

Peran Biochar dalam Sekuestrasi Karbon dan Mitigasi Emisi Gas Rumah Kaca pada Budidaya Padi Sawah

The Role of Biochar in Carbon Sequestration and Greenhouse Gas Mitigation in Rice Paddy System

¹*Kharmelia Sandra Livia, ¹Emma Trinurani Sofyan

¹Departemen Ilmu Tanah dan Sumber Daya Lahan, Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran

*e-mail : kharmelia22001@mail.unpad.ac.id

ABSTRAK

Perubahan iklim global menjadi salah satu tantangan utama sektor pertanian, termasuk budidaya padi sawah yang merupakan sumber emisi metana (CH_4) akibat kondisi tanah yang tergenang dan anaerob. Biochar telah banyak dikaji sebagai teknologi yang berpotensi meningkatkan kualitas tanah sekaligus mengurangi dampak lingkungan dari budidaya padi. Artikel tinjauan ini bertujuan untuk mengkaji peran biochar dalam meningkatkan sekuestrasi karbon dan memitigasi emisi gas rumah kaca pada lahan sawah, serta membahas mekanisme kerja, faktor-faktor yang memengaruhi efektivitasnya, peluang pemanfaatan, dan tantangan implementasinya. Kajian dilakukan melalui studi literatur deskriptif terhadap publikasi ilmiah yang diperoleh dari Google Scholar dan ScienceDirect pada periode 2016–2026. Hasil kajian menunjukkan bahwa aplikasi biochar mampu meningkatkan cadangan karbon organik tanah sekitar 27–45% melalui peningkatan stabilitas karbon dan perbaikan sifat tanah. Selain itu, biochar umumnya menurunkan emisi CH_4 sebesar 22% hingga lebih dari 50% dengan menekan aktivitas mikroorganisme metanogen dan meningkatkan oksidasi metana oleh metanotrof. Emisi dinitrogen oksida (N_2O) juga dilaporkan menurun sebesar 17–48%, terutama melalui peningkatan aktivitas gen *nosZ* yang berperan dalam reduksi N_2O menjadi N_2 . Namun, efektivitas biochar sangat dipengaruhi oleh jenis bahan baku, suhu pirolisis, dosis aplikasi, kondisi tanah, serta pengelolaan air dan hara. Secara keseluruhan, biochar berpotensi menjadi strategi mitigasi perubahan iklim yang mendukung keberlanjutan budidaya padi sawah. Penelitian selanjutnya perlu difokuskan pada evaluasi ekonomi jangka panjang dan pengembangan standar biochar berbasis sumber daya lokal.

Kata kunci: Dinitrogen oksida (N_2O), Metana (CH_4), Metanogen, Metanotrof, Siklus nitrogen

ABSTRACT

Climate change has become a major challenge for the agricultural sector, including rice cultivation, which is recognized as an important source of methane (CH_4) emissions due to prolonged flooded and anaerobic soil conditions. Biochar has been widely investigated as a promising technology to improve soil quality while reducing the environmental impacts of rice production. This review aims to evaluate the role of biochar in enhancing carbon sequestration and mitigating greenhouse gas emissions in rice paddies, as well as to discuss its underlying mechanisms, influencing factors, opportunities, and implementation challenges. A descriptive literature review was conducted using scientific publications obtained from Google Scholar and ScienceDirect covering the period 2016–2026. The reviewed studies indicate that biochar application can increase soil organic carbon stocks by approximately 27–45% through improved carbon stabilization and soil properties. In addition, biochar generally reduces CH_4 emissions by 22% to more than 50% by suppressing methanogenic microorganisms and promoting methane oxidation by methanotrophs. Nitrous oxide (N_2O) emissions have also been reported to decrease by 17–48%, mainly through enhanced activity of the *nosZ* gene involved in the reduction of N_2O to N_2 . However, biochar effectiveness is strongly influenced by feedstock type, pyrolysis temperature, application rate, soil characteristics, and water and nutrient management practices. Overall, biochar represents a promising climate-smart strategy for sustainable rice production. Future research should focus on long-term economic assessments and the development of standardized biochar products based on locally available biomass resources.

Keywords: Methane (CH_4), Methanogens, Methanotrophs, Nitrogen cycle, Nitrous oxide (N_2O)

PENDAHULUAN

Perubahan iklim merupakan salah satu tantangan global yang semakin mendapat perhatian karena dampaknya terhadap stabilitas ekosistem dan ketahanan pangan dunia. Fenomena ini erat kaitannya dengan peningkatan konsentrasi gas rumah kaca (GRK) di atmosfer, terutama metana (CH_4) dan dinitrogen oksida (N_2O). Laporan World Meteorological Organization (WMO) menunjukkan bahwa konsentrasi ketiga gas tersebut terus meningkat dan

mencapai rekor tertinggi pada tahun 2023. Konsentrasi CH_4 dan N_2O masing-masing mencapai 1.934 ppb dan 336,9 ppb setara dengan 265%, dan 125% dari tingkat pra-industri, yang mengindikasikan bahwa akumulasi GRK di atmosfer masih terus berlangsung dan menjadi salah satu pendorong utama perubahan iklim global (WMO, 2024).

Sektor pertanian merupakan salah satu penyumbang emisi GRK antropogenik yang cukup besar dengan kontribusi sekitar 10–12% terhadap total emisi global (Smith et al.,

2021). Di antara berbagai aktivitas pertanian, budidaya padi sawah menjadi salah satu sumber utama emisi metana akibat berlangsungnya proses metanogenesis pada kondisi tanah tergenang. Dalam kondisi anaerob, bahan organik diuraikan oleh mikroorganisme metanogen yang menghasilkan CH_4 dan melepaskannya ke atmosfer (Setyanto *et al.*, 2022). Kondisi tersebut menjadikan lahan sawah sebagai salah satu fokus penting dalam upaya mitigasi emisi gas rumah kaca di sektor pertanian.

Upaya mitigasi emisi gas rumah kaca pada lahan sawah perlu dilakukan melalui penerapan praktik pengelolaan yang tidak hanya berorientasi pada peningkatan produksi, tetapi juga mempertimbangkan aspek lingkungan. Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan adalah sekuestrasi karbon, yaitu proses penangkapan dan penyimpanan karbon dalam jangka panjang sehingga tidak kembali terlepas ke atmosfer (Lal *et al.*, 2018). Peningkatan cadangan karbon organik tanah menjadi penting karena berkontribusi terhadap pengurangan konsentrasi karbon di atmosfer sekaligus mendukung perbaikan kualitas tanah. Oleh karena itu, pengelolaan lahan padi sawah perlu diarahkan pada praktik budidaya yang mampu meningkatkan penyimpanan karbon dan menekan emisi GRK secara bersamaan sebagai bagian dari upaya mewujudkan sistem pertanian berkelanjutan (Chen *et al.*, 2023).

Salah satu teknologi yang banyak mendapat perhatian dalam beberapa tahun terakhir adalah biochar. Biochar merupakan bahan kaya karbon yang dihasilkan melalui proses pirolisis biomassa pada kondisi minim oksigen dengan suhu berkisar antara 300–700°C (Lehmann *et al.*, 2021). Proses tersebut menghasilkan struktur karbon aromatik yang relatif stabil sehingga mampu bertahan di dalam tanah dalam jangka waktu yang panjang. Selain berpotensi sebagai media sekuestrasi karbon, biochar juga diketahui mampu memperbaiki berbagai sifat fisik, kimia, dan biologi tanah yang berperan penting dalam mendukung produktivitas pertanian (Wang *et al.*, 2024).

Berbagai penelitian telah melaporkan manfaat aplikasi biochar pada budidaya padi sawah. Penggunaan biochar diketahui dapat meningkatkan kandungan karbon organik tanah serta mengurangi emisi CH_4 dan N_2O melalui perubahan kondisi lingkungan tanah dan aktivitas mikroorganisme (Zhang *et al.*, 2022). Selain itu, struktur biochar yang berpori mampu meningkatkan kemampuan tanah dalam menahan air dan unsur hara sehingga mendukung peningkatan efisiensi pemupukan dan produktivitas tanaman padi (Nguyen *et al.*, 2023). Meskipun demikian, efektivitas biochar yang dilaporkan dalam berbagai penelitian masih menunjukkan hasil yang beragam. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh jenis bahan baku, suhu

pirolisis, dosis aplikasi, karakteristik tanah, serta kondisi lingkungan tempat biochar diterapkan (Ali *et al.*, 2024).

Kajian mengenai pemanfaatan biochar pada lahan padi sawah telah berkembang cukup pesat dalam satu dekade terakhir. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada respons agronomis seperti pertumbuhan dan hasil tanaman, sedangkan pembahasan mengenai mekanisme sekuestrasi karbon dan mitigasi emisi gas rumah kaca sering kali disajikan secara terpisah. Akibatnya, pemahaman mengenai keterkaitan antara biochar, dinamika karbon tanah, dan emisi GRK pada ekosistem sawah masih belum tersusun secara komprehensif. Oleh karena itu, diperlukan suatu kajian yang mampu mengintegrasikan berbagai hasil penelitian sehingga diperoleh gambaran yang lebih utuh mengenai peran biochar dalam mendukung pengelolaan lahan sawah yang berkelanjutan (Kumar *et al.*, 2025).

Artikel tinjauan ini bertujuan untuk mengkaji peran biochar dalam meningkatkan sekuestrasi karbon dan memitigasi emisi gas rumah kaca pada budidaya padi sawah. Selain itu, artikel ini membahas mekanisme kerja biochar di dalam tanah, faktor-faktor yang memengaruhi efektivitasnya, serta peluang dan tantangan penerapannya dalam mendukung sistem pertanian yang lebih berkelanjutan.

METODOLOGI

Artikel ini disusun menggunakan metode studi literatur (literature review) dengan mengumpulkan, membaca, menganalisis, dan mensintesis berbagai sumber pustaka yang relevan dengan topik penelitian. Sumber literatur diperoleh melalui basis data ilmiah, yaitu Google Scholar, dan ScienceDirect. Literatur yang digunakan berupa artikel penelitian maupun artikel tinjauan yang diterbitkan pada rentang tahun 2016–2026 dan memiliki keterkaitan langsung dengan pemanfaatan biochar dalam sekuestrasi karbon dan mitigasi emisi gas rumah kaca pada budidaya padi sawah. Pencarian literatur dilakukan menggunakan kata kunci “*biochar*”, “*carbon sequestration*”, “*greenhouse gas emissions*”, “*methane emission*”, “*rice paddy*”, dan “*rice cultivation*”.

Penyusunan artikel ini mengacu pada tahapan literature review yang dikemukakan oleh Snyder (2019), yang meliputi perencanaan topik dan perumusan fokus kajian, pencarian serta seleksi literatur yang relevan, dan analisis serta sintesis hasil penelitian yang telah dipublikasikan. Literatur yang diperoleh kemudian diseleksi berdasarkan relevansi topik, keterbaruan publikasi, serta kelengkapan informasi yang disajikan. Selanjutnya, data dan informasi yang terkumpul dianalisis secara deskriptif untuk memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai peran biochar

dalam meningkatkan sekuestrasi karbon dan memitigasi emisi gas rumah kaca pada sistem budidaya padi sawah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Peran Biochar dalam Sekuestrasi Karbon pada Lahan Padi Sawah

Berbagai studi menunjukkan bahwa aplikasi biochar secara konsisten berkontribusi terhadap peningkatan sekuestrasi karbon tanah melalui peningkatan kandungan karbon organik, stabilisasi karbon, serta perbaikan aktivitas mikroba tanah pada ekosistem sawah. Beberapa penelitian juga melaporkan bahwa biochar tidak hanya meningkatkan stok karbon tanah, tetapi juga memengaruhi produktivitas tanaman dan dinamika dekomposisi bahan organik. Ringkasan temuan utama dari beberapa studi terkait disajikan pada Tabel I.

Tabel I. Ringkasan penelitian terbaru mengenai peran biochar dalam meningkatkan sekuestrasi karbon pada lahan padi sawah

Referensi	Temuan Utama
Bu <i>et al.</i> (2022)	Biochar meningkatkan total karbon tanah sebesar 27,2% serta meningkatkan hasil padi sebesar 11,3%.
Liu <i>et al.</i> (2023)	Interaksi biochar dengan tanaman meningkatkan karbon pada lapisan tanah atas sebesar 4,5% ($\approx 1,7 \text{ t C ha}^{-1}$ per tahun).
Chen <i>et al.</i> (2016)	Biochar meningkatkan karbon organik tanah serta biomassa mikroba, namun menurunkan laju respirasi tanah dan dominasi fungi tertentu.
Lu <i>et al.</i> (2020)	Biochar sebesar 10 t ha^{-1} mampu meningkatkan penyimpanan karbon tanah hingga 45% setelah enam tahun.
Bi <i>et al.</i> (2020)	Biochar yang diaplikasikan selama 4 tahun dapat menambahkan sekitar karbon 65 Mg C ha^{-1} , dengan peningkatan stok karbon tanah sebesar $58\text{--}65 \text{ Mg C ha}^{-1}$.
Liu <i>et al.</i> (2016)	Biochar meningkatkan karbon organik tanah hingga 40% serta biomassa karbon mikroba hingga 18%.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa biochar mampu meningkatkan karbon tanah dengan kisaran peningkatan yang cukup konsisten, yaitu sekitar 27–45%

hingga mencapai akumulasi puluhan Mg C ha^{-1} (Bu *et al.*, 2022; Lu *et al.*, 2020; Bi *et al.*, 2020). Peningkatan ini tidak hanya berasal dari input karbon biochar itu sendiri, tetapi juga dari peningkatan karbon non-biochar melalui interaksi dengan tanaman dan mikroorganisme tanah (Liu *et al.*, 2023). Selain itu, biochar juga memodifikasi dinamika karbon tanah dengan meningkatkan biomassa mikroba dan karbon organik tanah, sekaligus menurunkan laju respirasi tanah yang mengindikasikan perlambatan proses dekomposisi karbon (Chen *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2016). Hal ini menunjukkan bahwa biochar tidak hanya berperan sebagai sumber karbon, tetapi juga sebagai agen stabilisasi karbon jangka panjang. Temuan-temuan tersebut menegaskan bahwa biochar memiliki potensi kuat sebagai strategi peningkatan sekuestrasi karbon di lahan sawah melalui kombinasi mekanisme fisik, kimia, dan biologis yang bekerja secara simultan.

Meskipun peran biochar dalam meningkatkan sekuestrasi karbon tanah telah banyak dilaporkan, dinamika karbon pada ekosistem sawah tidak dapat dipisahkan dari proses emisi gas rumah kaca, khususnya metana (CH_4) dan dinitrogen oksida (N_2O) yang dihasilkan dari kondisi anaerob pada tanah tergenang serta proses transformasi nitrogen di dalam tanah. Oleh karena itu, selain berperan dalam penyimpanan karbon, pengaruh biochar terhadap proses metanogenesis dan nitrifikasi–denitrifikasi yang menghasilkan CH_4 dan N_2O menjadi aspek penting dalam evaluasi menyeluruh kontribusi biochar terhadap mitigasi perubahan iklim pada sistem budidaya padi sawah.

Peran Biochar dalam Mitigasi Emisi Gas Rumah Kaca (GRK)

Biochar memiliki kontribusi penting dalam mitigasi emisi gas rumah kaca (GRK) pada sistem budidaya padi sawah. Emisi GRK utama dari lahan sawah meliputi metana (CH_4) yang dihasilkan dari kondisi anaerob tanah tergenang serta dinitrogen oksida (N_2O) yang terbentuk melalui proses nitrifikasi dan denitrifikasi pada siklus nitrogen tanah. Oleh karena itu, kajian terhadap pengaruh biochar terhadap kedua gas tersebut menjadi penting untuk memahami peran komprehensif biochar dalam mitigasi perubahan iklim pada ekosistem sawah.

Secara umum, hasil penelitian pada Tabel II menunjukkan bahwa aplikasi biochar mampu menurunkan emisi CH_4 pada kisaran $\pm 22\%$ hingga lebih dari 50%, tergantung jenis bahan baku, dosis, dan kondisi lingkungan tanah. Penurunan ini terutama dikaitkan dengan perubahan komunitas mikroba metanogen dan metanotrof, di mana biochar dilaporkan dapat menekan aktivitas metanogen (*mcrA*) sekaligus meningkatkan keberadaan metanotrof (*pmoA*),

sehingga menurunkan rasio *mcrA/pmoA* dalam tanah (Han *et al.*, 2024; Qi *et al.*, 2020; Ma *et al.*, 2025).

Tabel II. Ringkasan penelitian terbaru mengenai peran biochar dalam mitigasi gas CH₄

Referensi	Temuan Utama
Han <i>et al.</i> (2016)	Biochar jerami padi mampu menurunkan emisi CH ₄ sebesar 39,5%.
Pratiwi & Shinogi (2016)	Biochar sekam padi mampu menurunkan emisi CH ₄ sebesar 45,2–54,9%.
Nan <i>et al.</i> (2021)	Biochar berbahan dasar campuran jerami padi dan gandum mampu mereduksi gas CH ₄ sebesar 41%.
Qi <i>et al.</i> (2020)	Biochar pada dosis tertentu mampu mereduksi emisi gas CH ₄ sebesar 22,2–95,7%.
Lee <i>et al.</i> (2023)	Biochar dengan berbagai jenis bahan baku mampu menurunkan emisi CH ₄ hingga 22,9% di kawasan Asia Timur.
Somboon <i>et al.</i> (2024)	Biochar berasal dari jerami padi dapat mereduksi emisi gas CH ₄ sebesar 42,9%.

Kondisi redoks tanah juga dipengaruhi oleh aplikasi biochar melalui peningkatan ketersediaan elektron akseptor seperti nitrat (NO₃⁻), besi (Fe³⁺), dan sulfat (SO₄²⁻), yang dapat menekan proses metanogenesis sekaligus mendorong oksidasi CH₄ (Sriphirom *et al.*, 2022). Perbaikan sifat fisik tanah, seperti peningkatan porositas dan aerasi, juga berkontribusi dalam menciptakan kondisi yang kurang menguntungkan bagi pembentukan metana (Pratiwi & Shinogi, 2016). Secara keseluruhan, kombinasi antara perubahan komunitas mikroba, peningkatan kondisi oksidatif tanah, serta perbaikan sifat fisik tanah menjadikan biochar efektif dalam menekan emisi CH₄ pada sistem sawah tergenang.

Meskipun biochar secara konsisten menunjukkan kemampuan dalam menurunkan emisi CH₄ melalui pengaruh terhadap kondisi anaerob dan aktivitas mikroba metanogen, dinamika nitrogen dalam tanah sawah memberikan mekanisme yang lebih kompleks terhadap pembentukan gas rumah kaca lainnya, yaitu dinitrogen oksida (N₂O). Proses nitrifikasi dan denitrifikasi yang dipengaruhi oleh ketersediaan nitrogen, kelembaban tanah, serta kondisi redoks menjadi faktor kunci yang menentukan arah pengaruh biochar terhadap emisi N₂O, sehingga diperlukan pembahasan tersendiri untuk memahami perannya secara lebih spesifik pada Tabel III.

Tabel III. Ringkasan penelitian terbaru mengenai peran biochar dalam mitigasi gas N₂O

Referensi	Temuan Utama
Shen <i>et al.</i> (2024)	Biochar 2% w/w pada sistem padi dengan AWD menurunkan emisi N ₂ O sekitar 19,7–35,7%.
Feng <i>et al.</i> (2020)	Biochar jerami padi 7,5 t ha ⁻¹ pada sistem sawah 2 musim menurunkan emisi N ₂ O sekitar 19,7–35,7%.
Rassaei <i>et al.</i> (2025)	Biochar ampas tebu 2,5–5% w/w pada tanah sawah alkalis menurunkan emisi N ₂ O sekitar 17,3–35,7%.
Chen <i>et al.</i> (2023)	Biochar 4,5–13,5 t ha ⁻¹ pada sistem padi jangka panjang (7 tahun) menurunkan emisi N ₂ O sekitar 29%.
Kumar <i>et al.</i> (2024)	Biochar jerami gandum dan padi 5 t ha ⁻¹ pada <i>field experiment</i> menurunkan emisi N ₂ O sekitar 10,6–13,8%.
Zhong <i>et al.</i> (2025)	Meta-analisis berbagai biochar pada lahan pertanian (termasuk padi) dengan dosis 20-50 t ha ⁻¹ menunjukkan penurunan emisi N ₂ O sekitar 19-48%.

Secara umum, hasil penelitian menunjukkan bahwa pengaruh biochar terhadap emisi N₂O bersifat variatif, dengan kecenderungan dominan berupa penurunan emisi pada kisaran sekitar 17–48%, meskipun pada kondisi tertentu dapat terjadi peningkatan emisi N₂O (Zhong *et al.*, 2025; Shen *et al.*, 2024). Variasi respons ini terutama dipengaruhi oleh interaksi antara jenis biochar, dosis, serta kondisi pengelolaan air dan nitrogen pada sistem sawah.

Dari sisi mekanisme siklus nitrogen, penurunan emisi N₂O umumnya dikaitkan dengan peningkatan aktivitas *nosZ*, yang berperan dalam reduksi N₂O menjadi N₂, serta penurunan rasio gen denitrifikasi seperti *mcrA/nosZ* atau peningkatan efisiensi jalur denitrifikasi akhir (Shen *et al.*, 2024; Iboko *et al.*, 2023). Selain itu, beberapa studi juga menunjukkan bahwa biochar dapat meningkatkan pH tanah dan memperbaiki kondisi aerasi, yang mendorong proses denitrifikasi menjadi lebih lengkap sehingga mengurangi akumulasi N₂O sebagai produk antara (Zhong *et al.*, 2025; Rassaei, 2025).

Namun, pada kondisi tertentu seperti ketersediaan nitrogen tinggi atau sistem inkubasi, biochar dapat meningkatkan emisi N₂O melalui stimulasi proses nitrifikasi, yang ditunjukkan oleh peningkatan komunitas AOA/AOB *amoA* serta *nirK* dan *nirS*, yang berkontribusi

pada produksi N_2O (Lin *et al.*, 2017; Sun *et al.*, 2021). Hal ini menunjukkan bahwa keseimbangan antara nitrifikasi dan denitrifikasi sangat menentukan arah pengaruh biochar terhadap emisi N_2O .

Secara keseluruhan, dinamika ini menegaskan bahwa peran biochar dalam mitigasi N_2O sangat bergantung pada kondisi sistem tanah–tanaman–air yang mengontrol jalur transformasi nitrogen. Oleh karena itu, pemahaman yang lebih spesifik mengenai mekanisme biochar dalam memodulasi proses pembentukan N_2O menjadi penting untuk mengevaluasi efektivitasnya secara komprehensif pada ekosistem padi sawah. Selanjutnya, pembahasan akan difokuskan pada faktor-faktor yang secara spesifik mengontrol pembentukan dan reduksi N_2O dalam sistem tersebut.

Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Efektivitas Biochar

Efektivitas biochar pada sistem budidaya padi sawah tidak hanya ditentukan oleh karakteristik biochar itu sendiri, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh kondisi tanah dan praktik pengelolaan lahan. Salah satu faktor utama adalah jenis bahan baku dan suhu pirolisis, yang menentukan sifat kimia dan fisik biochar seperti kandungan hara, luas permukaan, dan kemampuan adsorpsi, sehingga memengaruhi produktivitas tanaman serta mitigasi emisi gas rumah kaca (Zhong *et al.*, 2026). Selain itu, dosis aplikasi juga menjadi faktor penting, di mana dosis sedang umumnya memberikan hasil optimal terhadap peningkatan hasil panen dan efisiensi penggunaan sumber daya, sedangkan dosis yang terlalu rendah atau terlalu tinggi dapat mengurangi efektivitas biochar (Nam *et al.*, 2024).

Kondisi tanah awal juga sangat menentukan respons biochar, terutama pada tanah dengan tingkat kesuburan berbeda, di mana biochar cenderung memberikan dampak lebih signifikan melalui perbaikan sifat kimia tanah, peningkatan porositas, serta peningkatan ketersediaan unsur hara (Mon *et al.*, 2024). Selain itu, sistem pengelolaan air seperti *alternate wetting and drying* (AWD) terbukti dapat meningkatkan efektivitas biochar dalam meningkatkan produktivitas dan menurunkan emisi CH_4 maupun N_2O dibandingkan sistem genangan terus-menerus (Shen *et al.*, 2024; Nam *et al.*, 2024). Kombinasi biochar dengan pupuk organik juga dapat meningkatkan ketersediaan hara dan hasil tanaman tanpa meningkatkan emisi gas rumah kaca secara signifikan, meskipun responsnya dipengaruhi oleh jenis pupuk organik dan karakteristik tanah (Mon *et al.*, 2024).

Faktor lain seperti dosis dan bentuk pupuk nitrogen turut memengaruhi dinamika nitrogen tanah, di mana biochar dapat meningkatkan serapan N tanaman sekaligus

menurunkan kehilangan N melalui volatilisasi amonia dan emisi N_2O melalui perubahan komunitas mikroba serta aktivitas gen fungsional yang terlibat dalam siklus nitrogen (Yi *et al.*, 2023). Selain faktor-faktor tersebut, karakteristik biochar yang berkembang selama berada di dalam tanah juga memengaruhi efektivitas jangka panjangnya terhadap perbaikan kualitas tanah, efisiensi penggunaan hara, dan mitigasi emisi gas rumah kaca (Zhong *et al.*, 2026).

Peluang dan Tantangan Pemanfaatan Biochar pada Budidaya Padi Sawah

Pemanfaatan biochar pada budidaya padi sawah menunjukkan potensi besar sebagai teknologi pertanian berkelanjutan yang mampu meningkatkan produktivitas, memperbaiki kualitas tanah, serta berkontribusi terhadap mitigasi perubahan iklim melalui peningkatan sekuestrasi karbon (Fadavi *et al.*, 2025). Berbagai studi terbaru menunjukkan bahwa aplikasi biochar dapat meningkatkan karbon tanah secara signifikan serta menghasilkan peningkatan hasil padi dan efisiensi penggunaan nitrogen, terutama pada kondisi tanah terdegradasi atau dengan pengelolaan air yang lebih efisien (Liu *et al.*, 2022; Feng *et al.*, 2024). Selain itu, biochar juga sering dilaporkan mampu menurunkan emisi gas rumah kaca seperti metana (CH_4) dan dinitrogen oksida (N_2O), meskipun besarnya penurunan sangat bergantung pada dosis, jenis biochar, serta kondisi pengelolaan lahan (Fadavi *et al.*, 2025).

Efektivitas biochar tidak bersifat universal dan sangat dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara karakteristik biochar, kondisi tanah, iklim, serta praktik budidaya seperti irigasi dan pemupukan nitrogen (Fadavi *et al.*, 2025). Pada beberapa kondisi tertentu, terutama pada aplikasi dosis tinggi atau pengelolaan yang kurang tepat, biochar bahkan dapat meningkatkan emisi CH_4 atau tidak memberikan keuntungan ekonomi yang signifikan (Fadavi *et al.*, 2025). Dari sisi ekonomi, meskipun terdapat peningkatan hasil panen dan efisiensi produksi pada beberapa kasus, biaya produksi dan aplikasi biochar yang masih tinggi menjadi salah satu hambatan utama, terutama bagi petani kecil (Ariningsih & Ashari, 2024; Fadavi *et al.*, 2025). Selain itu, keterbatasan teknologi produksi, kualitas biochar yang tidak seragam, serta lemahnya insentif kebijakan dan pasar karbon turut memperlambat adopsi secara luas di tingkat petani (Ariningsih & Ashari, 2024; Fadavi *et al.*, 2025).

Biochar menawarkan peluang besar dalam mendukung sistem pertanian padi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan, namun masih menghadapi tantangan dalam aspek teknis, ekonomi, dan kelembagaan. Oleh karena itu, diperlukan optimalisasi dosis dan jenis biochar yang sesuai dengan kondisi lokal, integrasi dengan praktik pengelolaan air dan hara yang efisien, serta dukungan kebijakan dan

insentif ekonomi agar implementasi biochar dapat memberikan manfaat yang maksimal baik secara agronomis maupun lingkungan (Liu *et al.*, 2022; Fadavi *et al.*, 2025).

KESIMPULAN

Aplikasi biochar pada sistem budidaya padi sawah terbukti menjadi strategi yang sangat efektif dan menjanjikan untuk meningkatkan sekuestrasi karbon organik tanah sebesar 27–45% sekaligus memitigasi emisi gas metana (CH₄) dan dinitrogen oksida (N₂O) secara signifikan melalui modulasi aktivitas mikroba serta perbaikan sifat fisik-kimia tanah. Efektivitas teknologi ini tidak bersifat universal dan sangat bergantung pada kombinasi jenis bahan baku biomassa, suhu pirolisis, dosis pengaplikasian, serta interaksinya dengan sistem pengelolaan air (seperti metode pengairan basah-kering bergantian) dan hara tanaman. Guna mengatasi tantangan ekonomi berupa tingginya biaya produksi bagi petani kecil serta variabilitas hasil di lapangan, penelitian lanjutan harus difokuskan pada pemetaan dosis optimal berbasis spesifik lokasi (kondisi tanah awal), pengembangan rekayasa teknologi pirolisis yang murah dan efisien, serta analisis kelayakan ekonomi jangka panjang guna merumuskan skema insentif pasar karbon yang aplikatif di tingkat petani.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, M., Zhao, W., Tariq, A. dan Wu, P. 2024. Agronomic and environmental impacts of biochar application in paddy fields: A global meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 360:108723.
- Ariningsih, E. dan Ashari. 2024. The Potential Utilisation of Rice Biomass for Biochar to Support Sustainable Rice Production. *BIO Web of Conferences*, 119:05001.
- Bi, Y., Cai, S., Wang, Y., Zhao, X., Wang, S., Xing, G. dan Zhu, Z.L. 2020. Structural and microbial evidence for different soil carbon sequestration after four-year successive biochar application in two different paddy soils. *Chemosphere*, 254:126881.
- Bu, F.F., Nan, Q., Li, W., Bolan, N., Sarkar, B., Meng, J. dan Wang, H. 2022. Meta-analysis for quantifying carbon sequestration and greenhouse gas emission in paddy soils one year after biochar application. *Agronomy*, 12(12):3065.
- Chen, J., Sun, X., Li, L., Liu, X., Zhang, B., Zheng, J. dan Pan, G. 2016. Change in active microbial community structure, abundance and carbon cycling in an acid rice paddy soil with the addition of biochar. *European Journal of Soil Science*, 67.
- Chen, Y., Zhang, X. dan Liu, J. 2023. Sustainable agricultural practices for mitigating greenhouse gas emissions in Asian rice paddies. *Journal of Cleaner Production*, 412:137351.
- Chen, Z., Han, S., Dong, Z., Li, H. dan Zhang, A. 2023. Trade-off between soil carbon sequestration and net ecosystem economic benefits for paddy fields under long-term application of biochar. *GCB Bioenergy*, 16.
- Fadavi, C., Mensah, F.P., Felicia, T., Saaka, S., Rabi, A.W., Daniel, A., Solomon, A. dan Emmanuel, T. 2025. Biochar as a Soil Amendment in Rice Production: Current Status, Debates, and Opportunities for Enhancing Rice Farming in Ghana. *Journal of Natural Science Research and Review*, 1(6).
- Feng, J., Piao, J., Miao, S., Che, W., Li, X., Li, X., Shiraiwa, T., Tanaka, T., Taniyoshi, K., Hua, S. dan Lan, Y. 2024. Long-term effects of biochar one-off application on soil physicochemical properties, salt concentration, nutrient availability, enzyme activity, and rice yield of highly saline-alkali paddy soils: Based on a 6-year field experiment. *Biochar*, 6:86.
- Feng, Y., Li, D., Sun, H., Xue, L., Zhou, B., Yang, L.Z., Liu, J. dan Xing, B. 2020. Wood vinegar and biochar co-application mitigates nitrous oxide and methane emissions from rice paddy soil: A two-year experiment. *Environmental Pollution*, 267:115403.
- Han, L., Liu, B., Luo, Y., Chen, L., Xu, C., Sun, K. dan Xing, B. 2024. Quantifying the negative effects of dissolved organic carbon of maize straw-derived biochar on its carbon sequestration potential in a paddy soil. *Soil Biology and Biochemistry*.
- Han, X., Sun, X., Wang, C., Wu, M., Dong, D., Zhong, T., Thies, J. dan Wu, W. 2016. Mitigating methane emission from paddy soil with rice-straw biochar amendment under projected climate change. *Scientific Reports*, 6.
- Iboko, M.P., Dossou-Yovo, E., Obalum, S.E., Oraegbunam, C.J., Diedhiou, S., Brümmer, C. dan Teme, N. 2023. Paddy rice yield and greenhouse gas emissions: Any trade-off due to co-application of biochar and nitrogen fertilizer? A systematic review. *Heliyon*, 9.
- Kumar, R., Mondal, B. dan Bordoloi, N. 2024. Application of straw-derived biochar: A sustainable approach to improve soil quality and crop yield and reduce N₂O

- emissions in paddy soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 31:60804-60818.
- Kumar, S., Patel, R. dan Singh, A.K. 2025. A comprehensive review on biochar mechanisms for soil carbon sequestration and greenhouse gas mitigation in wetland ecosystems. *Science of The Total Environment*, 908:168340.
- Lal, R., Smith, P., Jungkunst, H.F. et al. 2018. The carbon sequestration potential of terrestrial ecosystems. *Journal of Soil and Water Conservation*, 73(6):145A-152A.
- Lee, J.M., Jeong, H.C., Gwon, H., Lee, H.S., Park, H.R., Kim, G.S., Park, D.G. dan Lee, S.I. 2023. Effects of Biochar on Methane Emissions and Crop Yields in East Asian Paddy Fields: A Regional Scale Meta-Analysis. *Sustainability*, 15.
- Lehmann, J., Cowie, A., Masiello, C.A. et al. 2021. Biochar in climate change mitigation. *Nature Geoscience*, 14(12):883-892.
- Lin, Y., Ding, W., Liu, D., He, T., Yoo, G., Yuan, J., Chen, Z. dan Fan, J. 2017. Wheat straw-derived biochar amendment stimulated N₂O emissions from rice paddy soils by regulating the amoA genes of ammonia-oxidizing bacteria. *Soil Biology and Biochemistry*, 113:89-98.
- Liu, S., Zhang, Y., Zong, Y., Hu, Z., Wu, S., Zhou, J., Jin, Y. dan Zou, J. 2016. Response of soil carbon dioxide fluxes, soil organic carbon and microbial biomass carbon to biochar amendment: A meta-analysis. *GCB Bioenergy*, 8.
- Liu, Y., Li, H.H., Hu, T., Mahmoud, A., Li, J., Zhu, R.Y., Jiao, X. dan Jing, P. 2022. A quantitative review of the effects of biochar application on rice yield and nitrogen use efficiency in paddy fields: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 848:154792.
- Liu, Z., Zhang, W., Li, S., Song, K., Zheng, J., Wang, Y., Bian, R., Zhang, X. dan Pan, G. 2023. Biochar-plant interactions enhance nonbiochar carbon sequestration in a rice paddy soil. *Communications Earth & Environment*, 4.
- Lu, H., Bian, R., Xia, X., Cheng, K., Liu, X., Liu, Y., Wang, P., Li, Z., Zheng, J., Zhang, X., Li, L., Joseph, S., Drosos, M. dan Pan, G. 2020. Legacy of soil health improvement with carbon increase following one time amendment of biochar in a paddy soil – A rice farm trial. *Geoderma*, 376:114567.
- Mon, W.W., Toma, Y. dan Ueno, H. 2024. Combined effects of rice husk biochar and organic manures on soil chemical properties and greenhouse gas emissions from two different paddy soils. *Soil Systems*, 8(1):32.
- Nam, T.S., Thao, H.V. dan Chiem, N. 2024. Reducing greenhouse gas emissions from rice cultivation applied with melaleuca and rice husk biochar in the Vietnamese Mekong Delta. *Soil Science and Plant Nutrition*.
- Nan, Q., Xin, L., Qin, Y., Waqas, M. dan Wu, W. 2021. Exploring long-term effects of biochar on mitigating methane emissions from paddy soil: A review. *Biochar*, 3:125-134.
- Nguyen, B.T., Trinh, N.N. dan Le, T.H. 2023. Biochar amendments improve rice productivity and nitrogen use efficiency under tropical climate conditions. *Field Crops Research*, 295:108876.
- Pratiwi, E.P.A. dan 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*, 14:521-532.
- Qi, L., Chang, S.X., Zhou, P., Huang, R., Wang, Y., Wang, Z. dan Gao, M. 2020. Biochar decreases methanogenic archaea abundance and methane emissions in a flooded paddy soil. *Science of the Total Environment*, 752:141958.
- Rassaei, F. 2025. Optimizing Soil Amendments: Biochar Counteracts Polystyrene-Induced Increases in Nitrous Oxide Emissions and Productivity Losses in Rice Cropping Systems. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 56:1949-1977.
- Setyanto, P., Wihardjaka, A. dan Pramono, A. 2022. Methane emissions from Indonesian paddy fields: mitigation strategies and future challenges. *Paddy and Water Environment*, 20(3):415-427.
- Shen, Q., Wang, H., Lazcano, C., Voroney, P., Elrys, A.S., Gou, G., Li, H., Zhu, Q., Chen, Y., Wu, Y., Lei, M. dan Brookes, P.C. 2024. Biochar amendments to tropical paddy soil increase rice yields and decrease N₂O emissions by modifying the genes involved in nitrogen cycling. *Soil and Tillage Research*, 243:105917.
- Smith, P., Calvin, K., Nkem, J. et al. 2021. Global greenhouse gas emissions from agriculture: trends, drivers, and mitigation pathways. *Global Change Biology*, 27(11):2465-2481.
- Somboon, S., Rossopa, B., Yodda, S., Sukitprapanon, T., Chidthaisong, A. dan Lawongsa, P. 2024. Mitigating methane emissions and global warming potential while increasing rice yield using biochar derived from leftover rice straw in a tropical paddy soil. *Scientific Reports*, 14.
- Sriphiom, P., Towprayoon, S., Yagi, K., Rossopa, B. dan Chidthaisong, A. 2022. Changes in methane

- production and oxidation in rice paddy soils induced by biochar addition. *Applied Soil Ecology*.
- Sun, H., Zhang, Y., Yang, Y., Chen, Y., Jeyakumar, P., Shao, Q., Zhou, Y., Zhu, R.L., Qian, Q., Fan, Y., Xiang, S., Zhai, N., Li, Y.V., Zhao, Q. dan Wang, H. 2021. Effect of biofertilizer and wheat straw biochar application on nitrous oxide emission and ammonia volatilization from paddy soil. *Environmental Pollution*, 275:116640.
- Wang, J., Xiong, Z. dan Kuzyakov, Y. 2024. Pyrolysis temperature affects biochar stability and carbon sequestration potential in agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 188:109228.
- WMO. 2025. WMO Greenhouse Gas Bulletin: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2024. Geneva: World Meteorological Organization.
- Yi, Z., Jeyakumar, P., Yin, C. dan Sun, H. 2023. Effects of biochar in combination with varied N inputs on grain yield, N uptake, NH₃ volatilization, and N₂O emission in paddy soil. *Frontiers in Microbiology*, 14:1174805.
- Zhang, H., Chen, C. dan Wang, G. 2022. Simultaneous mitigation of CH₄ and N₂O emissions in rice paddies by biochar: Mechanisms and field evidence. *Environmental Pollution*, 304:119213.
- Zhong, L., Wang, P., Gu, Z., Song, Y., Cai, X., Yu, G., Xu, X. dan Kuzyakov, Y. 2025. Biochar reduces N₂O emission from fertilized cropland soils: A meta-analysis. *Carbon Research*, 4.
- Zhong, L., Ma, S., Luo, M., Cui, J., Chen, D., Zeng, W., Zhao, Y., Xiao, X., Zhang, Y. dan Shen, X. 2026. Biochar outperforms straw and manure at equal carbon inputs for mitigating greenhouse gas emissions and enhancing soil health in rice paddies. *Soil Use and Management*.