan Pertanian, Jln. Raya Jakenan-Jaken Km 5 Pati, Jawa Tengah

\*E-mail: awihardjaka@yahoo.co.id; awihardjaka@gmail.com

Diterima 7 Januari 2020, Direview 17 Maret 2020, Disetujui dimuat 26 Mei 2020, Direview oleh Indayati Lanya dan Helena Lina Susilawati

**Abstrak.** Optimalisasi lahan sawah tadah hujan memberikan kontribusi terhadap ketersediaan pangan nasional yang sebagian besar masih dipasok dari lahan optimal sawah beririgasi. Lahan suboptimal sawah tadah hujan berpotensi dalam mendukung ketersediaan pangan nasional. Lahan sawah tadah hujan sangat rentan terhadap dampak perubahan iklim terutama cekaman kekeringan dan serangan organisme pengganggu tanaman. Antisipasi dampak perubahan iklim di lahan sawah tadah hujan dilakukan dengan penerapan teknologi adaptif dan sekaligus sebagai upaya mitigasi gas rumah kaca. Beberapa teknologi adaptif yang berpotensi meningkatkan produktivitas padi sawah tadah hujan adalah penggunaan varietas unggul baru, penentuan waktu tanam dengan kalender tanam, pengelolaan sumberdaya air dengan teknologi embung, pengendalian OPT terpadu dan pengelolaan lahan. Teknologi mitigasi seperti pengairan berselang, penggunaan varietas rendah emisi, penggunaan bahan amelioran, pemupukan secara berimbang, dan integrasi tanaman padi – ternak efektif menurunkan emisi gas rumah kaca di lahan sawah tadah hujan. Integrasi tanaman pangan-ternak bebas limbah merupakan salah satu upaya mensinergiskan aksi adaptasi dan aksi mitigasi terhadap perubahan iklim di ekosistem lahan sawah tadah hujan.

*Kata kunci: Adaptasi / emisi / gas rumah kaca / mitigasi / sawah tadah hujan*

**Abstract.** Optimization of rainfed lowland rice contributes on national food availability which is still generally supplied from irrigated lowland rice. The sub-optimal rainfed lowland is quite susceptible to climate change impacts, especially drought stress and incidence of pests and diseases. Anticipating climate change impacts in rainfed lowland are approached by applying adaptive technology as well as greenhouse gase mitigation. Some adaptive technologies which potentially increase rainfed rice productivity are new superior varieties, cropping calendar for determining planting time, water resources management with small water reservoir, and integrated pests and diseases control. Some mitigation technologies such as intermittent irrigation, high yielding varieties with low emissions, ameliorant materials use, balanced fertilization, and integrated food crop-livestock reduce effectively greenhouse gas emissions in rainfed lowland rice areas. Integrated food crops-livestock with zero waste systems is one of synergic efforts between adaptation and mitigation actions on climate change impacts in ecosystems of rainfed lowland rice.

*Key words: Adaptation / emission / greenhouse gas / mitigation / rainfed lowland*

### PENDAHULUAN

Lahan sawah mempunyai peran vital dalam pemenuhan kebutuhan pangan nasional. Lahan sawah seluas 8.114.829 hektar berdasarkan data BPS tahun 2014 (Sains Indonesia 2017) harus mampu memenuhi kebutuhan pangan bagi sebagian besar penduduk Indonesia yang masih tergantung pada beras. Lahan sawah sebagai penopang bahan pangan utama dipandang sebagai sumber emisi gas rumah kaca (GRK) dan rentan terhadap dampak perubahan iklim, seperti serangan organisme

pengganggu tanaman (OPT), banjir, salinitas atau intrusi air laut, dan cekaman kekeringan terutama di lahan sawah tadah hujan. Berdasarkan peran strategisnya, lahan sawah juga memiliki peran penting dalam antisipasi perubahan iklim melalui upaya adaptasi dan mitigasi emisi gas rumah kaca. Perubahan iklim disebabkan oleh pemanasan global akibat peningkatan konsentrasi gas rumah kaca antropogenik (Ramanathan dan Feng 2009).

Aktivitas manusia secara nyata mempertinggi konsentrasi global GRK di atmosfer. Konsentrasi CO<sub>2</sub> di atmosfer meningkat dari 280 ppm pada era pra

industri menjadi 379 ppm pada tahun 2005, bahkan kini telah melebihi 400 ppm (Guardian 2015; Ritchie dan Roser 2019). Konsentrasi  $\text{CH}_4$  juga mengalami peningkatan dari 715 ppb (era pra industri) menjadi 1774 ppb (tahun 2005), dan konsentrasi  $\text{N}_2\text{O}$  meningkat dari 270 ppb (era pra industri) menjadi 319 ppb (tahun 2005) (Sutamihardja 2009). Peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer merupakan penyebab pemanasan global dan perubahan iklim. Perubahan iklim dapat menjadi ancaman yang serius terhadap pencapaian swasembada pangan di Indonesia. Kegiatan pertanian berkontribusi terhadap peningkatan GRK, yaitu metana ( $\text{CH}_4$ ) dan dinitrogen oksida ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Sektor pertanian memberikan kontribusi sebesar 4-6% dari total emisi GRK nasional (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan 2017). Dengan pengelolaan tanah dan tanaman yang tepat, emisi GRK dari lahan sawah dapat ditekan dan produktivitas tanah dan tanaman dapat meningkat. Teknologi adaptasi dan mitigasi GRK perlu dilakukan untuk meningkatkan ketangguhan (resiliensi) petani dalam menghadapi perubahan iklim.

Perubahan iklim selalu menjadi perhatian serius masyarakat internasional, regional, dan nasional. Protokol Kyoto yang dihasilkan dalam sidang konferensi para pihak (COP) ke-3 tahun 1997 di Kyoto, Jepang mewajibkan negara-negara anggota Annex 1 untuk mereduksi emisi GRK berkisar 6-8% di bawah tingkatan emisi 1990. Sidang COP ke-21 tahun 2015 di Paris telah menghasilkan *Paris Agreement* dan Indonesia telah meratifikasi melalui Undang-Undang nomor 16 tahun 2016 tentang “pengesahan paris agreement to the united nations framework convention on climate change”. Dalam *Paris agreement*, mitigasi dan adaptasi merupakan dua aspek kegiatan yang digunakan sebagai instrumen utama dalam menangani dampak perubahan iklim (Undang Undang No. 16 tahun 2016).

Sebagai negara yang terkena dampak perubahan iklim, Indonesia memberikan perhatian serius untuk mengantisipasi dampak perubahan iklim melalui aksi adaptasi dan mitigasi. Upaya adaptasi di sektor pertanian tidak dapat efektif bilamana tanpa disertai upaya mitigasi (Sutamihardja dan Mulyani 2011). Indonesia telah berkomitmen menurunkan emisi gas rumah kaca sebesar 26% secara mandiri dan 41% dengan kerjasama luar negeri pada tahun 2020. Komitmen tersebut diperkuat dengan diterbitkannya Peraturan Presiden nomor 61 tahun 2011 tentang rencana aksi nasional penurunan emisi gas rumah kaca

dan Peraturan Presiden nomor 71 tahun 2011 tentang penyelenggaraan inventarisasi gas rumah kaca.

Tulisan ini bertujuan memberikan gambaran ketersediaan teknologi rendah emisi gas rumah kaca yang adaptif di agroekologi lahan sawah tadah hujan yang dapat diterapkan untuk mengoptimalkan lahan sawah tadah hujan sekaligus menurunkan konsentrasi GRK di atmosfer.

## LAHAN SAWAH SUMBER EMISI GRK

Pemanasan global mengakibatkan perubahan iklim yang berdampak nyata terhadap sektor pertanian, antara lain: penurunan produktivitas tanaman pangan, perubahan pola serangan organisme pengganggu tanaman, fluktuasi ketersediaan air irigasi, kehilangan areal pertanaman, dan peningkatan kejadian iklim ekstrim (banjir dan kekeringan). Perubahan iklim menurunkan produktivitas tanaman pangan, yaitu turun sebesar 20% pada kedelai, 40% pada jagung, dan 2,5% pada padi (ADB 1994 dalam Sutamihardja dan Mulyani 2011).

Sektor pertanian merupakan sumber emisi gas rumah kaca terutama karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), metana ( $\text{CH}_4$ ), dan dinitrogen oksida ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Emisi GRK dari sektor pertanian bersumber pada budidaya padi sawah, peternakan, pembakaran biomassa, pengelolaan limbah/kotoran ternak, dan tanah pertanian (Kumar dan Viyol 2009). Sumber utama emisi terbesar dari sektor pertanian adalah lahan sawah,  $\text{N}_2\text{O}$  dari tanah, dan peternakan masing-masing sebesar 46,2; 28,1; dan 19,2% (Balitbangtan 2011). Total emisi GRK dari sektor pertanian adalah 75.420 Gg dan meningkat menjadi 80.179 Gg  $\text{CO}_2\text{-e}$  (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan 2017).

Tanah sawah merupakan salah satu sumber emisi GRK terutama metana ( $\text{CH}_4$ ) dan dinitrogen oksida ( $\text{N}_2\text{O}$ ), dimana  $\text{CH}_4$  dihasilkan dari dekomposisi bahan organik secara anaerobik dengan bantuan mikroba metanogen (Frei *et al.* 2007), dan  $\text{N}_2\text{O}$  dihasilkan dari proses nitrifikasi dan denitrifikasi dalam tanah sawah (Majumdar 2003). Emisi  $\text{N}_2\text{O}$  dari lahan sawah meningkat dengan tingginya takaran pupuk nitrogen (Weller *et al.* 2015). Hal tersebut dikarenakan produksi  $\text{N}_2\text{O}$  dipicu oleh kondisi hara N berlebihan dalam tanah pada kondisi tidak jenuh air (Sander *et al.* 2014).

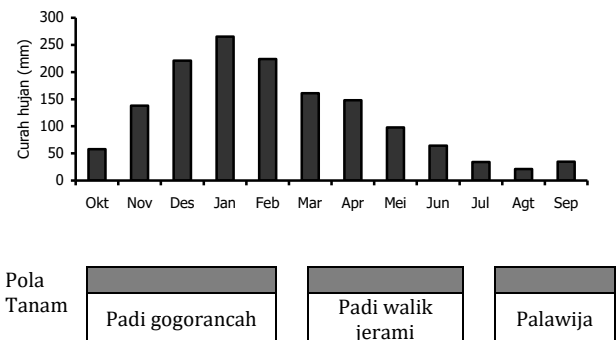
Lahan sawah tadah hujan potensial dioptimalkan pemanfaatannya untuk menjamin pemenuhan kebutuhan pangan nasional. Luas lahan sawah tadah hujan di Indonesia mencapai 3,71 juta hektar (45,7 % dari total lahan sawah), yang tersebar di Jawa, Nusa Tenggara, Sumatera, Kalimantan, dan Sulawesi (Kasno *et al.* 2016). Berbagai kendala lahan sawah tadah hujan, antara lain kesuburan tanah rendah, ketersediaan air dari curah hujan tidak menentu, rentan terhadap cekaman kekeringan perlu diperbaiki melalui penerapan teknologi yang mampu mengungkit produktivitas tanaman (aksi adaptasi perubahan iklim) dan tentunya juga sebagai upaya mitigasi emisi GRK. Produktivitas padi sawah tadah hujan relatif rendah, yaitu rata-rata 3,0-3,5 t/ha (Widyantoro dan Toha 2010; Balingtan 2015).

Pengelolaan lahan sawah baik sawah optimal maupun suboptimal yang tidak tepat dapat mempertinggi emisi GRK. Pengelolaan lahan sawah diperlukan melalui penerapan teknologi adaptasi yang bersinergi dengan teknologi mitigasi untuk memperoleh produktivitas tanaman tinggi sekaligus sebagai upaya penurunan emisi GRK.

### UPAYA ADAPTASI DI LAHAN TADAH HUJAN

Cekaman kekeringan sering terjadi pada pertanaman padi sawah tadah hujan. Cekaman kekeringan menjadi salah satu tantangan dalam upaya meningkatkan produktivitas tanaman padi sawah tadah hujan. Upaya adaptasi terhadap dampak perubahan iklim di lahan tadah hujan dilakukan dengan inovasi teknologi adaptif seperti penggunaan varietas padi umur genjah, varietas padi toleran kekeringan, teknologi panen air hujan, teknologi surjan, dan penerapan pola tanam yang mensiasati ketidakmenentuan curah hujan. Adaptasi adalah kemampuan organisme (manusia, ternak, tanaman) untuk menyesuaikan diri dengan perubahan lingkungan, baik bersifat mikro maupun makro, baik langsung maupun tidak langsung akibat perubahan iklim agar tetap dapat menjalankan fungsi biologis secara wajar (Balitbangtan 2011). Aksi adaptasi perubahan iklim merupakan upaya minimalisasi dampak perubahan iklim melalui perbaikan sistem dengan penerapan teknologi adaptif. Gambar 1 memperlihatkan pola tanam yang umum di lahan sawah tadah hujan di Jawa Tengah, yaitu padi

gogorancah (musim penghujan) diikuti padi sawah dengan olah tanah minimum atau dikenal padi walik jerami (awal musim kering) diikuti tanaman palawija (musim kering).



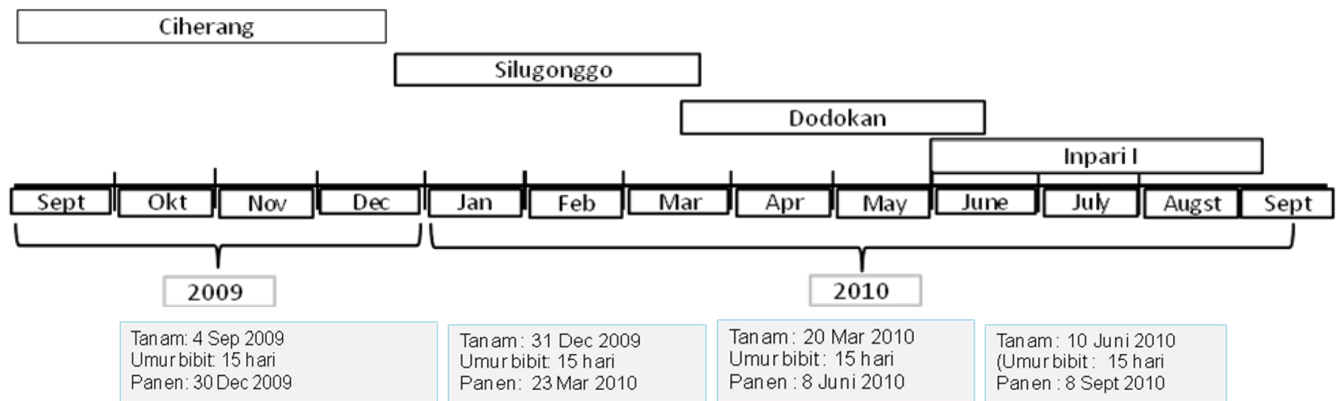
Gambar 1. Penerapan pola tanam di lahan sawah tadah hujan berdasarkan rerata curah hujan 2004-2016 di Kabupaten Pati, Jawa Tengah (Sumber: Fagi *et al.* 2015)

Figure 1. Application of cropping patterns in rainfed paddy fields based on average rainfall 2004-2016 in Pati Regency, Central Java (Source: Fagi *et al.* 2015)

Secara kelembagaan program adaptasi tersebut diarahkan untuk pengembangan sistem informasi seperti sekolah lapang iklim, sistem penyuluhan dan kelompok kerja (pokja) variabilitas dan perubahan iklim sub sektor pertanian serta pengembangan sistem asuransi pertanian akibat risiko iklim (*crop weather insurance*). Teknologi adaptasi yang telah dan akan terus dikembangkan dalam menghadapi perubahan iklim di lahan sawah tadah hujan.

### Penggunaan Varietas Padi Unggul Baru

Pemerintah telah merilis varietas padi unggul yang dapat menjadi pilihan petani dalam berbudidaya di lahan sawah tadah hujan dengan potensi produksinya yang tinggi, toleran terhadap serangan hama dan penyakit tertentu, atau tahan kekeringan, genangan, dan salinitas dan lain-lain. Beberapa varietas berumur genjah (misal Ciherang, Silugonggo, Inpari 1) dan pendek (Dodokan) dengan dukungan air embung dapat meningkatkan indeks pertanaman seperti terlihat pada Gambar 2. Dengan pengaturan air dari embung dan penggunaan varietas genjah dan/atau umur pendek, Balingtan telah menerapkan indeks pertanaman padi empat kali setahun. Varietas Silugonggo merupakan salah satu varietas toleran kekeringan yang cocok ditanam di ekosistem sawah



Gambar 2. Rekomendasi varietas umur genjah dan pendek yang sesuai dengan agroekologi lahan sawah tadah hujan (Sumber: Balingtan 2010)

Figure 2. Recommendation for early and short age rice varieties suitable for agroecology of rainfed lowland (Source: Balingtan 2010)

tadah hujan. Kementerian Pertanian juga telah melepas varietas unggul baru untuk agroekosistem tadah hujan, antara lain Inpari 38, Inpari 39, Inpari 40, dan Inpari 41.

Varietas padi amfibi dapat diterapkan di lahan sawah tadah hujan sebagai upaya adaptasi perubahan iklim. Varietas padi amfibi adalah varietas padi yang toleran terhadap kekeringan dan tahan terhadap kondisi tanah tergenang. Beberapa varietas padi amfibi dengan potensi hasil gabah terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Potensi hasil gabah dari beberapa varietas padi amfibi

Table 1. Potential grain yields of several amphibian rice varieties

No.	Varietas	Umur (hss)	Potensi hasil (t/ha)
1	Limboto	125	6,0
2	Batutegi	120	6,0
3	Towuti	115	7,0
4	Situ Patenggang	120	6,0
5	Situ Bagendit	120	6,0
6	Inpari 10 Laeya	112	7,0
7	Inpago 4	124	6,1
8	Inpago 5	118	6,2
9	Inpago 6	118	6,2
10	Inpago 7	111	7,4
11	Inpago 8	119	8,1
12	Inpago 9	109	8,4

Sumber: Balitbangtan (2015), hss = hari setelah sebar

### Penggunaan Kalender Tanam Terpadu untuk Penentuan Waktu Tanam

Kalender tanam (Katam) terpadu yang sudah dirilis oleh Balitbangtan merupakan teknik penentuan

waktu tanam untuk wilayah per kecamatan. Penentuan waktu tanam yang tepat diperlukan sebagai antisipasi terlambat tanam yang sering terjadi di ekosistem sawah tadah hujan. Katam bersifat dinamis, selalu diperbaharui, dan telah memadukan informasi waktu tanam, varietas padi-jagung, dosis pupuk, kebutuhan benih, alat mesin pertanian dan peternakan yang dianjurkan.

### Pengelolaan Sumberdaya Air

Teknologi ini meliputi identifikasi potensi ketersediaan air, teknologi panen hujan dan aliran permukaan melalui pembuatan embung/tandon air, teknologi prediksi curah hujan dan teknologi irigasi. Teknologi embung dapat meningkatkan indeks pertanaman di lahan tadah hujan terutama menyelamatkan padi musim tanam kedua dari risiko kekeringan dan meningkatkan produktivitas tanaman palawija pada musim tanam ketiga seperti jagung, kacang hijau atau kacang tunggak. Besarnya dimensi embung menentukan kapasitas tampungan air dan pemanfaatan panen air seperti terlihat pada Tabel 2.

Kebutuhan air bagi pertumbuhan tanaman pangan di lahan tadah hujan adalah krusial, sehingga kontribusi air dari embung berperan penting untuk menyelamatkan hasil tanaman. Jumlah air dari curah hujan yang dibutuhkan padi sawah di lahan tadah hujan berkisar 183-366 mm/bulan dengan mempertimbangkan laju evapotranspirasi rata-rata berkisar 3-7 mm/hari dan laju perkolasi rata-rata 1-2 mm/hari. Batas terendah kebutuhan air dari curah

hujan untuk padi sawah adalah > 200 mm/hari (Fagi dan Las 1992). Tanaman palawija membutuhkan air dari curah hujan di lahan tadah hujan berkisar 146-293 mm/bulan dengan laju evapotranspirasi rata-rata berkisar 90-200 mm/bulan. Kebutuhan air dari curah hujan untuk tanaman palawija adalah 100 mm/bulan (Fagi dan Las 1992).

Tabel 2. Dimensi embung dan kapasitas layanan

Table 2. Dimensions of reservoir and service capacity

Ukuran embung	Dimensi embung (m)	Volume tampungan (m <sup>3</sup> )	Kapasitas layanan irigasi (ha)
Kecil	P=25, L=25, D=3	1.875	1
Sedang	P=50, L=50, D=4	10.000	5
Besar	P=100, L=100, D=4	40.000	20

Sumber: Kartiwa *et al.* (2017)

Keterangan: P = panjang, L = lebar, D = dalam

### Pengendalian OPT Terpadu

Pengendalian organisme pengganggu tanaman (OPT) berwawasan lingkungan dilakukan dengan pengendalian hayati berbasis sumberdaya lokal seperti penggunaan pestisida nabati berbahan baku dari mimba, mahoni, kunyit, mindi, gulma babadotan, urin sapi, dsb. atau menggunakan agensia hayati, pemanfaatan musuh alami misalnya burung hantu untuk pengendalian hama tikus, dan pergiliran tanaman. Tumbuhan tertentu mengandung metabolit sekunder senyawa fitokimia seperti eugenol, alkaloid, polifenol, tanin, dan saponin yang berfungsi sebagai racun bagi hama dan penyakit tanaman (pestisida nabati) (Tampubolon *et al.* 2018). Pestisida nabati mampu bersifat mencegah, mengusir, repellent, memerangkap, menghambat pertumbuhan, sporulasi dan rigumentasi, menurunkan bobot badan dan aktivitas hormonal, mengganggu komunikasi, pergantian kulit, menimbulkan tekanan sampai kematian (Baharuddin 2015). Pencegahan serangan OPT dilakukan dengan aplikasi pestisida nabati atau agensia hayati secara rutin. Bilamana serangan OPT bersifat masif, pestisida kimia diberikan sesuai dosis anjuran dan dipilih pestisida kimia yang relatif mudah terdekomposisi dalam tanah. Pengendalian OPT secara terpadu dapat mengurangi akumulasi residu pestisida yang lambat terurai dalam tanah (Rao *et al.* 2015).

### Teknologi Pengelolaan Sumberdaya Lahan/Tanah

Prinsip pemupukan berimbang adalah penggunaan pupuk anorganik dan organik sesuai kebutuhan bagi pertumbuhan tanaman. Pupuk anorganik yang digunakan tidak hanya pupuk nitrogen tetapi perlu diimbangi dengan pemberian pupuk fosfat, kalium, hara lain jika menjadi faktor pembatas kesuburan tanah. Pemberian pupuk organik diperlukan untuk meningkatkan efisiensi serapan hara yang berasal dari pupuk anorganik, selain memperbaiki kesuburan fisik, kimia, dan hayati tanah. Pemberian pupuk harus mempertimbangkan jenisnya, jumlah atau dosisnya serta waktu pemberian, yang didasarkan atas hasil uji atau analisis tanah di laboratorium (Hartatik *et al.* 2015).

Optimalisasi lahan tadah hujan memerlukan masukan yang efisien, maka petani sebaiknya menggunakan kompos (kotoran hewan/binatang ternak yang telah matang) untuk meningkatkan kandungan bahan organik dalam tanah, memupuk berdasarkan status hara tanah dengan perangkat uji tanah sawah (PUTS) dan bagan warna daun (BWD) terutama pada pemberian pupuk N susulan. Penggunaan BWD di lahan sawah dapat menghemat pupuk N anorganik sekitar 15-20% dari takaran umum tanpa menurunkan hasil gabah (Erythrina 2016). Dekomposer digunakan untuk mempercepat pengomposan sisa tanaman yang tidak terangkut dari lahan. Pengomposan dengan cara ini disebut pengomposan *in situ*. Sisa jerami dikumpulkan dan diberi dekomposer, ditutup dan dibiarkan/diinkubasi selama 3 minggu. Pengomposan *in situ* merupakan alternatif pengelolaan jerami untuk menghindari pelepasan karbon melalui pembakaran sisa biomassa tanaman tersebut.

Konsep pemberian hara secara berimbang pada tanaman padi bahwa keperluan hara tanaman dapat diduga melalui serapan hara NPK secara optimal. keseimbangan hara optimal dalam tanaman padi berdasarkan hasil penelitian di enam negara di Asia dicapai pada 14,7 kg N, 2,6 kg P dan 14,5 kg K per ton hasil biji (N:P:K = 5,7:1:5,6) (Dobermann dan Witt 2004 dalam Juwita dan Yustisia 2018). Menurut Makarim (2006), hasil penelitian di 113 lokasi sawah irigasi di pulau Jawa dan Bali menunjukkan bahwa serapan hara NPK optimal dicapai pada 18,8 kg N, 2,4 kg P dan 16,2 kg K per ton hasil biji. Selanjutnya Juwita dan Yustisia (2018) menyatakan bahwa serapan hara tersebut valid sampai pada titik target hasil 80% hasil potensial.

## UPAYA MITIGASI EMISI DI LAHAN TADAH HUJAN

Upaya mitigasi merupakan upaya mengurangi dan/atau memperlambat terjadinya perubahan iklim melalui penurunan emisi GRK dan peningkatan serapan GRK. Menurut Balitbangtan (2011), mitigasi adalah usaha untuk menurunkan emisi dan/atau meningkatkan serapan GRK dari berbagai sumber emisi, dalam upaya pengendalian atau pengurangan dampak perubahan iklim. Strategi mitigasi emisi GRK untuk mengurangi konsentrasi GRK dari lahan sawah tadah hujan didasarkan atas beberapa hasil penelitian yang dilakukan Balai Penelitian Lingkungan Pertanian dan beberapa Balai Penelitian lingkup Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Beberapa upaya mitigasi GRK dari lahan sawah antara lain adalah teknologi pengairan berselang, varietas padi beremisi rendah, ameliorasi di lahan sawah, teknologi pemupukan yang efisien, sistem integrasi tanaman dan ternak.

### Teknologi Pengairan Berselang (*Intermittent Irrigation*)

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 melakukan respirasi dan mikroorganisme penyubur tanah dapat beraktivitas dalam meningkatkan kesuburan tanah.

Curah hujan eratik mendorong sebagian petani menerapkan teknologi panen air dengan membuat embung, dimana air tertampung dalam embung digunakan untuk mengairi padi kedua fase generatif dan tanaman palawija di musim kering. Pada padi ke-2, petani umumnya menggunakan sistem pengairan berselang pada fase vegetatif tanaman. Pengaturan air selain berpengaruh terhadap hasil padi juga berpengaruh pada besarnya emisi gas CH<sub>4</sub>. Kondisi tanah tergenang menstimulasi emisi gas CH<sub>4</sub> lebih tinggi daripada kondisi tanah kering. Hal ini disebabkan kondisi tergenang merupakan kondisi yang ideal untuk bakteri metanogen dalam melakukan aktivitas metabolismenya untuk menghasilkan gas CH<sub>4</sub> (Khan dan Zargar 2013). Penggenangan sawah secara

terus-menerus umum dilakukan oleh petani hingga menjelang panen, meskipun tanaman padi tidak selalu membutuhkan kondisi tergenang selama pertumbuhannya. Tanah pada kondisi tergenang (anaerob) merupakan kondisi ideal bagi perkembangan dan aktivitas bakteri pembentuk CH<sub>4</sub> dan berpengaruh terhadap reduksi-oksidasi tanah. Gas CH<sub>4</sub> akan terbentuk pada kondisi tanah reduktif dengan potensial redoks -150 sampai -200 mV (Wang *et al.* 1993; Setyanto dan Abubakar 2005). Pada kisaran potensial redoks tersebut mikroorganisme pembentuk CH<sub>4</sub> (metanogen) aktif melakukan metabolismenya.

Tabel 3. Pengaruh rejim air terhadap emisi GRK dan hasil gabah varietas Ciherang di tanah sawah *Vertic Endoaquepts* di Pati, Jawa Tengah, MK 2012

Table 3. Effect of water regime on GHG emissions and grain yield of Ciherang varieties in *Vertic Endoaquepts* paddy soils in Pati, Central Java, MK 2012

Rejim air	Fluk metana (kg CH <sub>4</sub> /ha/musim)	Fluk N <sub>2</sub> O (kg N <sub>2</sub> O/ha /musim)	Hasil gabah KA 14% (t/ha)
Pengairan tergenang	139 a	1,33 a	3,94 a
Pengairan berselang	55 b	1,45 a	3,67 a

Angka dalam lajur sama diikuti huruf sama tidak berbeda nyata menurut uji beda nyata terkecil 5%; KA = kadar air

Sumber: Kartikawati dan Nursyamsi (2013)

Upaya menekan besarnya emisi gas CH<sub>4</sub> dari sistem pengairan selain dapat menurunkan emisi gas CH<sub>4</sub> juga dapat menghemat penggunaan air yang berlebihan. Hasil penelitian Setyanto dan Kartikawati (2008), metode pengairan terputus mereduksi metana hingga 62,6% dibandingkan cara tergenang, sedangkan irigasi berselang dapat mereduksi 46,5%. Penerapan pengairan berselang memberikan hasil gabah tidak berbeda nyata dengan pengairan tergenang pada tanah sawah Inceptisol (Tabel 3). Pengairan berselang juga meningkatkan hasil padi sebesar 5-9% dibandingkan dengan perlakuan tergenang (Pramono *et al.* 2015). Pengairan berselang umumnya diterapkan pada fase vegetatif tanaman padi, sedangkan air dipertahankan jenuh atau macak-macak pada fase generatif untuk pengisian bulir gabah hingga menjelang dipanen. Hasil penelitian Pramono *et al.* (2015) melaporkan bahwa pengairan berselang dapat menurunkan emisi CH<sub>4</sub>

masing-masing sebesar 57% (padi walik jerami) dan 63% (padi gogorancah) pada lahan petani tanpa sistem konvensional (tanpa pengelolaan tanaman terpadu), dan dapat menurunkan emisi  $\text{CH}_4$  masing-masing sebesar 13% (padi walik jerami) dan 52% (padi gogorancah) pada lahan petani yang menerapkan sistem pengelolaan tanaman terpadu.

### Varietas Padi Rendah Emisi

GRK utama yang dilepaskan melalui tanaman padi adalah metana ( $\text{CH}_4$ ) dan dinitrogen oksida ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Sekitar 90% gas  $\text{CH}_4$  dilepaskan melalui pembuluh aerenkima tanaman. Namun kemampuan dalam melepaskan gas  $\text{CH}_4$  berbeda-beda tergantung karakteristik varietas padi seperti sifat, umur, aktivitas akar, kehadiran mikroba di rizosfer misal bakteri metanogen dan metanotrop yang menentukan jumlah  $\text{CH}_4$  yang diemisikan (Dubey 2005). Padi yang mempunyai jumlah anakan lebih banyak cenderung mempunyai jumlah aerenkima tinggi yang berpengaruh terhadap besarnya emisi gas  $\text{CH}_4$  (Setyanto dan Kartikawati 2008). Emisi  $\text{CH}_4$  juga tergantung pada umur tanaman. Varietas berumur dalam menghasilkan emisi gas  $\text{CH}_4$  lebih tinggi daripada umur genjah atau pendek dalam siklus hidup tanaman padi tersebut. Periode tumbuh tanaman yang relatif lama akan memperbanyak eksudat dan biomassa akar sehingga emisi gas  $\text{CH}_4$  relatif menjadi tinggi (Wihardjaka 2015). Komponen utama eksudat akar adalah senyawa organik yang mengandung gula, asam amino dan asam organik yang dimanfaatkan bakteri penghasil gas  $\text{CH}_4$  sebagai substrat dan sumber karbon (Yuan *et al.* 2014).

Sifat morfologi dan fisiologi varietas padi menentukan besarnya emisi gas rumah kaca terutama metana. Terlihat pada Tabel 4, beberapa varietas unggul inbrida menghasilkan emisi GRK relatif rendah, antara lain Inpari 13, Membramo, Way Apo Buru dan Cigeulis berdasarkan indeks emisi yang merupakan perbandingan besarnya emisi yang dilepaskan setiap bobot gabah yang dihasilkan. Informasi emisi GRK pada varietas padi unggul hibrida relatif masih terbatas.

Perakaran tanaman yang makin banyak dan merata menyebabkan distribusi eksudat makin besar pula ke dalam tanah. Pembentukan gas  $\text{CH}_4$  tidak terlepas dari kemampuan akar sebagai pengoksidasi dalam tanah. Varietas-varietas yang memiliki kapasitas pengoksidasi akar yang baik mempunyai potensi

menekan emisi  $\text{CH}_4$ . Melalui kapasitas pengoksidasi akar tersebut, pertukaran gas akan terjadi dan menyebabkan peningkatan konsentrasi gas  $\text{O}_2$ , sedangkan konsentrasi  $\text{CH}_4$  akan teroksidasi secara biologi oleh bakteri metanotropik (Johnson *et al.* 2007).

Tabel 4. Emisi  $\text{CH}_4$  dan hasil gabah aktual dari beberapa varietas unggul inbrida di ekosistem lahan tadah hujan di Jawa Tengah

Table 4.  $\text{CH}_4$  emissions and actual grain yields of some inbred superior varieties in rainfed ecosystems in Central Java

Varietas unggul	Emisi metana (kg $\text{CH}_4$ /ha/musim)	Hasil gabah kering giling (t/ha)
Memberamo	159	5,66
IR64	256	5,71
Situ Bagendit	243	5,16
Ciherang	205	6,15
Way Apoburu	182	5,59
Inpari 13	155	5,29
Cibogo	247	6,10
Cigeulis	193	6,09
Mekongga	203	5,93
Ciliwung	457	5,77

Sumber: Pramono *et al.* (2015)

### Ameliorasi Lahan Sawah

Ameliorasi adalah pemberian bahan amelioran yang bertujuan untuk meningkatkan kesuburan tanah melalui perbaikan sifat fisik, kimia, hayati tanah, dan potensial menekan emisi GRK. Beberapa bahan amelioran dapat digunakan dalam budidaya tanaman pangan, antara lain: dolomit, kaptan, zeolit, pupuk kandang, dan abu sekam. Bahan amelioran juga mudah diperoleh dari lingkungan sekitarnya seperti pemanfaatan limbah rumah tangga (limbah teh, kopi), rimpang kunyit dan gulma.

Beberapa bahan amelioran alami dapat digunakan sebagai penghambat nitrifikasi (*nitrification inhibitor*). Beberapa bahan tanaman dapat berfungsi sebagai zat penghambat nitrifikasi, antara lain: gulma babandotan (*Ageratum conyzoides*), kunyit (*Curcuma domestica* Val.), daun randu (*Ceiba pentandra* Gaertn.), bakau (*Rhizophora conjugata* Linn.), mimba (*Azadirachta indica*), dan belimbing wuluh (*Averrhoa bilimbi* L.). Penggunaan biji mimba (20 kg/ha) dapat menurunkan fluks  $\text{N}_2\text{O}$  sebesar 48,9 % di lahan sawah tadah hujan

(Wihardjaka, 2011). Hasil penelitian Kartikawati dan Nursyamsi (2013) menunjukkan bahwa penggunaan gulma *Ageratum* yang dikombinasikan dengan pupuk NPK (100% NPK) dapat menekan emisi N<sub>2</sub>O dari tanah sawah sebesar 12% dibandingkan dengan pemberian 100% NPK saja.

### Teknologi Pemupukan yang Efisien

Pengelolaan pupuk yang tepat dapat mengurangi emisi GRK. Penggunaan pupuk anorganik secara efisien dan efektif disesuaikan dengan kebutuhan tanaman, misalnya dengan menggunakan bagan warna daun (BWD) untuk menentukan waktu pemberian pupuk nitrogen pada fase pertumbuhan tertentu. Pemupukan N dengan BWD dapat menurunkan fluk N<sub>2</sub>O karena waktu dan takaran pupuk N sesuai dengan kebutuhan tanaman (Gaijre *et al.* 2014).

Emisi CH<sub>4</sub> dapat ditekan dengan menggunakan pupuk silikat. Emisi CH<sub>4</sub> menurun sekitar 16-20% dan hasil padi meningkat 13-18% dengan penggunaan pupuk silikat 4 kg/ha (Ali *et al.* 2012). Pupuk silikat secara nyata mendorong pertumbuhan tanaman khususnya biomassa akar, volume dan porositas akar yang dapat meningkatkan konsentrasi oksigen di *rhizosfer*. Peningkatan konsentrasi oksigen tersebut akan meningkatkan pula oksidasi CH<sub>4</sub> sehingga dapat mengurangi emisi CH<sub>4</sub> ke atmosfer.

Pemberian bahan organik dengan nisbah C/N rendah ke dalam tanah sawah cenderung mengemisi metana lebih rendah daripada yang bernisbah C/N tinggi. Pemberian jerami padi dapat menurunkan emisi N<sub>2</sub>O, yaitu jerami segar dan jerami melapuk dapat menurunkan emisi N<sub>2</sub>O masing-masing sebesar 49,2 dan 59,9 % (padi walik jerami) dan sebesar 32,9 dan 28,2 % (padi gogorancah) (Wihardjaka 2011). Pupuk organik diberikan pada saat pengolahan tanah dengan takaran 2-3 t/ha.

### Integrasi Tanaman dan Ternak

Sistem pertanian dan peternakan yang terintegrasi sangat tepat diterapkan untuk meningkatkan ketangguhan (resiliensi) petani dalam menghadapi perubahan iklim. Pendekatan sistem integrasi tanaman-ternak di lahan sawah tadah hujan merupakan model sinergis antara upaya adaptasi dan mitigasi dampak perubahan iklim yang dapat mempertahankan produktivitas tanaman sekaligus

menurunkan emisi GRK. Penerapan sistem jarwo super dalam SITT memberikan peningkatan produktivitas padi dan menurunkan emisi GRK (Tabel 5). Sistem jarwo super merupakan teknologi budidaya terpadu padi sawah berbasis jarak tanam legowo 2:1, yang menerapkan beberapa komponen teknologi yaitu varietas unggul berdaya hasil tinggi dan rendah emisi, pengembalian jerami yang dikomposkan dengan penambahan dekomposer, pemupukan berimbang dengan memanfaatkan pupuk hayati, dan pengendalian OPT dengan pestisida nabati berbasis sumberdaya lokal, dan penggunaan alat mesin pertanian (alsintan) (Priatmojo *et al.* 2019).

Tabel 5. Perbandingan budidaya padi sawah varietas Ciherang dengan dan tanpa sistem jarwo super di lahan sawah tadah hujan di Pati, Jawa Tengah, 2013-2015

Table 5. Comparison of Ciherang lowland rice cultivation with and without the jarwo super system in rainfed lowland in Pati, Central Java, 2013-2015

Teknologi	Rata-rata GWP (t CO <sub>2</sub> -e per tahun)	Rata-rata hasil gabah kering panen (t/ha)	Indeks emisi (kg CO <sub>2</sub> -e/kg gabah)
Dengan jarwo super	5271	6,15	0,86
Tanpa jarwo super	6258	5,03	1,24

GWP = *global warming potential*, Sumber: Balingtan (2015)

Petani sawah tadah hujan umumnya luas lahan sempit, rata-rata kepemilikan kurang dari 0,5 ha. Petani berisiko gagal panen padi karena sumber air dari curah hujan yang tidak menentu, sehingga petani lebih rentan terhadap perubahan iklim. Lain halnya apabila petani juga memiliki ternak dan dintegrasikan dengan tanaman pangan, maka risiko yang dihadapi akan lebih kecil. Apabila terjadi gagal panen, petani masih dapat mengandalkan ternaknya untuk menunjang kebutuhan hidupnya.

Sistem integrasi tanaman dan ternak terdiri dari tiga komponen pokok, yaitu lahan pertanian, ternak dan unit pengolah limbah ternak/biodigester dengan pendekatan prinsip agro-ekologi (FAO 2007). Sistem ini merupakan sistem tertutup agar karbon tidak terlepas ke atmosfer bumi dan dapat dimanfaatkan secara efisien dengan konsep *zero waste*. Ternak sapi menghasilkan pupuk untuk meningkatkan produksi



Tabel 6. Nilai konversi energi biogas ke bahan bakar lain

Tabel 6. *Conversion rates of biogas energy to other fuels*

Bahan bakar	1 m <sup>3</sup> biogas (1 atm)	2 m <sup>3</sup> biogas (3 atm)	Harga (Rp)	
			Non subsidi	Subsidi
Elpiji	0,46 kg	2,8 kg	10.750/kg	3.959/kg
Bensin	0,80 liter	4,8 liter	7.300/liter	
Solar	0,52 liter	3,1 liter	6.900/liter	
Minyak tanah	0,62 liter	3,7 liter	13.000/liter	

Gas CH<sub>4</sub> yang dihasilkan dalam 1 tahun adalah 3,4 x 365 hari = 1.241 kg CH<sub>4</sub> yang setara 29 t CO<sub>2</sub>

Sumber: Direktorat Pengolahan Hasil Pertanian (2010) *dalam* Wihardjaka *et al.* (2015)

tanaman, sedangkan tanaman dapat menyediakan pakan hijauan untuk konsumsi ternak. Biogas merupakan gas yang dihasilkan dari aktivitas secara anaerobik dari bahan-bahan organik seperti kotoran ternak, manusia, limbah rumah tangga dan lainnya. Biogas mengandung gas CH<sub>4</sub> dan CO<sub>2</sub>. Pemanfaatan biogas berperan penting dalamantisipasi perubahan iklim karena gas CH<sub>4</sub> dapat dikelola dan tidak teremisikan ke atmosfer.

Gas yang dikeluarkan dari biodigester dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam rumah tangga sehingga mengurangi konsumsi bahan bakar dari fosil (minyak tanah, batu bara, dll). Penggunaan energi dari biogas dapat menghemat penggunaan bahan bakar minyak yang nilai konversinya terlihat pada Tabel 6. Limbah biogas, yaitu kotoran ternak yang telah hilang gasnya (*slurry*) merupakan pupuk organik yang sangat kaya akan unsur-unsur yang dibutuhkan oleh tanaman. Selain itu limbah biogas mengandung komponen organik tertentu seperti protein, selulose, lignin, dan lain-lain yang tidak dapat digantikan oleh pupuk kimiawi.

## KESIMPULAN

Pengelolaan sawah tadah hujan dengan teknologi adaptif rendah emisi merupakan sinergi aksi adaptasi dan aksi mitigasi mendukung kebijakan pemerintah seperti tertuang dalam rencana aksi nasional penurunan emisi GRK dimana dari sektor pertanian ditargetkan dapat menurunkan emisi sebesar 8 juta ton CO<sub>2</sub>-e pada tahun 2020. Penerapan komponen teknologi adaptasi dan mitigasi diarahkan untuk meningkatkan produktivitas tanaman sekaligus menurunkan emisi gas rumah kaca. Penerapan secara terpadu teknologi varietas unggul rendah emisi, irigasi berselang, pemupukan berimbang, dan penambahan bahan amelioran pada budidaya padi sawah tadah hujan dengan sumber air hujan dan waktu tanam yang

tepat nyata meningkatkan produktivitas padi sawah dan emisi gas rumah kaca dapat ditekan.

Antisipasi dampak perubahan iklim dapat dilakukan dengan (i) meningkatkan peran penyuluh pertanian dan pendidikan kepada petani dalam mengantisipasi perubahan iklim, (ii) mendesiminasikan komponen teknologi adaptif sekaligus sebagai upaya mitigasi emisi gas rumah kaca agar dapat diadopsi petani pada ekosistem lahan sawah tadah hujan, dan (iii) meningkatkan kinerja penelitian dan pengembangan dalam aksi mitigasi perubahan iklim.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Kepala Balai Penelitian Lingkungan Pertanian yang telah memberikan kesempatan bagi penulis untuk berkarya, kepada teman sejawat yang telah membantu menambahkan bahan-bahan pustaka. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada pada editor, para reviewer yang telah memberi masukan sehingga makalah ini menjadi lebih baik. Anicetus Wihardjaka adalah "Kontributor utama", Ali Pramono dan Mas Teddy Sutriadi adalah "Kontributor Anggota".

## DAFTAR PUSTAKA

- Ali MA, Farouque MG, Haque M, Kabir AA. 2012. Influence of soil amendmets on mitigating methane emissions and sustaining rice productivity in paddy soil ecosystems of Bangladesh. *J. Environ. Sci. & Natural Resources*. 5(1): 179-185.
- Baharuddin B. 2015. Penggunaan pestisida nabati untuk mengendalikan hama dan penyakit pada tanaman pangan, industri dan hortikultura. *Prosiding Seminar Nasional Agribisnis Universitas Haluoleo*. doi: dx.doi.org/10.37149/3125.

- Balingtan. 2010. Laporan Tahunan 2010. Balai Penelitian Lingkungan Pertanian, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- Balingtan. 2015. Laporan Tahunan 2015. Balai Penelitian Lingkungan Pertanian, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- Balitbangtan. 2011. Pedoman Umum Mitigasi Perubahan Iklim Sektor Pertanian. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Jakarta.
- Balitbangtan. 2015. Varietas unggul padi amfibi Balitbangtan Kementerian Pertanian siap dukung antisipasi kekeringan. *Bahan* Press Release Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. [http://www.litbang.pertanian.go.id/press/one/41/pdf/Varietas Unggul Padi Amfibi Balitbangtan Kementerian Pertanian Siap Dukung Antisipasi Kekeringan.pdf](http://www.litbang.pertanian.go.id/press/one/41/pdf/Varietas%20Unggul%20Padi%20Amfibi%20Balitbangtan%20Kementerian%20Pertanian%20Siap%20Dukung%20Antisipasi%20Kekeringan.pdf)
- Dubey SK. 2005. Microbial ecology of methane emission in rice agroecosystem: a review. *Applied Ecology and Environmental Research*. 3(2): 1-27.
- Erythrina. 2016. Bagan warna daun: Alat untuk meningkatkan efisiensi pemupukan nitrogen pada tanaman padi. *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pertanian* 35(1): 1-10. doi: <http://dx.doi.org/10.21082/jp3.v35n1.2016.p1-10>.
- Fagi AM, Las I. 1992. Lingkungan tumbuh padi. Hlm. 167-213 *Dalam* Ismunadji M, Partohardjono S, Syam M, Widjono A. (Eds.). Padi. Buku 1. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan. Bogor.
- Fagi AM, Setyanto P, Wihardjaka A. 2015 *Petunjuk Teknis Budidaya Padi Gogorancah*. Yogyakarta: Penerbit Kanisius.
- FAO. 2007. SARD and Agro-Ecology, Sustainable Agriculture and Rural Development (SARD). Policy Brief 11. Rome.
- Frei M, Razzak MA, Hossain MM, Oehme M, Dewan S, Becker K. 2007. Methane emissions and related physicochemical soil and water parameters in rice-fish systems in Bangladesh. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 120: 391-398.
- Gaihre YK, Wassmann R, Tirol-Padre A, Villegas-Pangga G, Aquino E, Kimball BA. 2014. Seasonal assessment of greenhouse gas emissions from irrigated lowland rice fields under infrared warming. *Agric. Ecosyst. Environ*. 184: 88-100.
- Guardian. 2015. Global carbon dioxide levels break 400 ppm milestone. <http://www.theguardian.com/environment/2015/may/06/global-carbon-dioxide-levels-break-400ppm-milestone>. Diakses 29 September 2017.
- Hartatik W, Husnain, Widowati LR. 2015. Peranan pupuk organik dalam peningkatan produktivitas tanah dan tanaman. *Jurnal Sumberdaya Lahan*. 9(2): 107-120.
- Johnson JMF, Franzluebbers AJ, Weyers SL, Reicosky DC. 2007. Agricultural opportunities to mitigate greenhouse gas emissions. *Environmental Pollution*. 150: 107-124.
- Juwita Y, Yustisia. 2018. Peningkatan nutrisi besi dan seng dalam beras: berbasis jenis tanah, pemupukan berimbang dan varietas. *Jurnal Triton*. 9(2): 143-158.
- Kartikawati R, Nursyamsi D. 2013. Pengaruh pengairan, pemupukan, dan penghambat nitrifikasi terhadap emisi gas rumah kaca di lahan sawah tanah mineral. *Jurnal Ecolab*. 7(2): 93-107.
- Kartiwa B, Rejekiningrum P, Sosiawan H, Sutrisno N, Heryani N, Talaohu SH, Sudarman K, Hamdani A, Haryono, Jayanto G, Harmanto, Nursyamsi D. 2017. *Petunjuk Teknis Implementasi Infrastruktur Panen Air*. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Jakarta.
- Kasno A, Rostaman T, Setyorini D. 2016. Peningkatan produktivitas lahan sawah tadah hujan dengan pemupukan hara N, P, dan K dan penggunaan padi varietas unggul. *Jurnal Tanah dan Iklim*. 40(2): 147-157.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2017. Summary Nationally Determined Contribution (NDC) dan Progres. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, Jakarta.
- Khan MA, Zargar MY. 2013. Experimental quantification of greenhouse gas (CH<sub>4</sub>) emissions from fertilizer amended rice field soils of Kashmir Himalayan Valley. *Journal of Environmental Engineering & Ecological Science*. doi: 10.7243/2050-1323-2-5.

- Kumar JIN, Viyol S. 2009. Short term diurnal and temporal measurement of methane emission in relation to organic carbon, phosphate and sulphate content of two rice fields of central Gujarat, India. *J. Environ. Biol.* 30(2): 241-246.
- Majumdar D. 2003. Methane and nitrous oxide emission from irrigated rice fields: Proposed mitigation strategies. *Current Science.* 84(10): 1317-1326.
- Makarim AK. 2006. Pemupukan berimbang pada tanaman pangan. Hlm. 80-87. *Dalam* Risalah Seminar 2005 Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan. Puslitbang Tanaman Pangan. Bogor.
- Pramono A, Ariani M, Yulianingsih E, Hervani A, Adriany TA, Setianingrum R. 2015. Pengelolaan Pertanian Rendah Emisi Gas Rumah Kaca. Balai Penelitian Lingkungan Pertanian, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- Priatmojo B, Adnyana MO, Wardana IP, Sembiring H. 2019. Kelayakan finansial dan teknis cara tanam padi jajar legowo super di sentra produksi padi kawasan Sumatera. *Penelitian Pertanian Tanaman Pangan* 3(1): 9-15.
- Ramanathan V, Feng Y. 2009. Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives. *Atmospheric Environment.* 43: 37-50.
- Rao GR, Kumari B, Sahrawat K, Wani S. 2015. Integrated pest management (IPM) for reducing pesticide residues in crops and natural resources. *In: Chakravarthy A. (Eds.). New Horizons in Insect Science: Towards Sustainable Pest Management.* Springer, New Delhi. p. 397-412.
- Ritchie H, Roser M. 2019. CO<sub>2</sub> and greenhouse gas emissions. *Our world in data.* <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>. Diakses 6 Januari 2020.
- Sander BO, Samson M, Buresh RJ. 2014. Methane and nitrous oxide emissions from flooded rice fields as affected by water and straw management between rice crops. *Geoderma.* 235: 355–362. doi: 10.1007/s10705-014-9658-1.
- Sains Indonesia. 2017. Lahan sawah harus diversifikasi. *Majalah Sains Indonesia* edisi 65, Mei 2017. Hlm. 64-66.
- Setyanto P, Abubakar R. 2005. Methane emission from paddy fields as influenced by different water regimes in Central Java. *Indonesian J. Agric. Sci.* 6(1): 1-9.
- Setyanto P, Kartikawati R. 2008. Sistem pengelolaan tanaman padi rendah emisi gas metana. *Jurnal Penelitian Pertanian Tanaman Pangan.* 27(3): 154-163.
- Sutamihardja RTM. 2009. *Perubahan Lingkungan Global: Sebuah antologi tentang Bumi Kita.* Yayasan Pasir Luhur. Bogor.
- Sutamihardja RTM, Mulyani ME. 2011. *Climate Change.* Yayasan Pasir Luhur. Bogor.
- Tampubolon K, Sihombing FN, Purba Z, Samosir STS, Karim S. 2018. Potensi metabolit sekunder gulma sebagai pestisida nabati di Indonesia. *Jurnal Kultivasi.* 17(3): 683-693.
- Undang-Undang Nomor 16 tahun 2016 tentang pengesahan Paris Agreement atas Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa Mengenai Perubahan Iklim.
- Wang P, Delaune RD, Masscheleyn PH, Patrick Jr WH. 1993. Soil redox and pH effects on methane production in a flooded rice soil. *J. Soil Sci. Soc. Am.* 57: 382-385.
- Weller S, Kraus D, Ayag KRP, Wassmann R, Alberto MCR, Butterbach-Bhal K, Kiese R. 2015. Methane and nitrous oxide emissions from rice and maize production in diversified rice cropping systems. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 101: 37–53.
- Widyantoro, Toha MH. 2010. Optimalisasi pengelolaan padi sawah tadah hujan melalui pendekatan pengelolaan tanaman terpadu. *Prosiding Pekan Serealia Nasional.* Balai Besar Penelitian Tanaman Padi. Subang, Jawa Barat. Hlm. 648-657.
- Wihardjaka A. 2011. Pengaruh Jerami Padi dan Bahan Penghambat Nitrifikasi terhadap Emisi Gas Rumah Kaca (Metana dan Dinitrogen Oksida) pada Ekosistem Sawah Tadah Hujan di Kabupaten Pati, Jawa Tengah. *Disertasi. Program Studi Ilmu Lingkungan Universitas Gadjah Mada.* Yogyakarta.
- Wihardjaka A. 2015. Mitigasi emisi gas metana melalui pengelolaan lahan sawah. *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pertanian.* 34(3): 95-104.

- Wihardjaka A, Suyanto, Suprptomo E. 2015. Model pertanian ramah lingkungan: Penerapan Sistem integrasi tanaman pangan ternak di agroekologi sawah tadah hujan di Jawa Tengah. Prosiding Seminar Nasional Sistem Informasi dan Pemetaan Sumberdaya Lahan Mendukung Swasembada Pangan. BBSDLP, Bogor, 29-30 Juli 2015. Buku III. Hlm. 81-92.
- Yuan Q, Pump, Conrad R. 2014. Straw application in paddy soil enhances methane production also from other carbon sources. *Biogeosciences*. 11: 237–246.