

Bab XII

Sistem Padi Aerobik: Transformasi Pertanian Indonesia Menuju Produktivitas Berkelanjutan

Bhaskara Anggarda Gathot Subrata, Andrianto Ansari,
Taufan Alam

A. Praktik Pertanian dan Emisi GRK

Indonesia, sebagai salah satu produsen beras terkemuka di dunia memiliki peran yang sangat sentral dalam produksi beras global, serta menjadi elemen kunci dalam menjaga ketahanan pangan bagi lebih dari 270 juta penduduknya. Selain perannya yang penting dalam menyediakan pangan bagi bangsa dan negara, Indonesia juga menghadapi tantangan mendesak yang terkait erat dengan praktik budi daya padi, emisi gas rumah kaca. Metode penanaman padi tradisional di banyak daerah di Indonesia melibatkan sawah yang tergenang air. Hal tersebut menciptakan kondisi anaerobik pada tanah yang tergenang air sehingga menyebabkan produksi metana (CH_4) yang di produksi oleh bakteri *metanogens*, gas rumah kaca yang hampir setara dengan

B. A. G. Subrata, A. Ansari, & T. Alam

Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, e-mail: bhaskara.anggarda@mail.ugm.ac.id

© 2024 Editor & Penulis

Subrata, B. A. G., Ansari, A., Alam, T. (2024). Sistem padi aerobik: Transformasi pertanian Indonesia menuju produktivitas berkelanjutan. Dalam D. E. Nuryanto & I. Fathrio (Ed.), *Prediksi iklim untuk ketahanan pangan* (353–391). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1244.c1396.
E-ISBN: 978-602-6303-49-3.

30 kali lipat gas karbon dioksida (CO_2) di udara. Data terbaru menyoroti Indonesia merupakan penyumbang emisi gas metana tertinggi ketiga dari budi daya padi setelah Tiongkok dan India, pada tahun 2020 total emisi gas metana yang dihasilkan dari budi daya padi di Indonesia sebesar 2,2 kiloton tahun⁻¹ (FAOSTAT, 2023). Metana, gas yang jauh lebih efektif memerangkap panas dibandingkan karbon dioksida, berperan penting dalam perubahan iklim global (Singh, 2021). Kontribusi Indonesia terhadap emisi gas metana, terutama dari sawah yang terendam memperburuk perubahan iklim sehingga makin meningkatkan urgensi untuk mengatasi masalah ini. Selain itu, masifnya perubahan penggunaan lahan yang terkait termasuk meningkatnya deforestasi dan hilangnya habitat, menambah tantangan lingkungan yang dihadapi Indonesia.

Menyeimbangkan pentingnya ketahanan pangan, pertanian berkelanjutan, dan aksi iklim merupakan tugas berat bagi Indonesia dalam upaya mencapai kedaulatan pangan. Dalam hal ini, Indonesia perlu memperhatikan tantangan pengurangan emisi gas rumah kaca dari budi daya padi sembari memastikan pasokan beras yang stabil bagi penduduknya dan mendukung penghidupan jutaan petani padi. Dalam bab sebelumnya telah dibahas bagaimana pertanian cerdas iklim dilakukan untuk mengurangi emisi GRK, sekaligus menjadi langkah adaptasi sektor pertanian terhadap perubahan iklim yang terjadi. Salah satu strategi dalam melaksanakan pertanian cerdas iklim adalah dengan menerapkan sistem padi aerobik.

Bab ini membahas sistem padi aerobik sebagai pendekatan budi daya padi yang inovatif dan sadar lingkungan, yang mewakili solusi yang menjanjikan untuk mengatasi dua tantangan mendesak, yaitu mengurangi emisi gas metana dan memastikan ketahanan pangan. Sistem padi aerobik menunjukkan potensi untuk mengurangi emisi gas metana secara signifikan sehingga berkontribusi terhadap upaya mitigasi perubahan iklim secara global (Hussain et al., 2020; Susilawati et al., 2019). Selain itu, dalam perjalanan menuju masa depan yang lebih berkelanjutan dengan konsep padi aerobik ini, terbuka peluang

baru dalam perdagangan karbon yang dapat memberdayakan petani padi kecil dan sekaligus berkontribusi pada mitigasi perubahan iklim.

Dengan mengeksplorasi kelayakan dan potensi penerapan praktik sistem padi aerobik di Indonesia, kita tak hanya berkontribusi pada upaya mitigasi perubahan iklim dan ketahanan pangan, tetapi juga mendorong keberlanjutan sektor pertanian. Penerapan sistem padi aerobik bukan sekadar strategi menarik. Ini adalah langkah konkret untuk secara bersamaan mengurangi emisi gas metana, mengatasi perubahan iklim, dan menjamin ketahanan pangan. Dengan demikian, sistem padi aerobik menjadi jalur transformatif menuju praktik pertanian berkelanjutan yang memiliki relevansi global, memberikan fondasi penting bagi pendekatan pertanian inovatif dalam menghadapi tantangan mendesak pada saat ini dan pada masa depan.

B. Metana dalam Pemodelan Iklim dan Pengurangan Emisi Pertanian

Emisi gas metana memegang peran sentral dalam pemahaman perubahan iklim global. Metana, yang dikenal sebagai CH_4 , merupakan salah satu gas rumah kaca yang memiliki dampak signifikan terhadap perubahan iklim. Oleh karena itu, metana menjadi parameter penting dalam pemodelan iklim karena pemahaman tentang perilaku dan konsentrasi metana dalam atmosfer sangat vital untuk meramalkan perubahan iklim pada masa depan. Dengan mengintegrasikan data emisi metana dari berbagai sumber, kita dapat mengembangkan berbagai skenario iklim yang merinci perkiraan konsentrasi metana untuk setiap skenario tersebut. Skenario iklim adalah alat penting untuk memahami bagaimana emisi gas rumah kaca, termasuk metana, dapat memengaruhi perubahan iklim pada masa depan. Dalam konteks budi daya padi terdapat beberapa model simulasi terkait dengan skenario iklim yang digunakan untuk memprediksi konsentrasi metana.

Pertama, model Methane Emissions in Rice EcoSystems (MERES) yang digunakan untuk menyimulasikan emisi metana dari lahan padi. Model ini menggunakan rutin yang ada dalam model simulasi tanam-

an CERES-Rice untuk memprediksi jumlah substrat yang tersedia untuk metanogenesis. Model ini juga telah digunakan bersama dengan data cuaca harian, data tanah spasial, dan statistik pertanian padi untuk memperkirakan emisi metana tahunan dari Tiongkok, India, Indonesia, Filipina, dan Thailand di bawah berbagai skenario manajemen tanaman. Skenario tersebut termasuk penambahan pupuk hijau, drainase lahan, dan kombinasi keduanya (Matthews et al., 2000).

Kedua, Model DAYCENT dan DNDC telah digunakan untuk menyimulasikan emisi metana dan hasil panen padi. Kedua model ini adalah model biogeokimia yang mapan dan telah digunakan dalam berbagai penelitian untuk memprediksi emisi gas rumah kaca dari sistem pertanian. Model DAYCENT, misalnya, telah digunakan untuk menyimulasikan emisi metana, hasil panen, dan karbon organik tanah dalam sistem padi subtropis di Brasil Selatan. Meskipun model ini mampu menyimulasikan pola umum aliran metana harian dari tanah dengan beberapa penyimpangan, model ini gagal merepresentasikan potensi pengolahan tanah tanpa olah untuk mengurangi emisi metana. Sementara itu, penelitian lain telah menggunakan model DAYCENT dan DNDC untuk membandingkan estimasi emisi metana dan hasil panen untuk sistem penanaman padi ganda di Tiongkok Selatan. Kedua model tersebut dikalibrasi dan divalidasi menggunakan data yang diukur di lapangan dari November 2008–November 2014. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua model tersebut efektif dalam memperkirakan pola emisi metana harian (Guo et al., 2023).

Ketiga, model Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) telah digunakan untuk menyimulasikan potensi penghematan air dan mitigasi metana dari lahan padi di bawah irigasi pengeringan dan penggenangan bergantian. Model ini digunakan bersama dengan model Denitrification Decomposition (DNDC) dan Agro-ecological Zone (AEZ) untuk memperkirakan potensi pengurangan irigasi dan emisi CH_4 di tingkat regional. Pada studi ini, data observasi padi, data iklim, dan informasi tanah digunakan sebagai input model. Parameter genetik padi dikalibrasi menggunakan DSSAT dan hasil panen padi, irigasi, dan emisi CH_4 disimulasikan

menggunakan DNDC di 24 situs observasi agrometeorologi di Tiongkok. Hasil dari skala situs ini kemudian ditingkatkan ke skala spasial di bawah skenario irigasi *alternate wetting and dry* (aerobik) dan irigasi konvensional. Hasil simulasi menunjukkan bahwa dibandingkan irigasi konvensional, di bawah skenario irigasi AWD (aerobik) rasio penghematan air di area padi timur laut adalah 23%–34%, dan di area padi selatan adalah 18%–50%. Rasio pengurangan emisi CH₄ di Timur Laut adalah 60%–71%, dan di Selatan adalah 34%–65%. Secara umum, efek mitigasi emisi CH₄ di area padi timur laut dan efek penghematan air di area padi selatan lebih baik (Fan et al., 2021).

Pada tahun 2018, emisi metana dan oksida nitrat dari aktivitas tanaman dan peternakan berkontribusi sebesar 5,3 miliar ton CO₂, tumbuh 14% sejak tahun 2000 (EPA, 2021). Secara global, produksi padi adalah salah satu kontributor terbesar terhadap emisi metana. Hal ini terjadi karena padi sering kali ditanam di sawah yang tergenang air sehingga menciptakan kondisi anaerobik di dalam tanah yang kondusif bagi produksi metana. Diperkirakan bahwa budi daya padi berkontribusi pada sebagian besar emisi metana global, terutama di wilayah di mana beras merupakan makanan pokok. Metana dari budi daya padi berkontribusi sekitar 1,5% dari total emisi gas rumah kaca global dan dapat meningkat secara substansial. Sementara itu, sawah menyumbang 12% emisi metana antropogenik global, setara dengan 1,5% dari total efek pemanasan semua gas rumah kaca (ADB, 2023). Namun, perlu dicatat bahwa emisi metana hanya merupakan sebagian dari total emisi gas rumah kaca. Sektor lain, seperti produksi listrik dan panas, transportasi, dan manufaktur, serta konstruksi juga berkontribusi signifikan terhadap total emisi.

Peluang 'skenario iklim' baru yang berdasarkan pada hasil penurunan emisi pertanian membuka pandangan yang menarik tentang upaya mitigasi yang sangat penting dalam menangani emisi metana, yang menjadi faktor penting dalam perubahan iklim global. Data menunjukkan bahwa emisi CH₄ diperkirakan akan terus meningkat sebesar 9%–72% setara dengan peningkatan sekitar 412–654 Mt CH₄/tahun (Lan et al., 2022). Oleh karena itu, mitigasi langsung emisi

CH_4 dari sektor pertanian menjadi kunci dalam mengurangi emisi gas ini. Studi menunjukkan bahwa tindakan mitigasi yang diarahkan langsung ke emisi CH_4 dapat mengurangi emisi hingga 50%–74% (Toorn et al., 2021).

Keterbatasan potensi pengurangan emisi CH_4 di sektor selain pertanian menyoroti pentingnya mengatasi masalah emisi metana di sektor pertanian itu sendiri. Karena faktor ini, emisi CH_4 dari sektor pertanian diperkirakan akan makin besar dalam kontribusinya terhadap total emisi CH_4 antropogenik dalam skenario mitigasi. Namun, saat ini telah muncul beberapa metode inovatif dari pertanian lahan basah yang berfokus pada meminimalkan emisi CH_4 . Jika metode-metode ini dapat diterapkan secara masif, terdapat peluang untuk menciptakan kondisi iklim yang lebih baik pada masa depan. Penggunaan model simulasi tanaman dan dinamika produksi CH_4 membantu dalam memperkirakan dampak berbagai skenario pengelolaan tanaman terhadap emisi CH_4 secara lokal, nasional, regional, dan global yang dapat membuka pintu bagi perkiraan baru dalam memprediksi iklim pada masa yang akan datang.

Salah satu metode yang cukup dapat diandalkan dalam usaha mengurangi emisi metana dari pertanian adalah sistem pertanian padi aerobik. Metode ini mempromosikan praktik yang meningkatkan aerasi tanah, yang mengurangi kondisi anaerobik yang mendukung produksi metana. Dengan demikian, pemahaman mendalam tentang inovasi sistem pertanian padi aerobik dalam pengelolaan pertanian dan pengurangan emisi CH_4 dapat menciptakan peluang penting untuk mengurangi kontribusi pertanian terhadap perubahan iklim dan membuka jalan bagi skenario iklim yang lebih berkelanjutan.

C. Sistem Padi Aerobik: Praktik dan Prinsip

Sistem padi aerobik mewakili perubahan revolusioner dari praktik budi daya padi tradisional yang tergenang air. Tujuannya sangat jelas, yaitu untuk mengurangi emisi gas metana sekaligus menjamin ketahanan pangan berkelanjutan. Pendekatan inovatif ini berfokus pada pemeliharaan kondisi tanah aerobik dan kaya oksigen di

seluruh siklus penanaman padi. Salah satu elemen kunci dari sistem padi aerobik adalah irigasi berselang (Gambar 12.1). Tidak seperti sawah tradisional yang tergenang air secara kontinu, di mana sawah terus-menerus terendam, sawah aerobik mengalami siklus pembasahan dan pengeringan yang terkendali (Ishfaq et al., 2020). Penerapan irigasi berkala secara signifikan mampu mengurangi emisi gas metana karena pengeringan tanah secara berkala mengganggu kondisi anaerobik yang kondusif bagi mikroba penghasil gas metana (Adhya et al., 2014; E. Pratiwi et al., 2021; Sharma et al., 2016). Pengurangan emisi gas metana ini sejalan dengan upaya global untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan mitigasi perubahan iklim.

Aspek penting lainnya dari sistem padi aerobik adalah aerasi tanah, yang memainkan peran penting dalam menjaga kondisi aerobik (Datta et al., 2017). Kemajuan terkini dalam ilmu tanah menekankan pentingnya meningkatkan aerasi tanah untuk mengurangi emisi gas metana. Teknik aerasi tanah mekanis, seperti budi daya dengan pembajakan dangkal dan minim pembajakan, telah disempurnakan untuk memperbaiki struktur tanah, meningkatkan pergerakan udara, dan mencegah berkembangnya zona anaerobik (Aparicio et al., 2022; Mehra et al., 2018). Irigasi tetes merupakan salah satu contoh teknik aerasi tanah dengan meneteskan air melalui pipa-pipa secara setempat di sekitar tanaman atau sepanjang larikan tanaman, seperti yang terlihat pada Gambar 12.1. Selain itu, pendekatan biologis, seperti penggabungan bahan organik dan penggunaan tanaman penutup tanah, makin meningkatkan aerasi tanah dengan mendorong aktivitas mikroba yang bermanfaat (Brust, 2019; dos Santos Cordeiro et al., 2022). Inovasi-inovasi ini berkontribusi dalam mengurangi emisi gas metana sekaligus meningkatkan kesehatan dan ketahanan tanah.



Sumber: Netafim (2023)

Gambar 12.1 Sistem Padi Aerobik Menggunakan Irigasi Tetes

Pemilihan varietas padi yang tepat merupakan bagian integral dari keberhasilan sistem padi aerobik. Perkembangan terkini dalam pemuliaan padi dan genetika telah menghasilkan ketersediaan varietas padi yang secara khusus disesuaikan dengan kondisi aerobik. Padi varietas aerobik menunjukkan ciri-ciri seperti sistem perakaran yang lebih dalam dan peningkatan toleransi terhadap irigasi berselang sehingga dapat memastikan bahwa padi dapat tumbuh subur di tanah yang kaya oksigen dan tahan terhadap periode kekeringan tanah sementara yang menjadi ciri budi daya aerobik (Helmi et al., 2021; Ullah & Datta, 2018; Xu et al., 2015). Adopsi varietas yang diadaptasi ini makin meningkatkan kelayakan dan potensi sistem padi aerobik. Aspek lain dari kemampuan adaptasi tanah terletak pada pemilihan atau pemuliaan varietas padi aerobik yang selaras dengan jenis tanah tertentu. Kemajuan terkini dalam pemuliaan tanaman dan genetika memungkinkan pengembangan varietas padi yang disesuaikan dengan berbagai profil tanah. Varietas yang disesuaikan ini menunjukkan ketahanan dalam menghadapi variabilitas tanah, memastikan pertumbuhan yang kuat dan pengurangan gas metana di berbagai zona agroekologi.

Salah satu masalah yang menghambat keberhasilan sistem padi aerobik adalah adanya masalah gulma. Kehadiran gulma yang beragam dan kompleks, serta risiko berkembangnya resistensi herbisida makin menekankan perlunya penerapan pengelolaan gulma terpadu dalam sistem padi aerobik. Untuk mengatasi tantangan ini, ada beberapa pilihan pengendalian gulma yang dapat diambil, termasuk langkah-langkah preventif, seperti budi daya, fisik, dan kimia. Penerapan praktik pengendalian gulma secara terpadu, yang mencakup persemaian umur tua, solarisasi tanah, pemberian mulsa, dan penyiraman manual, bukan hanya akan efektif dalam mengendalikan gulma dalam sistem padi aerobik, tetapi juga akan meningkatkan kualitas hasil panen secara keseluruhan. Dengan menggabungkan berbagai strategi ini, petani dapat mengatasi tantangan gulma dengan lebih efisien dalam konteks budi daya padi aerobik yang berkelanjutan (Jabran & Chauhan, 2015). Di sisi lain, dengan penerapan sistem padi aerobik, berpotensi akan meningkatnya produksi *nitrite* dan *nitrate* di dalam tanah, yang mana kedua zat tersebut merupakan sumber dari pembentukan *nitrous oxide* (N_2O) sebagai salah satu gas rumah kaca yang berasal dari siklus nitrogen yang berasal dari biotik maupun abiotik proses (Lin et al., 2022; Mukhtar et al., 2023)

Analisis komparatif antara sistem padi aerobik dan praktik budi daya padi tradisional yang tergenang menunjukkan perbedaan utama dalam hal dampak lingkungan, produktivitas, dan keberlanjutan. Secara khusus, sistem padi aerobik unggul dalam mengurangi emisi gas metana, gas rumah kaca yang kuat, melalui kondisi tanah yang kaya oksigen yang dicapai melalui irigasi berselang dan aerasi tanah. Penelitian terbaru secara konsisten menunjukkan pengurangan substansial dalam emisi gas metana di sawah aerobik dibandingkan sistem penggenangan tradisional (Peyron et al., 2016; Sapkota et al., 2020). Selain itu, pengurangan metana ini tidak mengorbankan hasil panen; pada kenyataannya, padi sistem aerobik memiliki potensi untuk mempertahankan atau bahkan meningkatkan produktivitas tanaman (Ahmed et al., 2017; Surendran et al., 2021). Keseimbangan antara pengurangan emisi dan peningkatan hasil panen ini membuat padi aerobik menjadi pilihan yang menarik untuk pertanian berkelanjutan.

Sistem padi aerobik juga menunjukkan peningkatan efisiensi penggunaan air, mengurangi degradasi tanah, dan kemampuan beradaptasi dengan beragam zona agroekologi (Tao et al., 2015; Wang et al., 2020). Sistem ini menggunakan lebih sedikit air karena irigasi berselang sehingga berkontribusi pada peningkatan pengelolaan sumber daya air. Kesehatan dan ketahanan tanah mendapat manfaat dari aerasi tanah dan kurangnya genangan air, menghasilkan struktur tanah dan aktivitas mikroba yang lebih baik. Selain itu, fleksibilitas sistem ini memungkinkannya untuk beradaptasi dengan berbagai kondisi, menawarkan opsi budi daya padi yang berkelanjutan dan bertanggung jawab terhadap lingkungan. Sebaliknya, sistem sawah tradisional yang tergenang, meskipun dapat mempertahankan hasil panen yang stabil, memiliki tantangan terkait penggunaan air, degradasi tanah, dan kemampuan beradaptasi terhadap kondisi lokal.

D. Emisi Gas Rumah Kaca dan Pengurangan Gas Metana dalam Sistem Padi Aerobik

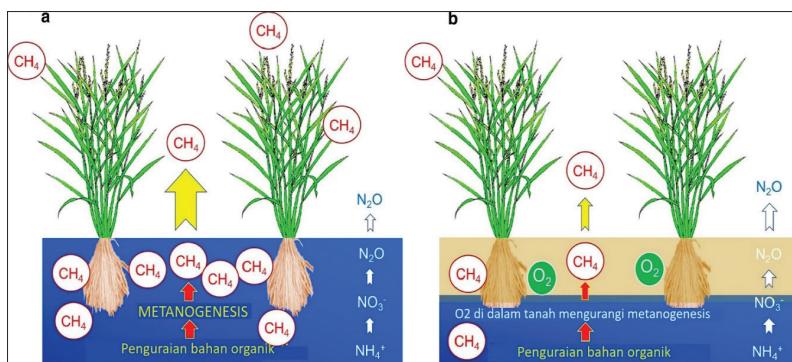
Emisi gas rumah kaca, terutama metana (CH_4) yang berasal dari kegiatan pertanian terus menjadi penyebab utama perubahan iklim global. Studi terbaru menggarisbawahi peran penting pertanian, khususnya penanaman padi dalam mitigasi emisi gas metana. Dalam konteks ini, penting untuk memberikan tinjauan komprehensif terhadap bukti ilmiah terbaru yang mendukung pengurangan emisi gas metana dalam sistem padi aerobik. Data terbaru, yang dikumpulkan dari berbagai negara, menegaskan kembali keberhasilan sistem padi aerobik dalam mengurangi emisi gas metana (Tabel 12.1). Berbagai penelitian lapangan, yang dilakukan di berbagai wilayah dengan iklim dan jenis tanah yang berbeda-beda, secara konsisten melaporkan penurunan emisi gas metana yang signifikan jika dibandingkan sawah tradisional yang tergenang air.

Tabel 12.1 Total Kumulatif Emisi Gas Metana (CH_4) Budi Daya Padi Sistem Tradisional dan Aerobik

Lokasi	Tahun	Sistem Budi daya	Emisi Gas Metana (kg ha^{-1})	Sumber
India	2010	Tradisional	57,9	Sharma et al., (2016)
		Aerobik	4,3	
Tiongkok	2013	Tradisional	177,2	Chu et al., (2015)
		Aerobik	91,7	
Amerika	2013	Tradisional	144,2	Linquist et al., (2015)
		Aerobik	71,4	
Indonesia	2020	Tradisional	38,9	Viandari et al., (2020)
		Aerobik	12,6	
Bangladesh	2020	Tradisional	239,1	Islam et al., (2022)
		Aerobik	173,3	

Salah satu temuan kunci dalam penelitian terbaru adalah peran sentral yang dimainkan oleh oksigen dalam menghambat metanogenesis, proses mikroba yang bertanggung jawab atas produksi metana di lingkungan anaerobik (Luo et al., 2023). Pada sistem padi tradisional yang terus-menerus tergenang air, di mana oksigen sangat terbatas, mikroba metanogen berkembang subur dalam kondisi anaerobik ini sehingga berkontribusi secara signifikan terhadap emisi gas metana. Namun, melalui penelitian terbaru yang menggunakan teknologi mikrobiologi dan molekuler canggih, kita sekarang dapat memahami bagaimana oksigen dapat mengganggu enzim penting dan faktor pendukung yang kritis dalam proses metanogenesis (Jiang et al., 2022). Emisi gas metana dari budi daya padi tradisional yang memerlukan genangan air dapat mengganggu pasokan oksigen ke rizosfer, menciptakan suatu lingkungan yang bersifat anaerobik. Di dalam kondisi ini, proses dekomposisi anaerobik bahan organik dalam tanah menghasilkan gas metana yang kemudian dilepaskan ke atmosfer melalui berbagai mekanisme, seperti difusi, ebullisi, dan aerenkim yang terdapat pada akar dan batang tanaman (Gambar

12.2a). Sementara itu, pada sistem padi aerobik, siklus pembasahan dan pengeringan yang teratur memungkinkan oksigen dapat masuk ke dalam tanah, menciptakan lingkungan yang bersifat aerobik. Keberadaan oksigen ini mengurangi produksi gas metana dalam tanah (Gambar 12.2b) (Heredia et al., 2021). Temuan ini memperkuat bukti bahwa pendekatan budi daya seperti ini tidak hanya berpotensi untuk meningkatkan efisiensi pertanian, tetapi juga memiliki dampak positif dalam mengurangi dampak lingkungan, khususnya dalam mengendalikan emisi gas rumah kaca yang berkontribusi terhadap perubahan iklim global.



Keterangan: Proses pembentukan emisi gas metana pada (a) sistem padi tradisional, (b) sistem padi aerobik

Sumber: Gambar diadaptasi dari Heredia et al. (2021)

Gambar 12.2 Proses Pembentukan Emisi Gas Metana

Selain itu, penelitian lain telah menyelidiki dinamika komunitas mikroba di dalam tanah padi aerobik. Dengan memanfaatkan teknologi pengurutan DNA yang canggih, para ilmuwan telah mengidentifikasi bahwa sistem padi aerobik mendorong populasi mikroba yang kurang kondusif untuk metanogenesis (Vishwakarma & Dubey, 2020). Keunggulan kompetitif mikroba nonmetanogenik di lingkungan kaya oksigen selanjutnya berkontribusi terhadap pengurangan emisi gas metana. Selain itu, penelitian ini juga mempertimbangkan

putaran umpan balik yang kompleks dan faktor lingkungan yang memengaruhi emisi gas metana, termasuk suhu tanah, tingkat kelembapan, dan kandungan karbon organik. Sensitivitas interaksi ini dan menekankan pentingnya mengoptimalkan kondisi tanah untuk memaksimalkan pengurangan gas metana dalam sistem padi aerobik (Luo et al., 2023).

Rata-rata, data terkini menunjukkan bahwa emisi gas metana dari sistem pertanian aerobik dapat dikurangi secara signifikan, berkisar antara 30%–70%, bergantung pada kondisi lokal dan praktik pengelolaan (Sharma et al., 2016). Pengurangan substansial ini sejalan dengan komitmen Indonesia dalam mitigasi emisi gas rumah kaca dan berkontribusi terhadap upaya mitigasi perubahan iklim global. Lebih jauh lagi, dalam konteks pertanian berkelanjutan menekankan kemampuan adaptasi budi daya padi aerobik terhadap beragam zona agroekologi di Indonesia, memastikan bahwa pendekatan inovatif ini dapat disesuaikan dengan kondisi lokal sekaligus mengatasi tantangan mendesak berupa emisi gas metana dan perubahan iklim.

E. Kemampuan Sistem Padi Aerobik Beradaptasi di Zona Agroekologi Indonesia

Indonesia, dengan spektrum zona iklim yang sangat luas, membentang dari hutan hujan tropis yang subur hingga daerah kering (Wijaya, 2019), memunculkan beragam tantangan dan peluang dalam menerapkan sistem padi aerobik. Di wilayah-wilayah dengan curah hujan tinggi, tantangan utamanya adalah mengatasi risiko genangan air melalui penggunaan irigasi berkala, yang merupakan dasar dari budi daya padi aerobik. Dengan memantau data cuaca secara teliti dan menggunakan pemodelan prediktif, petani dapat mengambil keputusan yang cerdas mengenai kapan dan seberapa banyak irigasi yang perlu dilakukan. Pendekatan cerdas terhadap faktor iklim ini memungkinkan mereka untuk mencapai keseimbangan yang tepat, menghindari kelebihan air yang dapat mengakibatkan kondisi tanah anaerobik dan emisi gas metana. Di sisi lain, irigasi yang terputus-putus dapat diatur sedemikian rupa untuk menjaga kondisi tanah

yang aerobik, bahkan di daerah-daerah dengan curah hujan yang tinggi (Ansari, Pranesti, et al., 2023).

Sebaliknya, di daerah yang lebih kering dan memiliki sumber air yang terbatas, penting sekali untuk menerapkan praktik pengelolaan air yang efisien guna menjaga kondisi tanah tetap aerobik. Teknik irigasi yang presisi, berlandaskan data *real-time* dan proyeksi iklim, memberikan kekuatan kepada petani untuk menghemat air sekaligus memastikan kelembapan tanah yang cukup untuk pertumbuhan padi. Dengan penyesuaian jadwal dan metode irigasi sesuai dengan karakteristik lokal, daerah-daerah seperti ini dapat mempertahankan kondisi aerobik tanah sambil mengatasi tantangan kelangkaan air yang mungkin dihadapi (Ansari, Pranesti, et al., 2023).

Selanjutnya, adaptasi sistem padi aerobik di berbagai zona agroekologi di Indonesia sangat bergantung pada sifat tanah yang kompleks dan beragam. Oleh karena itu, langkah dasar yang sangat penting adalah melakukan pengujian dan analisis tanah untuk menyesuaikan budi daya padi aerobik dengan kondisi tanah setempat. Dalam usaha untuk mengurangi emisi gas metana sambil memastikan produktivitas tanaman yang optimal, pemahaman mendalam tentang kebutuhan unsur hara spesifik dan karakteristik fisik tanah menjadi kunci (Maharjan et al., 2018). Pengujian tanah membantu dalam mengarahkan pengelolaan unsur hara secara presisi sehingga petani dapat menggunakan pupuk dengan bijaksana dan menghindari pemakaian berlebihan yang dapat berkontribusi pada emisi yang tidak diinginkan (Abbas et al., 2022). Penggunaan sensor, seperti *soil moisture sensor*, *pH sensor*, serta pemanfaatan data cuaca yang berasal dari *automatic weather station* yang di integerasikan dengan teknologi *internet of things* (IoT) dapat diakses secara *real-time*, di mana pun dan kapan pun dapat di maksimalkan dalam mendukung suksesnya sistem padi aerobik (Ansari, Pranesti, et al., 2023). Pendekatan berbasis data seperti ini tidak hanya mendukung keberlanjutan lingkungan tetapi juga meningkatkan efisiensi ekonomi dalam budi daya padi aerobik.

Mengkaji kemampuan adaptasi sistem padi aerobik terhadap beragam zona agroekologi di Indonesia sangat penting untuk memahami

potensi dan tantangan sistem dalam lanskap pertanian yang memiliki beragam aspek. Kompleksitas geografis Indonesia mencakup beragam iklim, jenis tanah, dan faktor geografis yang memengaruhi kinerja dan kesesuaian praktik pertanian. Beberapa penelitian menunjukkan beberapa keberhasilan penerapan dan mengoptimalkan manfaat sistem padi aerobik (Tabel 12.2).

Tabel 12.2 Kemampuan Sistem Padi Aerobik Beradaptasi di Zona Agroekologi Indonesia

Sumber	Zona Agroekologi	Sistem Budi daya	Hasil
Alam et al., (2021)	Agroforestri kayu putih dengan ketinggian 100 mdpl; suhu rata-rata 29.38 °C, kelembaban 81.90%, curah hujan 1,182 mm tahun ⁻¹ ; Jenis tanah Lithic Haplusterts (vertisol; rejim kelengasan ustic; terdapat kontak batu < 50 cm), Ustic Epiaquverts (vertisol; rejim kelengasan ustic; tergenang selama < 6 bulan), and Vertic Haplustalfs (alfisol; rejim kelengasan ustic; solum > 100 cm)	Budi daya aerobik diantara tegakan kayu putih (<i>Melia leuca cajuputi</i>); 15 varietas padi; Pengolahan tanah minimum; Tanam benih langsung; irigasi tada hujan.	Varietas padi Situ Patenggang menunjukkan hasil tertinggi masing-masing 4.87 dan 5.45 ton ha ⁻¹ pada Lithic Haplusterts dan Vertic Haplustalfs. Galur harapan GM 28 menunjukkan hasil tertinggi 6.49 ton ha ⁻¹ pada Ustic Epiaquverts. Ciherang, galur harapan GM 2, galur harapan GM 8, galur harapan GM 11, galur harapan GM 28, Inpari 6 Jete, Inpari 33, IR-64, dan Way Apo Buru tergolong varietas yang stabil dan cukup stabil, sedangkan varietas yang lain tergolong tidak stabil.

Sumber	Zona Agroekologi	Sistem Budi daya	Hasil
Suryanto et al., (2020)	Agroforestri kayu putih dengan ketinggian 100 mdpl; suhu rata-rata 25.54°C, kelembaban 83.90%, curah hujan selama penelitian 470 mm; Jenis tanah Lithic Haplusterts (vertisol; rejim kelengasan ustic; terdapat kontak batu < 50 cm)	Budi daya aerobik diantara tegakan kayu putih (<i>Melaleuca cajuputi</i>); Pengolahan tanah minimum; Tanam benih langsung; Irigasi tadaah hujan; Penggunaan sistem panen air hujan; Pemanfaatan bahan organic <i>in situ</i> berupa gulma siam (<i>Chromolaena odorata</i>)	Pada musim kemarau penggunaan system panen air hujan berupa parit + seresah organik yang diintegrasikan dengan aplikasi kompos gulma siam sebesar 10 ton/ha menghasilkan produktivitas sebesar 2.97 ton/ha atau mengalami peningkatan sebesar 91.75% dibandingkan tanpa penggunaan system panen air hujan dan aplikasi kompos gulma siam.
(Subrata et al., 2016)	Lahan pasir pantai dengan ketinggian 10 mdpl; suhu rata-rata 35.33°C, kelembapan 60.5%, curah hujan 378.7 mm tahun ⁻¹ ; Jenis tanah berpasir (>80%).	Budi daya aerobik tumpang sari dengan kacang hijau; Varietas padi Segreng Handayani; Pengolahan tanah minimum; Tanam benih persemian usia 21 hari; irigasi permukaan berselang.	Hasil terbaik diperoleh dari perlakuan tumpang-sari (padi 60%: kacang hijau 40%) dengan potensi hasil 4.08 ton ha ⁻¹ dengan nilai Ekonomi mencapai Rp39,502,339,00 dan R/C ratio 1.60.

Sumber	Zona Agroekologi	Sistem Budi daya	Hasil
Mar-paung et al., (2021)	Wilayah dataran tinggi dengan ketinggian 800-1200 mdpl dan berlereng; suhu rata-rata 17 °C—23 °C, kelembapan 85.94%, curah hujan 2966.17 mm tahun ⁻¹ ; Jenis tanah Aluvium.	Budi daya aerobik monokultur padi; Varietas lokal Simedan, Sirias, Sipendek, Sihaminjon; Pengolahan tanah minimum; Tanam benih langsung dan pindah tanam persemaian usia 15-30 hari; Irigasi tada hujan.	Budi daya padi sistem aerobik pada agroekosistem sawah dataran tinggi menerapkan pertanaman padi 1 kali dalam setahun. Dengan keterbatasan teknologi budi daya padi yang dilakukan petani masih memberikan produktivitas rata-rata untuk sistem tanam pindah tanam (3.9—4.5 ton ha ⁻¹), sedangkan sistem tanam benih langsung (3.7—4.2 ton ha ⁻¹)

Selain itu, strategi yang bertujuan untuk meningkatkan kesehatan dan struktur tanah melalui penggabungan bahan organik dan tanaman penutup tanah telah mencuri perhatian. Praktik-praktik ini bukan hanya memperkuat kemampuan adaptasi sistem padi aerobik, tetapi juga memberikan kontribusi yang berharga terhadap kesuburan dan keberlanjutan tanah dalam jangka panjang. Penelitian terbaru makin menegaskan manfaat penggunaan bahan organik berupa biochar dengan penerapan 2% dan 4 % dari berat total tanah mampu menurunkan emisi gas metana sebesar 45,2%–54.9% (Pratiwi & Shinogi, 2016).

Geografi kepulauan Indonesia yang luas, ditandai dengan jaringan pulau yang luas dan beragam zona agroekologi. Indonesia memiliki lahan daratan yang mencakup luas mencapai 191,09 juta hektare. Lahan tersebut terbagi menjadi beberapa kategori, termasuk lahan kering seluas 144,47 juta hektare, lahan rawa seluas 34,12 juta hektare, lahan basah non rawa seluas 9,44 juta hektare, dan sisanya digunakan untuk permukiman, perkotaan, pertambangan, serta tubuh air, seperti waduk, danau, dan sungai (Ritung et al., 2015). Namun, perlu diperhatikan bahwa lahan basah nonrawa, yang selama ini

menjadi sumber produksi utama untuk padi sawah, memiliki keterbatasan. Oleh karena itu, saatnya bagi kita untuk mempertimbangkan pengembangan sistem padi aerobik di lahan kering, yang merupakan jenis lahan dengan luas paling besar di Indonesia.

Dalam konteks saat ini, untuk mengatasi faktor geografis memerlukan pendekatan inovatif dan terdesentralisasi serta strategi adaptasi lokal untuk memastikan keberhasilan penerapan metode budi daya padi yang bertanggung jawab terhadap lingkungan. Penerapan utamanya adalah pentingnya desentralisasi. Perlunya mengakui keragaman kondisi dan kebutuhan di berbagai pulau dan wilayah di Indonesia memerlukan pendekatan desentralisasi sebagai kunci. Pendekatan ini memberikan kekuasaan kepada masyarakat lokal dan pemangku kepentingan untuk merancang strategi adaptasi yang sesuai dengan realitas setempat. Pentingnya membangun jaringan regional juga menjadi faktor penting dalam upaya ini. Hal ini memungkinkan petani untuk bertukar pengalaman dan wawasan tentang budi daya padi aerobik yang sesuai dengan situasi lokal. Jaringan ini memfasilitasi sosialisasi praktik terbaik, yang dapat mengoptimalkan pengurangan gas metana sekaligus menjaga ketahanan pangan.

Selain itu, distribusi varietas tanaman yang tepat juga merupakan aspek penting dalam adaptasi geografis. Kerja sama erat antara lembaga penelitian dan penyuluhan pertanian dengan masyarakat lokal akan memastikan ketersediaan varietas padi yang sesuai dengan kondisi agroekologi di tiap wilayah. Pendekatan yang disesuaikan ini akan memperkuat kemampuan adaptasi dan ketahanan sistem padi aerobik dalam menghadapi keragaman geografis yang ada.

F. Meningkatkan Praktik Pertanian Berkelanjutan dengan Sistem Padi Aerobik

Mengevaluasi potensi sistem padi aerobik untuk meningkatkan keberlanjutan pertanian merupakan upaya yang sangat penting, terutama dalam kerangka pengurangan penggunaan air, optimalisasi pengelolaan unsur hara, hingga pengendalian gulma yang efektif.

Salah satu keunggulan utama sistem padi aerobik terletak pada berkurangnya kebutuhan air secara signifikan dibandingkan sistem penggenangan tradisional. Beberapa penelitian menunjukkan potensi penghematan air yang besar yang terdapat pada padi aerobik (Tabel 12.3). Di dunia yang makin disibukkan dengan krisis kelangkaan air akibat efek dari perubahan iklim, penerapan sistem padi aerobik tidak hanya berfungsi sebagai pelindung sumber daya air, namun juga mendukung praktik pengelolaan air yang berkelanjutan.

Tabel 12.3 Efisiensi Penggunaan Air, Produktivitas Air, dan Hasil Panen Padi di Bawah Pengelolaan Air yang Berbeda

Negara	Metode	Keterangan	Sumber
Thailand	Konvensional (K) dan Aerobik (A)	Dibandingkan dengan K, A meningkatkan hasil panen gabah sebesar 15% selama musim hujan dan 7% selama musim kemarau. Dibandingkan K, A meningkatkan total produktivitas air sebesar 46% selama musim hujan dan 77% selama musim kemarau.	(Maneepitak, Ullah, Datta, et al., 2019; Maneepitak, Ullah, Paothong, et al., 2019)
Tiongkok	Irigasi Hemat Air (IHA), Irrigasi Tergenang (IT)	Sekitar 94.19% lahan sawah di Cina cocok untuk irigasi hemat air (IHA). Dibandingkan dengan IT, dengan menerapkan IHA, Tiongkok dapat meningkatkan hasil panen padi sebesar 5.39–6.87%. Dengan menggunakan IHA, Tiongkok dapat menghemat 22.06–26.41% air irigasi untuk sawah. Tiongkok dapat meminimalkan kehilangan nitrogen dari padi sebesar 32.11–39.11% dengan IHA.	Zhuang et al., (2019)
Indonesia	Konvensional (K) dan Aerobik (A)	Dibandingkan K, A memiliki kemampuan menghemat penggunaan air mencapai 21% pada musim kemarau dan 14% pada musim hujan.	Setyanto et al., (2018)

Pengurangan penggunaan air ini terutama berlaku di daerah-daerah yang mengalami kelangkaan air atau menghadapi pola curah hujan yang tidak menentu baik spasial maupun temporal karena hal ini menjamin alokasi sumber daya air yang terbatas secara efisien (Burak & Margat, 2016). Selain itu, manfaat lingkungan dan ekonomi dari berkurangnya penggunaan air juga sangat besar. Penerapan praktik hemat air, seperti sistem padi aerobik dapat berkontribusi pada pengurangan kekurangan air, menjaga ekosistem, dan mendukung penghidupan banyak komunitas (Lampayan et al., 2015).

Peningkatan produksi padi dapat dilakukan dengan penggunaan varietas padi yang adaptif terhadap kondisi lingkungan setempat. Varietas padi merupakan teknologi yang solutif, mudah diaplikasikan petani, dan harganya terjangkau oleh petani (Piepho et al., 2016). Perakitan kultivar padi yang mempunyai hasil tinggi dan adaptif terhadap berbagai kondisi lingkungan merupakan salah satu upaya untuk meningkatkan produktivitas padi. Pemuliaan varietas padi khususnya toleran terhadap cekaman kekeringan menawarkan opsi yang layak secara ekonomi dan berkelanjutan untuk meningkatkan produktivitas padi (Pandey & Shukla, 2015). Pertimbangkan faktor-faktor seperti ketahanan terhadap kondisi aerobik, produktivitas yang tinggi, kebutuhan air yang sesuai dengan kondisi lokal, waktu pemanenan yang cocok dengan iklim, ketahanan terhadap hama dan penyakit, ketersediaan benih di wilayah Anda, serta konsultasi dengan petani lokal atau ahli pertanian. Pemuliaan varietas padi yang toleran terhadap cekaman kekeringan menawarkan opsi yang layak secara ekonomi dan berkelanjutan untuk meningkatkan produktivitas padi (Pandey & Shukla, 2015). Genetika molekuler dan karakterisasi dapat digunakan untuk seleksi padi yang toleran terhadap cekaman kekeringan. Genotipe baru ini dapat dieksplorasi dalam program pemuliaan melalui seleksi berbantuan marka untuk pengembangan varietas padi toleran kekeringan. International Rice Research Institute dalam dekade terakhir ini telah menggunakan pendekatan pemuliaan berbantuan marka untuk pengembangan kultivar padi yang toleran kekeringan. Beberapa marka molekuler yang digunakan meliputi

Random Amplified Polymorphic DNA (RAPD), Simple Sequence Repeat (SSR), Amplified Fragment Length Polymorphism (AFLP), dan Single Nucleotide Polymorphism (SNP) (Kumar et al., 2016; Sandhu & Kumar, 2017; Verma et al., 2019).

Indonesia memiliki beberapa varietas padi gogo yang dapat diaadaptasi secara khusus untuk sistem padi aerobik. Varietas ini memiliki kemampuan lebih baik untuk bertahan dalam lingkungan yang lebih kering dan lebih beroksigen. Perbedaan utama antara varietas sawah dan gogo adalah potensi hasil panennya. Varietas padi sawah dapat menghasilkan antara 5,5 dan 8,0 ton ha⁻¹, sedangkan varietas padi gogo dapat menghasilkan hingga 5,0 ton ha⁻¹ (Panuju et al., 2013). Diketahui bahwa varietas padi gogo 53,5% kurang menguntungkan dibandingkan varietas padi dataran rendah sehingga membuat petani enggan beralih ke sistem padi aerobik dengan varietas padi gogo (Nugroho et al., 2017), namun sistem padi aerobik akan mengurangi emisi gas metana sehingga petani harus diberikan manfaat ekonomi sebagai kompensasi kerugian akibat berkurangnya hasil panen dengan skema pembelian karbon.

Di Indonesia, saat ini telah diperkenalkan beberapa varietas padi yang cocok untuk budi daya dalam sistem padi aerobik. Salah satu varietas terbaru adalah padi GAMAGORA 7, yang baru dirilis oleh Fakultas Pertanian di Universitas Gadjah Mada pada bulan Maret 2023. GAMAGORA 7 berasal dari hasil pemuliaan mutasi menggunakan cobalt-60 dosis 30 krad dari varietas lokal Rojolele asal Klaten, Jawa Tengah yang merupakan koleksi Laboratorium Pemuliaan Tanaman, Departemen Budi Daya Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada. Seleksi *pedigree* pada populasi M2-M7 mengikuti kaidah *panicle to row* diikuti seleksi massa positif pada populasi M8-M10 menghasilkan galur 7-7-7-1-9-9-2. Padi GAMAGORA 7 ini memiliki karakteristik unik sebagai padi “amfibi,” yang dapat tumbuh baik di lahan sawah maupun lahan tada hujan dengan hasil yang sama baik. Penggunaan sistem padi aerobik dengan memanfaatkan varietas padi GAMAGORA 7 menawarkan potensi sebagai solusi untuk mengatasi penurunan produksi padi di Indonesia yang disebabkan oleh berbagai

faktor, termasuk perubahan iklim global, seperti El Niño dan La Niña, serta pengalihan fungsi lahan sawah ke nonsawah yang mencapai 96.512 hektare tahun⁻¹, sementara pencetakan sawah setiap tahunnya rata-rata 20–30 ribu hektare. Pada tahun 2045, lahan sawah diprediksi menyusut seluas 2,1 juta ha dan hanya tersisa 6 juta ha (Mulyani et al., 2017). Potensi produksi padi GAMAGORA 7 mencapai 9,80 ton ha⁻¹ GKG, melebihi rata-rata hasil padi sekitar 7,95 ton ha⁻¹ dengan umur panen sekitar 119 hari setelah penanaman. Keunggulan ini menjadikan padi GAMAGORA 7 sebagai alternatif yang menarik bagi petani dalam upaya meningkatkan produktivitas pertanian, terutama dalam konteks sistem padi aerobik yang makin relevan dalam menghadapi tantangan pertanian modern.

Sistem padi aerobik muncul sebagai alternatif yang menjanjikan untuk mengatasi tantangan kekurangan air dan krisis energi yang memengaruhi budi daya padi konvensional. Salah satu kendala utama yang dihadapi dalam menerapkan sistem ini adalah serangan gulma yang sering kali sangat intensif. Dengan memahami berbagai jenis gulma, kerugian hasil yang mungkin timbul, dan ancaman resistensi terhadap herbisida menjadi hal yang krusial dalam pengelolaan gulma dalam konteks padi aerobik. Data menunjukkan bahwa ada sekitar 90 spesies gulma yang bersaing dengan padi dalam sistem aerobik, yang berpotensi menyebabkan penurunan hasil gabah hingga mencapai 23%–100% (Jabran & Chauhan, 2015). Putranto (2012) memberikan informasi bahwa produktivitas padi pada kondisi aerob relatif lebih rendah akan tetapi secara statistik tidak berbeda nyata dibandingkan pada kondisi anaerob. Penurunan produksi padi di kondisi anaerob lebih disebabkan karena adanya kompetisi antara padi dengan gulma. Hal ini terkait dengan heterogenitas dan kelimpahan jenis gulma yang lebih tinggi pada kondisi aerob. Informasi lain menunjukkan bahwa terdapat peningkatan efisiensi penggunaan air dari 0,66 kg/m³ pada kondisi anaerob menjadi 0,71 kg/m³ pada kondisi aerob.

Praktik-praktik seperti solarisasi tanah, pemilihan varietas tanaman yang bersaing dengan gulma, persiapan benih yang sudah matang, penggunaan mulsa, aplikasi pupuk yang tepat, dan penerapan

tumpang sari telah terbukti memiliki peran penting dalam mengatasi masalah gulma dalam sistem padi aerobik. Selain itu, pendekatan manual, seperti penyiraman tangan dan metode pengendalian mekanis menjadi lebih efektif ketika digabungkan dengan pendekatan lain dalam pengendalian gulma. Pemanfaatan herbisida tertentu, seperti pendimethalin; 2,4-D; penoxsulam; ethoxysulfuron; bispyribac-sodium; triclopyr; imazosulfuron; bensulfuron; pretilachlor; dan met-sulfuron juga telah terbukti efektif dalam mengatasi masalah gulma dalam sistem padi aerobik. Mengingat tingkat serangan gulma yang kompleks dan kemungkinan evolusi resistensi terhadap herbisida, bergantung pada satu metode pengendalian tunggal bukanlah pilihan yang bijaksana. Oleh karena itu, pendekatan pengelolaan gulma terpadu menjadi pilihan yang paling rasional, memastikan adanya strategi yang holistik dalam menghadapi permasalahan gulma dan meningkatkan keberhasilan budi daya padi dalam sistem aerobik.

G. Tantangan dan Keterbatasan: Menavigasi Jalur Menuju Sistem Padi Aerobik di Indonesia

Meskipun penerapan sistem padi aerobik menjanjikan bagi pertanian berkelanjutan di Indonesia, kita harus menyadari bahwa menjalankan sistem ini tidaklah tanpa tantangan dan keterbatasan yang perlu diatasi. Perubahan dari sistem budi daya padi tradisional yang tergenang air ke sistem padi aerobik memerlukan adaptasi dan pelatihan bagi petani. Oleh karena itu, kita perlu untuk memberikan perhatian dan menawarkan strategi untuk mengatasi tantangan-tantangan ini, mengoptimalkan kinerja sistem, dan memastikan keberhasilan integrasi praktik padi aerobik ke dalam lanskap pertanian Indonesia.

Zona iklim Indonesia yang beragam memberikan tantangan pengelolaan air yang beragam bagi keberhasilan penerapan sistem padi aerobik. Pentingnya mengadaptasi sistem ini untuk mengakomodasi kondisi iklim yang beragam di seluruh negeri, di mana beberapa wilayah mengalami curah hujan yang tinggi sementara wilayah lainnya menghadapi kelangkaan air. Untuk mengatasi tantangan rumit ini diperlukan penerapan pendekatan cerdas iklim yang memberdayakan

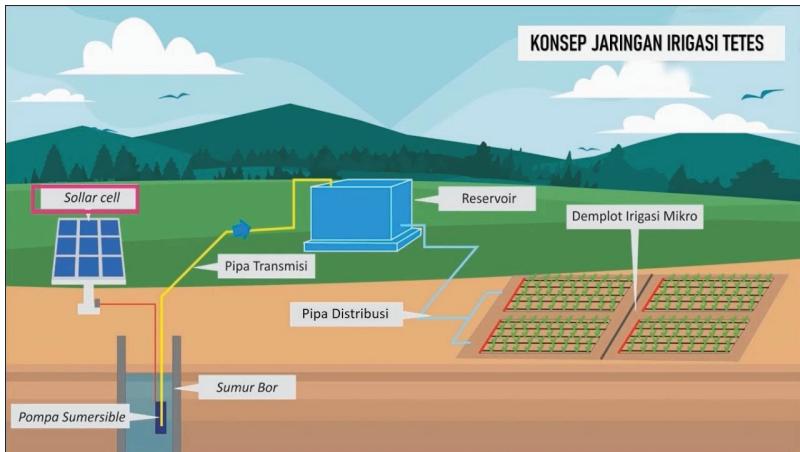
petani untuk menerapkan strategi irigasi yang fleksibel, memastikan kondisi aerobik yang optimal sekaligus melestarikan sumber daya air yang berharga.

Saat ini diperlukan pendekatan cerdas iklim dalam mengelola air secara efektif dalam sistem pertanian aerobik di berbagai iklim di Indonesia. Pendekatan ini bergantung pada pemanfaatan data cuaca secara *real-time* dan pemodelan prediktif, yang memungkinkan petani mengambil keputusan berdasarkan informasi terkait praktik irigasi. Dengan memanfaatkan kekuatan teknologi dan data, petani dapat menyesuaikan jadwal tanam, irigasi, dan penggunaan air sebagai respons terhadap perubahan pola cuaca. Hal ini dapat meminimalisasi terjadinya *crop failure* atau kegagalan panen akibat kesalahan dalam manajemen waktu budi daya khususnya jadwal tanam dan distribusi air. Pendekatan proaktif ini tidak hanya mengoptimalkan kondisi aerobik tetapi juga melestarikan sumber daya air sehingga berkontribusi terhadap pertanian berkelanjutan (Ramachandran et al., 2022).

Selain itu, sosialisasi teknologi hemat air memainkan peran penting dalam mengatasi tantangan pengelolaan air. Pentingnya memperkenalkan sistem irigasi yang efisien, seperti irigasi tetes dan teknik irigasi presisi, yang dapat mengurangi pemborosan air secara signifikan akibat efisiensi yang rendah di jaringan irigasi. Teknologi-teknologi ini sejalan dengan tujuan pertanian berkelanjutan yang lebih luas dengan mendorong penggunaan air yang bertanggung jawab. Memperluas pelatihan petani dan program peningkatan kapasitas merupakan aspek penting lainnya dalam mengelola air secara efektif dalam beragam iklim. Membekali masyarakat lokal dengan pengetahuan dan keterampilan yang diperlukan untuk menavigasi seluk-beluk pengelolaan air sangatlah penting. Dalam hal ini, koordinasi perkumpulan petani pemakai air (P3A) sebagai lembaga legal pengelola air dan penyuluh pertanian sangatlah penting guna meminimalisasi terjadinya defisit air antar-P3A melalui pelatihan maupun *focus group discussion* (FGD). Program-program ini memberdayakan petani untuk mengambil keputusan yang tepat mengenai praktik irigasi sehingga

memungkinkan mereka beradaptasi dengan kondisi iklim spesifik di wilayah mereka. Selain itu, mereka menumbuhkan rasa kepemilikan dan pengelolaan sumber daya air, serta mendorong pengelolaan air yang bertanggung jawab di tingkat akar rumput.

Upaya mencapai kondisi aerobik merupakan langkah penting untuk mengurangi emisi gas metana, namun hal ini memunculkan perdebatan dan memerlukan pertimbangan yang cermat terkait dengan dampak dan kebutuhan energi yang terlibat untuk mengan-tisipasi terjadinya *trade-off* dan meningkatkan sinergi antarelemen. Penelitian terbaru telah secara khusus mengamati karakteristik intensif energi dari beberapa praktik, seperti irigasi yang terputus-putus dan aerasi tanah, yang menggarisbawahi pentingnya menyeimbangkan pengurangan gas metana dengan potensi peningkatan konsumsi energi (Yang et al., 2023). Dalam menghadapi kompleksitas ini, strategi untuk mengoptimalkan efisiensi energi menjadi makin penting. Hal ini meliputi pemanfaatan sumber energi terbarukan, peningkatan teknologi irigasi yang lebih efisien, dan pengembangan praktik input energi rendah yang bertujuan untuk mencapai pengurangan gas metana sekaligus meminimalkan kebutuhan energi (Gambar 12.3). Contoh lain, yaitu penggunaan air limbah dari produksi pangan untuk irigasi dapat mengurangi permintaan sumber daya air tawar sehingga menghasilkan penggunaan air yang lebih berkelanjutan atau pemanfaatan penggunaan ekosistem alami, seperti lahan basah atau penyangga tepi sungai, untuk menyaring dan menyimpan air sehingga dapat membantu mengurangi kebutuhan akan sistem pengolahan air yang mahal dan boros energi (Ansari, Wuryandani, et al., 2023). Dengan menggabungkan pendekatan ini, kita dapat merangkul tantangan energi yang ada sambil tetap memprioritaskan mitigasi perubahan iklim.



Sumber: PuslitbangKPT (2020)

Gambar 12.3 Konsep Jaringan Irigasi Tetes Gravitasi Hemat Energi

Strategi untuk mengoptimalkan efisiensi energi sangat penting dalam memitigasi penggunaan energi. Salah satu cara yang menjanjikan adalah integrasi sumber energi terbarukan, seperti tenaga surya dan angin, untuk memenuhi kebutuhan energi sistem padi aerobik (Javed et al., 2020). Penelitian terbaru menyoroti kelayakan pemanfaatan energi terbarukan untuk keperluan irigasi dan aerasi sehingga menawarkan solusi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan (Chakravarty et al., 2022). Selain itu, kemajuan teknologi irigasi memainkan peran penting dalam mengoptimalkan efisiensi energi. Sistem inovatif, termasuk irigasi presisi dan mekanisme kontrol otomatis, dapat meminimalkan konsumsi energi sekaligus memastikan kondisi aerobik tetap terjaga dengan baik. Teknologi ini tidak hanya mengurangi biaya terkait energi namun juga meningkatkan keberlanjutan sistem pertanian aerobik secara keseluruhan. Arahan penelitian dalam konteks ini mencakup pengembangan praktik input energi rendah yang disesuaikan dengan kebutuhan spesifik budi daya padi aerobik. Praktik-praktik ini bertujuan untuk mencapai pengurangan gas metana sekaligus meminimalkan kebutuhan energi, serta mencapai keseimbangan antara tanggung jawab terhadap lingkungan dan efisiensi energi.

H. Implikasi Kebijakan dan Arah Masa Depan Sistem Padi Aerobik di Indonesia

Menelaah lanskap kebijakan sangat penting untuk mendorong penerapan sistem padi aerobik secara luas di Indonesia, mendorong pertanian berkelanjutan, dan memitigasi perubahan iklim. Perlu adanya dukungan kebijakan yang komprehensif, insentif, dan kerangka peraturan untuk mempercepat transisi menuju budi daya padi yang bertanggung jawab terhadap lingkungan. Selain itu, diperlukan kemampuan mengidentifikasi bidang-bidang eksplorasi pada masa depan dan menggarisbawahi peran penting padi aerobik dalam mencapai tujuan pertanian berkelanjutan dan target mitigasi perubahan iklim di Indonesia.

Kita perlu mendorong para pembuat kebijakan untuk mengambil langkah-langkah proaktif, seperti memberikan subsidi, hibah, dan insentif keuangan, untuk memotivasi petani agar menerapkan praktik-praktik berkelanjutan ini. Insentif ini berfungsi sebagai penyelamat, membantu membiayai biaya awal yang terkait dengan penerapan teknologi dan metode inovatif, yang pada akhirnya menjadikan sistem padi aerobik lebih mudah diakses oleh beragam spektrum petani. Untuk mengkatalisasi transisi ke sistem padi aerobik, pembuat kebijakan dapat mempertimbangkan untuk memberikan insentif finansial yang secara langsung mendukung petani. Subsidi untuk pembelian peralatan dan teknologi yang penting untuk budi daya padi aerobik, seperti sistem irigasi hemat energi dan alat aerasi tanah, dapat menurunkan hambatan finansial untuk masuk secara signifikan. Bersamaan dengan insentif keuangan, pembentukan kerangka peraturan dan standar yang jelas sangat diperlukan. Kerangka kerja ini memberikan panduan dan jaminan kepada petani, memastikan penerapan sistem padi aerobik secara bertanggung jawab. Hal ini dapat mencakup pedoman untuk penilaian dampak lingkungan, pengelolaan sumber daya air, dan praktik pengelolaan nutrisi dan hama berkelanjutan dalam budi daya padi aerobik. Saat ini hanya terdapat Surat Edaran Tahun 2019 oleh Direktur Jenderal Sumber Daya Air Kementerian PUPR No.1/SE/D/2019 yang telah menjadi pedoman terbaru Modernisasi Irigasi

Indonesia. Surat edaran ini berisi pedoman modernisasi irigasi. Hal ini bertujuan untuk mencapai sistem pengelolaan irigasi partisipatif yang berorientasi pada pemenuhan irigasi secara efektif, efisien dan berkelanjutan, mendorong ketahanan pangan dan air melalui peningkatan penyediaan air, infrastruktur, pengelolaan irigasi, pengelolaan lembaga, dan sumber daya manusia. Strategi untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem irigasi melalui modernisasi irigasi meliputi hal-hal berikut.

- 1) pembangunan jaringan irigasi baru yang sangat efisien;
- 2) rehabilitasi jaringan irigasi yang ada;
- 3) peningkatan kapasitas kelembagaan irigasi;
- 4) meningkatkan efektivitas metode alokasi air irigasi; dan
- 5) pemanfaatan lahan suboptimal melalui revitalisasi rawa.

Selain surat edaran ini, Indonesia tampaknya enggan berinvestasi lebih banyak dalam membangun landasan hukum yang kuat karena belum ada peraturan menteri baru yang mengatur modernisasi irigasi.

Sistem padi aerobik harus dapat beradaptasi dengan berbagai zona agroekologi di Indonesia, yang masing-masing memiliki karakteristik iklim, tanah, dan kondisi lingkungan yang unik. Penelitian harus fokus pada penyesuaian sistem ini pada wilayah tertentu, dengan mempertimbangkan faktor-faktor, seperti pola curah hujan, variasi suhu, dan profil tanah. Mengembangkan praktik dan pedoman padi aerobik spesifik wilayah memastikan bahwa petani dapat menerapkan metode ini dengan sukses dalam konteks agroekologi yang beragam. Selanjutnya, upaya penelitian harus diarahkan pada pemuliaan dan pemilihan varietas padi yang adaptif terhadap perubahan iklim, stabil, dan memiliki daya hasil tinggi dalam kondisi aerobik dan memberikan hasil tinggi. Varietas ini harus menunjukkan ketahanan terhadap faktor stres yang terkait dengan budi daya aerobik, seperti tingkat kelembapan tanah yang berfluktuasi. Perbaikan genetik dapat berdampak signifikan terhadap keberhasilan sistem padi aerobik dengan menyediakan varietas tanaman yang optimal bagi petani untuk metode budi daya secara aerobik. Selain itu, penelitian pada

masa depan harus menggali lebih dalam mengenai optimalisasi efisiensi energi untuk mengurangi pemborosan energi yang terkait dengan praktik intensif energi, seperti irigasi berselang dan aerasi tanah. Mengeksplorasi sumber energi terbarukan, teknologi irigasi inovatif, dan praktik input energi rendah dapat membantu mencapai keseimbangan antara pengurangan gas metana dan konsumsi energi sehingga menjadikan sistem padi aerobik lebih berkelanjutan dan hemat biaya. Semua hal tersebut harus didukung dengan penelitian kolaboratif yang melibatkan institusi akademis, petani, dan sektor swasta sangat penting dalam mendorong inovasi dan mengatasi kesenjangan penelitian. Pendekatan kolaboratif ini mendorong pertukaran pengetahuan, memungkinkan pengujian praktik di lapangan, dan memfasilitasi penyebaran cepat strategi-strategi yang berhasil kepada komunitas petani.

Pentingnya sistem padi aerobik dalam tujuan pertanian berkelanjutan dan upaya mitigasi perubahan iklim di Indonesia tidak dapat dilebih-lebihkan. Kita harus menyadari potensi besar sistem ini dalam mengurangi emisi gas metana, melestarikan sumber daya air yang penting dan mendorong pengelolaan unsur hara dan hama yang bertanggung jawab. Penting bagi para pengambil kebijakan untuk mengakui beras aerobik sebagai komponen penting dalam strategi Indonesia untuk mencapai target pertanian berkelanjutan dan berkontribusi terhadap komitmen iklim internasional. Menyelaraskan kebijakan dengan tujuan-tujuan ini menempatkan Indonesia sebagai pemimpin dalam penanaman padi yang bertanggung jawab, yang mendorong dampak positif terhadap lingkungan dan ketahanan pangan.

I. **Sistem Padi Aerobik: Jalan Menuju Pertanian Berkelanjutan dan Pengurangan Emisi di Indonesia**

Eksplorasi sistem padi aerobik dalam konteks pertanian Indonesia menggarisbawahi jalur transformatif menuju budi daya padi yang berkelanjutan dan sadar lingkungan. Temuan penelitian terbaru me-

nekankan potensi besar dari sistem ini tidak hanya untuk memajukan pertanian berkelanjutan namun juga secara signifikan mengurangi emisi gas rumah kaca. Potensi transformatif ini muncul sebagai solusi multifaset terhadap tantangan-tantangan penting yang dihadapi Indonesia, mulai dari isu ketahanan pangan, pengelolaan air yang bertanggung jawab hingga mitigasi perubahan iklim.

Sistem padi aerobik melambangkan praktik pertanian berkelanjutan yang holistik melalui pengurangan emisi gas metana, penggunaan air yang bijaksana, pengelolaan unsur hara dan hama yang tepat, dan teknik yang hemat energi. Sistem ini tidak hanya menawarkan jalan untuk meningkatkan hasil panen dan kelangsungan ekonomi, tetapi juga menjamin kesehatan ekosistem dan tanah dalam jangka panjang. Yang terpenting, mereka mempunyai kekuatan untuk melakukan mitigasi perubahan iklim dengan mengurangi emisi gas metana secara signifikan, sejalan dengan komitmen iklim internasional Indonesia. Saat kami menyelesaikan eksplorasi ini, seruan kolektif untuk bertindak bergema, mendesak penelitian berkelanjutan, kerangka kebijakan yang mendukung, dan penerapan praktis secara luas. Upaya penelitian kolaboratif harus terus dilakukan untuk mengatasi kesenjangan pengetahuan dan mengoptimalkan teknologi. Para pengambil kebijakan harus memperjuangkan kebijakan, termasuk insentif dan peraturan, yang mendorong penerapan sistem padi aerobik. Di tingkat akar rumput, perluasan program diseminasi pengetahuan dan peningkatan kapasitas akan memberdayakan petani melalui penyuluhan pertanian menjadi kunci keberhasilan transfer ilmu untuk menerapkan pendekatan pertanian transformatif ini. Potensi sistem pertanian aerobik dalam membentuk kembali lanskap pertanian Indonesia, mendorong keberlanjutan, dan mengurangi emisi gas rumah kaca sangatlah besar. Sistem ini tidak hanya menandai upaya ilmiah, tetapi juga cetak biru masa depan pertanian Indonesia yang lebih berkelanjutan dan bertanggung jawab terhadap lingkungan. Dengan di sebarluaskannya sistem padi aerobik ini diharapkan dapat menjadi wadah terciptanya lingkungan yang sehat, meningkatnya kesejahteraan petani, serta terwujudnya sistem pertanian yang berkelanjutan.

Referensi

- Abbas, A., Waseem, M., Ahmad, R., khan, K. A., Zhao, C., & Zhu, J. (2022). Sensitivity analysis of greenhouse gas emissions at farm level: case study of grain and cash crops. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(54), 82559–82573. <https://doi.org/10.1007/S-11356-022-21560-9/FIGURES/1>
- ADB. (2023, Oktober 18). *How can we incentivize reducing methane emission in rice farming in Asia?* Asian Development Bank. <https://www.adb.org/news/events/how-can-we-incentivize-reducing-methane-emission-rice-farming-asia>
- Adhya, T. K., Linquist, B., Searchinger, Reiner Wassmann, T., & Yan, X. (2014). *Wetting and drying: Reducing greenhouse gas emissions and saving water from rice production.* World Resources Institute. <https://www.wri.org/research/wetting-and-drying-reducing-greenhouse-gas-emissions-and-saving-water-rice-production>
- Ahmed, M., Fayyaz-ul-Hassan, & Ahmad, S. (2017). Climate variability impact on rice production: Adaptation and mitigation strategies. Dalam *Quantification of climate variability, adaptation and mitigation for agricultural sustainability* (91–111). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32059-5_5
- Alam, T., Suryanto, P., Supriyanta, Basunanda, P., Wulandari, R. A., Kastono, D., Widyawati, M. H., Nurmansyah, & Taryono. (2021). Rice cultivar selection in an agroforestry system through GGE-biplot and EBLUP. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 22(11), 4750–4757. <https://doi.org/10.13057/BIODIV/D221106>
- Ansari, A., Pranesti, A., Telaumbanua, M., Alam, T., Taryono, Wulandari, R. A., Nugroho, B. D. A., & Supriyanta. (2023). Evaluating the effect of climate change on rice production in Indonesia using multimodelling approach. *Helijon*, 9(9), e19639. <https://doi.org/10.1016/J.HELION.2023.E19639>
- Ansari, A., Wuryandani, S., Pranesti, A., Telaumbanua, M., Ngadisih, N., Hardiansyah, M. Y., Alam, T., Supriyanta, N., Martini, T., & Taryono, N. (2023). Optimizing water-energy-food nexus: achieving economic prosperity and environmental sustainability in agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1207197>

- Aparicio, J. D., Raimondo, E. E., Saez, J. M., Costa-Gutierrez, S. B., Álvarez, A., Benimeli, C. S., & Polti, M. A. (2022). The current approach to soil remediation: A review of physicochemical and biological technologies, and the potential of their strategic combination. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(2), 107141. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2022.107141>
- Brust, G. E. (2019). Management strategies for organic vegetable fertility. Dalam *Safety and practice for organic food* (193–212). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812060-6.00009-X>
- Burak, S., & Margat, J. (2016). Water management in the Mediterranean region: Concepts and policies. *Water Resources Management*, 30(15), 5779–5797. <https://doi.org/10.1007/S-11269-016-1389-4/TABLES/5>
- Chakravarty, K. H., Sadi, M., Chakravarty, H., Alsagri, A. S., Howard, T. J., & Arabkoohsar, A. (2022). A review on integration of renewable energy processes in vapor absorption chiller for sustainable cooling. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50, 101822. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101822>
- Chu, G., Wang, Z., Zhang, H., Liu, L., Yang, J., & Zhang, J. (2015). Alternate wetting and moderate drying increases rice yield and reduces methane emission in paddy field with wheat straw residue incorporation. *Food and Energy Security*, 4(3), 238–254. <https://doi.org/10.1002/FES-3.66>
- dos Santos Cordeiro, C. F., Rodrigues, D. R., da Silva, G. F., Echer, F. R., & Calonego, J. C. (2022). Soil organic carbon stock is improved by cover crops in a tropical sandy soil. *Agronomy Journal*, 114(2), 1546–1556. <https://doi.org/10.1002/AGJ2.21019>
- Datta, A., Ullah, H., & Ferdous, Z. (2017). Water management in rice. *Rice Production Worldwide*, 255–277. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47516-5_11/COVER
- EPA. (2021). *Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks*. <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks>
- Fan, Y., Tian, Z., Wang, K., & Fan, D. (2021). Simulation of water saving and methane mitigation potential of paddy fields under alternate wetting and drying irrigation regime in China. Dalam *2021 9th international conference on agro-geoinformatics (AGRO-GEOINFORMATICS 2021)*. <https://doi.org/10.1109/AGRO-GEOINFORMATICS50104.2021.9530342>

- FAOSTAT. (2023). *Climate change: Agrifood systems emissions - Emissions totals*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/en/#compare>
- Guo, Y., Zhang, G., Abdalla, M., Kuhnert, M., Bao, H., Xu, H., Ma, J., Begum, K., & Smith, P. (2023). Modelling methane emissions and grain yields for a double-rice system in Southern China with DAYCENT and DNDC models. *Geoderma*, 431. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2023.116364>
- Helmi, H., Zakaria, S., Efendi, Munawar, A. A., & Aulia, R. (2021). Effect of irrigation methods and testing some rice cultivars against growth, root development and yield on rainfed Ultisols of Aceh Besar. Dalam *IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 922, Article 012044). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/922/1/012044>
- Heredia, M. C., Kant, J., Prodhan, M. A., Dixit, S., & Wissuwa, M. (2021). Breeding rice for a changing climate by improving adaptations to water saving technologies. *Theoretical and Applied Genetics* 2021 135:1, 135(1), 17–33. <https://doi.org/10.1007/S00122-021-03899-8>
- Hussain, S., Huang, J., Huang, J., Ahmad, S., Nanda, S., Anwar, S., Shakoor, A., Zhu, C., Zhu, L., Cao, X., Jin, Q., & Zhang, J. (2020). Rice production under climate change: Adaptations and mitigating strategies. Dalam *Environment, climate, plant and vegetation growth* (659–686). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49732-3_26_COVER
- Ishfaq, M., Farooq, M., Zulfiqar, U., Hussain, S., Akbar, N., Nawaz, A., & Anjum, S. A. (2020). Alternate wetting and drying: A water-saving and ecofriendly rice production system. *Agricultural Water Management*, 241, 106363. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2020.106363>
- Islam, S. M. M., Gaihre, Y. K., Islam, M. R., Ahmed, M. N., Akter, M., Singh, U., & Sander, B. O. (2022). Mitigating greenhouse gas emissions from irrigated rice cultivation through improved fertilizer and water management. *Journal of Environmental Management*, 307, 114520. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.114520>
- Jabran, K., & Chauhan, B. S. (2015). Weed management in aerobic rice systems. *Crop Protection*, 78, 151–163. <https://doi.org/10.1016/J.CROP.2015.09.005>

- Javed, M. S., Ma, T., Jurasz, J., & Amin, M. Y. (2020). Solar and wind power generation systems with pumped hydro storage: Review and future perspectives. *Renewable Energy*, 148, 176–192. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.11.157>
- Jiang, M., Xu, P., Wu, L., Zhao, J., Wu, H., Lin, S., Yang, T., Tu, J., & Hu, R. (2022). Methane emission, methanogenic and methanotrophic communities during rice-growing seasons differ in diversified rice rotation systems. *Science of The Total Environment*, 842, 156781. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.156781>
- Kumar, A., Basu, S., Ramegowda, V., & Pereira, A. (2016). Mechanisms of drought tolerance in rice . Dalam T. Sasaki (Ed.), *Achieving sustainable cultivation of rice* (Vol. 1, 153–186). Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.4324/9781351114189-9>
- Lampayan, R. M., Rejesus, R. M., Singleton, G. R., & Bouman, B. A. M. (2015). Adoption and economics of alternate wetting and drying water management for irrigated lowland rice. *Field Crops Research*, 170, 95–108. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2014.10.013>
- Lan, X., Thoning, K. W., & Dlugokencky, E. J. (2022). *Trends in globally averaged CH₄, N₂O, and SF₆*. NOAA Global Monitoring Laboratory. <https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10>
- Lin, Y.-P., Ansari, A., Ngoc-Dan Cao, T., Shiau, Y.-J., Lur, H.-S., Muzaffar, A., Wunderlich, R. F., & Mukhtar, H. (2022). Using inhibitors to trade greenhouse gas emission for ammonia losses in paddy soil: A zero-sum game. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102547. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102547>
- Linquist, B. A., Anders, M. M., Adviento-Borbe, M. A. A., Chaney, R. L., Nalley, L. L., da Rosa, E. F. F., & van Kessel, C. (2015). Reducing greenhouse gas emissions, water use, and grain arsenic levels in rice systems. *Global Change Biology*, 21(1), 407–417. <https://doi.org/10.1111/GCB.12701>
- Luo, D., Yu, H., Li, Y., Yu, Y., Chapman, S. J., & Yao, H. (2023). A joint role of iron oxide and temperature for methane production and methanogenic community in paddy soils. *Geoderma*, 433, 116462. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2023.116462>
- Maharjan, G. R., Prescher, A. K., Nendel, C., Ewert, F., Mboh, C. M., Gaiser, T., & Seidel, S. J. (2018). Approaches to model the impact of tillage implements on soil physical and nutrient properties in different agro-ecosystem models. *Soil and Tillage Research*, 180, 210–221. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2018.03.009>

- Maneepitak, S., Ullah, H., Datta, A., Shrestha, R. P., Shrestha, S., & Kachenchart, B. (2019). Effects of water and rice straw management practices on water savings and greenhouse gas emissions from a double-rice paddy field in the Central Plain of Thailand. *European Journal of Agronomy*, 107, 18–29. <https://doi.org/10.1016/J.EJA.2019.04.002>
- Maneepitak, S., Ullah, H., Paothong, K., Kachenchart, B., Datta, A., & Shrestha, R. P. (2019). Effect of water and rice straw management practices on yield and water productivity of irrigated lowland rice in the Central Plain of Thailand. *Agricultural Water Management*, 211, 89–97. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2018.09.041>
- Marpaung, I. S., Sipahutar, T., Siagian, D. R., & P., T. (2021). Teknologi tanaman padi sistem tanam benih langsung dengan hambur di dataran tinggi Sumatera Utara (studi kasus di Kabupaten Humbang Hasundutan). *Proceedings Series on Physical & Formal Sciences*, 2, 344–351. <https://doi.org/10.30595/PSPFS.V2I.209>
- Matthews, R. B., Wassmann, R., & Arah, J. (2000). Using a crop/soil simulation model and GIS techniques to assess methane emissions from rice fields in asia. I. Model development. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 58(1–3), 141–159. [https://doi.org/10.1023/A:1009894619446/METRICS](https://doi.org/10.1023/A:1009894619446)
- Mehra, P., Baker, J., Sojka, R. E., Bolan, N., Desbiolles, J., Kirkham, M. B., Ross, C., & Gupta, R. (2018). A review of tillage practices and their potential to impact the soil carbon dynamics. *Advances in Agronomy*, 150, 185–230. <https://doi.org/10.1016/BS.AGRON.2018.03.002>
- Mukhtar, H., Wunderlich, R. F., Muzaffar, A., Ansari, A., Shipin, O. V., Cao, T. N.-D., & Lin, Y.-P. (2023). Soil microbiome feedback to climate change and options for mitigation. *Science of The Total Environment*, 882, 163412. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163412>
- Mulyani, A., Nursyamsi, D., & Syakir, M. (2017). Strategi pemanfaatan sumberdaya lahan untuk pencapaian swasembada beras berkelanjutan. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 11(1), 223337. <https://doi.org/10.2018/JSDL.V11I1.8187>
- Netafim. (2023). *Increase rice yield using drip irrigation*. <https://www.netafimindia.com/crop-knowledge/rice/>
- Nugroho, K., Slamet, S., & Lestari, P. (2017). Keragaman genetik 24 varietas padi sawah dan padi gogo (*Oryza sativa* L.) Indonesia berdasarkan marka SSR. *Scripta Biologica*, 4(1), 5–10. <https://doi.org/10.20884/1.SB.2017.4.1.350>

- Pandey, V., & Shukla, A. (2015). Acclimation and tolerance strategies of rice under drought stress. *Rice Science*, 22(4), 147–161. <https://doi.org/10.1016/J.RSCI.2015.04.001>
- Panuju, D. R., Mizuno, K., & Trisasongko, B. H. (2013). The dynamics of rice production in Indonesia 1961–2009. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 12(1), 27–37. <https://doi.org/10.1016/J.JSSAS.2012.05.002>
- Peyron, M., Bertora, C., Pelissetti, S., Said-Pullicino, D., Celi, L., Miniotti, E., Romani, M., & Sacco, D. (2016). Greenhouse gas emissions as affected by different water management practices in temperate rice paddies. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 232, 17–28. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2016.07.021>
- Piepho, H. P., Nazir, M. F., Qamar, M., Rattu, A. U. R., Riaz-Ud-Din, Hussain, M., Ahmad, G., Fazal-E-Subhan, Ahmad, J., Abdullah, Laghari, K. B., Vistro, I. A., Sharif Kakar, M., Sial, M. A., & Imtiaz, M. (2016). Stability analysis for a countrywide series of wheat trials in Pakistan. *Crop Science*, 56(5), 2465–2475. <https://doi.org/10.2135/CROPSCI2015.12.0743>
- Pratiwi, E. P. A., & Shinogi, Y. (2016). Rice husk biochar application to paddy soil and its effects on soil physical properties, plant growth, and methane emission. *Paddy and Water Environment*, 14(4), 521–532. <https://doi.org/10.1007/S-10333-015-0521-Z/FIGURES/9>
- Pratiwi, E., Akhdya, A., Purwani, J., Husnain, & Syakir, M. (2021). Impact of methane-utilizing bacteria on rice yield, inorganic fertilizers efficiency and methane emissions. Dalam *IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 924, Article 012017). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/648/1/012137>.
- PuslitbangKPT. (2020, 27 Januari). *Teknologi irigasi tetes (irigasi hemat air)* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=6iied70eK4c>
- Putranto, A. W. (2012). *Optimasi potensi hasil berbagai varietas padi (Oryza sativa L.) melalui pengaturan populasi dan pemupukan nitrogen pada dua kondisi pengairan* [Tesis]. Universitas Gadjah Mada. <https://etd.repository.ugm.ac.id/penelitian/detail/56491>

- Ramachandran, V., Ramalakshmi, R., Kavin, B. P., Hussain, I., Almaliki, A. H., Almaliki, A. A., Elnagar, A. Y., Hussein, E. E., Li, Z., Fan, Y., Augusto, C., Santos, G., Jin, J., Ramachandran, V., Ramalakshmi, R., Kavin, B. P., Hussain, I., Almaliki, A. H., Almaliki, A. A., ... Hussein, E. E. (2022). Exploiting IoT and its enabled technologies for irrigation needs in agriculture. *Water*, 14(5), 719. <https://doi.org/10.3390/W14050719>
- Ritung, S., Suryani, E., Subardja, D., Sukarman, Nugroho, K., Suparto, Hikmatullah, Mulyani, A., Tafakresnanto, C., Sulaeman, Y., Subandiono, R. E., Wahyunto, Ponidi, Prasodjo, N., Suryana, U., Hidayat, H., Priyono, A., & Supriatna, W. (2015). *Sumber daya lahan pertanian Indonesia: Luas, penyebaran, dan potensi ketersediaan* (E. Husen, F. Agus, & D. Nursyamsi, Ed.). IAARD Press. <https://repository.pertanian.go.id/handle/123456789/20044>
- Sandhu, N., & Kumar, A. (2017). Bridging the rice yield gaps under drought: QTLs, genes, and their use in breeding programs. *Agronomy*, 7(2), 27. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY7020027>
- Sapkota, A., Haghverdi, A., Avila, C. C. E., & Ying, S. C. (2020). Irrigation and greenhouse gas emissions: A review of field-based studies. *Soil Systems*, 4(2), 20. <https://doi.org/10.3390/SOILSYSTEMS4020020>
- Setyanto, P., Pramono, A., Adriany, T. A., Susilawati, H. L., Tokida, T., Padre, A. T., & Minamikawa, K. (2018). Alternate wetting and drying reduces methane emission from a rice paddy in Central Java, Indonesia without yield loss. *Soil Science and Plant Nutrition*, 64(1), 23–30. <https://doi.org/10.1080/00380768.2017.1409600>
- Sharma, S. K., Singh, Y. V., Tyagi, S., & Bhatia, A. (2016). Influence of rice varieties, nitrogen management and planting methods on methane emission and water productivity. *Paddy and Water Environment*, 14(2), 325–333. <https://doi.org/10.1007/S-10333-015-0502-2/TABLES/4>
- Singh, S. (2021). Energy crisis and climate change. Dalam *Energy: Crises, challenges and solutions* (1–17). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119741503.CH1>
- Subrata, B. A. G., Yudono, P., Waluyo, S., & Putra, E. T. S. (2016). *Pengaruh proporsi populasi padi gogo dan kacang hijau dalam tumpangsari terhadap hasil dan komposisi gulma di lahan pasir pantai* [Tesis]. Universitas Gadjah Mada. <https://etd.repository.ugm.ac.id/penelitian/detail/103173>

- Surendran, U., Raja, P., Jayakumar, M., & Subramoniam, S. R. (2021). Use of efficient water saving techniques for production of rice in India under climate change scenario: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 309, 127272. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127272>
- Suryanto, P., Kurniasih, B., Faridah, E., Nurjanto, H. H., Rogomulyo, R., Handayani, S., Kastono, D., Muttaqien, A. S., & Alam, T. (2020). Influence of furrow with organic material and Chromolaena odorata compost on upland rice productivity in an agroforestry system with Melaleuca cajuputi. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 21(2), 780–791. <https://doi.org/10.13057/BIODIV/D210246>
- Susilawati, H. L., Setyanto, P., Kartikawati, R., & Sutriadi, M. T. (2019). The opportunity of direct seeding to mitigate greenhouse gas emission from paddy rice field. Dalam *IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 393, Artikel 012042). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/393/1/012042>.
- Tao, Y., Zhang, Y., Jin, X., Saiz, G., Jing, R., Guo, L., Liu, M., Shi, J., Zuo, Q., Tao, H., Butterbach-Bahl, K., Dittert, K., & Lin, S. (2015). More rice with less water – evaluation of yield and resource use efficiency in ground cover rice production system with transplanting. *European Journal of Agronomy*, 68, 13–21. <https://doi.org/10.1016/J.EJA.2015.04.002>
- Toorn, S. a. D., Worrell, E., & Van Den Broek, M. (2021). How much can combinations of measures reduce methane and nitrous oxide emissions from European livestock husbandry and feed cultivation? *Journal of Cleaner Production*, 304, 127138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127138>
- Ullah, H., & Datta, A. (2018). Root system response of selected lowland Thai rice varieties as affected by cultivation method and potassium rate under alternate wetting and drying irrigation. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(14), 2045–2059. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1476756>
- Verma, H., Borah, J. L., & Sarma, R. N. (2019). Variability assessment for root and drought tolerance traits and genetic diversity analysis of rice germplasm using SSR Markers. *Scientific Reports*, 9(1), 1–19. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52884-1>

- Viandari, N. A., Adriany, T. A., & Pramono, A. (2020). Alternate wetting and drying system (AWD) combined with farmyard manure to increase rice yield and reduce methane emission and water use. Dalam *IOP conference series: Materials science and engineering* (Vol. 980, Artikel 012066). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/980/1/012066>
- Vishwakarma, P., & Dubey, S. K. (2020). Diversity of endophytic bacterial community inhabiting in tropical aerobic rice under aerobic and flooded condition. *Archives of Microbiology*, 202(1), 17–29. <https://doi.org/10.1007/S00203-019-01715-Y/FIGURES/6>
- Wang, H., Zhang, Y., Zhang, Y., McDaniel, M. D., Sun, L., Su, W., Fan, X., Liu, S., & Xiao, X. (2020). Water-saving irrigation is a ‘win-win’ management strategy in rice paddies – With both reduced greenhouse gas emissions and enhanced water use efficiency. *Agricultural Water Management*, 228, 105889. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2019.105889>
- Wijaya, S. (2019). Indonesian food culture mapping: A starter contribution to promote Indonesian culinary tourism. *Journal of Ethnic Foods*, 6(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/S42779-019-0009-3/TABLES/1>
- Xu, Y., Ge, J., Tian, S., Li, S., Nguy-Robertson, A. L., Zhan, M., & Cao, C. (2015). Effects of water-saving irrigation practices and drought resistant rice variety on greenhouse gas emissions from a no-till paddy in the central lowlands of China. *Science of The Total Environment*, 505, 1043–1052. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2014.10.073>
- Yang, Y., Jin, Z., Mueller, N. D., Driscoll, A. W., Hernandez, R. R., Grodsky, S. M., Sloat, L. L., Chester, M. V., Zhu, Y. G., & Lobell, D. B. (2023). Sustainable irrigation and climate feedbacks. *Nature Food*, 4(8), 654–663. <https://doi.org/10.1038/s43016-023-00821-x>
- Zhuang, Y., Zhang, L., Li, S., Liu, H., Zhai, L., Zhou, F., Ye, Y., Ruan, S., & Wen, W. (2019). Effects and potential of water-saving irrigation for rice production in China. *Agricultural Water Management*, 217, 374–382. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2019.03.010>