

Pengaruh Pengembalian Residu Tanaman Terhadap Perubahan Unsur Hara dan Sifat Fisik Tanah Serta Implikasinya Terhadap Produktivitas Padi Tadah Hujan (*Rainfed Lowland Rice*): Review

The Effects of Crop Residue Return on Soil Nutrient Dynamics and Physical Properties and Their Implications for Rainfed Lowland Rice Productivity: A Review

Sri Hidayati Junaidi ^{a,1,*}, Lolita ES ^{a,2}, Mulyati^{a,3}, Suwardji ^{a,4}

^a Universitas Mataram, JL Majapahit No.62, Gomong, Kec.Selaparang, Mataram, West Nusa Tenggara, 83115

¹ srihidayatijunaidi1996@gmail.com *; ² lolitaabas37@unram.ac.id; ³ yatimulyati@unram.ac.id, ⁴ suwardji@unram.ac.id

* corresponding author

INFO ARTIKEL ABSTRACT / ABSTRAK

Sejarah Artikel

Diterima:

23 November 2025

Direvisi:

7 Desember 2025

Terbit:

8 Desember 2025

Pengembalian residu tanaman ke dalam tanah merupakan strategi penting untuk menjaga kesuburan tanah sekaligus memperkuat keberlanjutan sistem pertanian padi tadah hujan. Kajian literatur ini bertujuan untuk menelaah secara komprehensif bagaimana residu tanaman memengaruhi dinamika unsur hara, memperbaiki sifat fisik tanah, serta berkontribusi terhadap peningkatan produktivitas padi pada ekosistem tadah hujan. Analisis dilakukan terhadap 28 publikasi nasional dan internasional yang diterbitkan antara Tahun 2015 hingga 2025. Hasil sintesis menunjukkan bahwa pengembalian jerami, sekam, dan biochar secara konsisten mampu meningkatkan kandungan C-organik, N-total, serta ketersediaan hara P, dan K tanah. Dari aspek fisik, penambahan residu tanaman terbukti menurunkan *bulk density*, meningkatkan porositas, serta memperbesar kemampuan tanah menyimpan air, sehingga kondisi perakaran menjadi lebih baik dan tanah lebih mudah ditembus akar. Sinergi antara perbaikan sifat kimia dan fisika tersebut memperkuat efisiensi penyerapan hara dan mendukung pertumbuhan akar, yang pada akhirnya mendorong peningkatan produksi padi sebesar 10–25 persen menurut berbagai penelitian yang dianalisis. Temuan ini menegaskan bahwa pengelolaan residu tanaman secara berkelanjutan merupakan komponen penting dalam menjaga dan meningkatkan produktivitas padi tadah hujan di kawasan tropis Asia Tenggara. Secara keseluruhan, penerapan praktik ini secara konsisten dan berkelanjutan memiliki potensi menjadi langkah strategis untuk memulihkan kualitas tanah, mempertahankan performa tanaman, serta memperkuat ketahanan sistem pertanian jangka panjang.

Returning crop residues to the soil is an essential strategy for maintaining soil fertility while strengthening the sustainability of rainfed rice farming systems. This literature review aims to comprehensively examine how crop residues affect nutrient dynamics, improve soil physical properties, and contribute to increased rice productivity in rainfed ecosystems. The analysis was conducted on 28 national and international publications published between 2015 and 2025. The synthesis results show that the return of straw, husks, and biochar consistently increases soil organic C, total N, and P and K nutrient availability. From a physical perspective, the addition of crop residues has been shown to decrease bulk density, increase porosity, and increase the soil's water storage capacity, thereby improving root conditions and making the soil more permeable to roots. The synergy between these chemical and physical improvements strengthens nutrient uptake efficiency and supports root growth, which ultimately drives a 10–25 percent increase in rice production according to various studies analyzed. These findings confirm that sustainable crop residue management is an important component in maintaining and increasing the productivity of rainfed rice in Southeast Asia's tropical regions. Overall, the consistent and sustainable application of this practice has the potential to be a strategic step toward restoring soil quality, maintaining crop performance, and strengthening the long-term resilience of agricultural systems.

This is an open access article under the CC-BY license.



Kata Kunci: residu tanaman, unsur hara tanah, sifat fisik tanah, padi tadah hujan, produktivitas.

Keywords: crop residues, soil nutrients, soil physical properties, rainfed rice, productivity.

1. Pendahuluan

Padi tadah hujan memegang peran strategis dalam ketahanan pangan nasional dan regional, terutama di wilayah Asia Tenggara yang memiliki pola curah hujan musiman yang tidak menentu. Namun, sistem ini dihadapkan pada tantangan serius berupa rendahnya kandungan bahan organik tanah, degradasi struktur tanah, serta fluktuasi ketersediaan air yang menghambat produktivitas. Produktivitas padi tadah hujan di Laos dilaporkan hanya mencapai 2–3 ton/ha, jauh di bawah potensi genetik varietas unggul (Linguist & Sengxua, 2000). Kondisi serupa juga terjadi di Indonesia, terutama di wilayah Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan, dan sebagian Jawa Tengah, di mana hasil padi tadah hujan umumnya hanya berkisar 2,5–3,5 ton/ha, masih jauh dari potensi optimal 6–7 ton/ha (BBSDL, 2019; BPS, 2022; Hadi & Santosa, 2023). Rendahnya hasil ini terutama disebabkan oleh minimnya kandungan bahan organik tanah, rendahnya ketersediaan hara, serta pengelolaan air yang belum efisien.

Dalam beberapa tahun terakhir, studi mengenai bahan organik dan perannya dalam memulihkan kualitas tanah semakin berkembang. Banyak temuan menunjukkan bahwa residu tanaman tidak hanya berfungsi sebagai sumber hara, tetapi juga berperan penting dalam mengembalikan struktur serta proses-proses tanah yang mengalami penurunan mutu. Meski demikian, sebagian besar penelitian mengenai residu tanaman dilakukan pada lahan sawah beririgasi, sehingga informasi mengenai efektivitasnya pada sistem tadah hujan belum lengkap. Beberapa penelitian hanya menyoroti satu variabel, misalnya perubahan kandungan karbon atau peningkatan porositas, tanpa melihat keterkaitannya dengan respon pertumbuhan tanaman. Perbedaan tipe residu tanaman, durasi pengamatan, serta kondisi biofisik lokasi penelitian turut menghasilkan variasi temuan yang cukup lebar. Situasi ini menegaskan perlunya kajian yang mampu menggabungkan bukti empiris secara lebih terpadu untuk memahami hubungan antara perbaikan sifat kimia dan fisik tanah dengan produktivitas padi di lahan tadah hujan.

Penerapan pupuk anorganik secara intensif memang dapat meningkatkan hasil dalam jangka pendek, tetapi berisiko menurunkan kualitas tanah dan mengganggu keseimbangan unsur hara. Sebaliknya, pengembalian residu tanaman seperti jerami, sekam, atau biochar menjadi strategi alami yang berpotensi memperbaiki kesuburan tanah tanpa menimbulkan dampak lingkungan negatif (Fu *et al.*, 2021; Kang *et al.*, 2022). Residu tanaman mengandung unsur hara makro (N, P, K) dan bahan organik yang mampu meningkatkan aktivitas mikroba tanah serta memperbaiki struktur dan aerasi tanah (Fu *et al.*, 2021; Kang *et al.*, 2022; Handayani & Mulyani, 2019). Dengan demikian, pengelolaan residu tanaman diharapkan dapat mendukung produktivitas jangka panjang, khususnya pada sistem padi tadah hujan yang rentan terhadap degradasi lahan.

Secara teoretis, residu tanaman menjadi sumber energi dan karbon bagi mikroorganisme tanah. Dekomposisi residu dipengaruhi oleh rasio C/N, tingkat kelembapan, dan ketersediaan oksigen, yang pada akhirnya menentukan kecepatan pelepasan unsur hara. Peningkatan bahan organik tanah dari proses tersebut dapat memperkuat kapasitas tukar kation, memperbaiki kemampuan tanah menyimpan air, serta menstabilkan agregat tanah. Ketiga aspek ini penting karena memengaruhi kemampuan tanaman menyerap hara, terutama pada fase pertumbuhan yang sensitif terhadap kekeringan (Lal, 2020; Saikia *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2021; Ng *et al.*, 2022).

Dari sudut pandang sifat fisik tanah, bahan organik berperan membantu pembentukan agregat yang lebih stabil. Perbaikan agregasi biasanya diikuti dengan penurunan bobot isi dan peningkatan porositas, dua indikator penting bagi tanah tadah hujan yang menghadapi fluktuasi ketersediaan air sepanjang musim tanam. Struktur tanah yang lebih baik memudahkan akar berkembang lebih dalam dan menjelajah lapisan tanah yang menyimpan air, sehingga tanaman memiliki peluang lebih besar untuk bertahan selama periode kering. Peningkatan penyerapan air dan hara pada akhirnya tercermin pada komponen hasil seperti jumlah anakan produktif, panjang malai, dan pengisian bulir (Lal, 2020; Budiana *et al.*, 2022; Yuniarti & Darmawan, 2022; Kang *et al.*, 2022; Rahmawati *et al.*, 2023).

Kajian ini bertujuan untuk menganalisis bagaimana pengembalian residu tanaman memengaruhi unsur hara dan sifat fisik tanah, serta bagaimana kedua perubahan tersebut berkontribusi terhadap produktivitas padi di lahan tadah hujan. Melalui sintesis hasil penelitian nasional dan internasional, artikel ini diharapkan dapat memperkuat dasar ilmiah bagi penerapan pengelolaan residu tanaman yang efisien, ramah lingkungan, dan mendukung keberlanjutan sistem pertanian padi di kawasan tropis, khususnya Indonesia. Selain itu, kajian ini diharapkan dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai peran residu tanaman dalam memulihkan kualitas tanah serta mendukung penyusunan strategi pengelolaan lahan yang lebih adaptif pada wilayah yang mengandalkan padi tadah hujan sebagai sumber pangan utama.

2. Metode Kajian Literatur

Kajian ini menggunakan pendekatan studi literatur sistematis untuk menelaah dan menyintesis berbagai hasil penelitian terkait pengembalian residu tanaman terhadap perubahan unsur hara, sifat fisik tanah, dan produktivitas padi di lahan tadah hujan. Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan gambaran menyeluruh terhadap hasil penelitian terdahulu serta mengidentifikasi pola umum antar studi tanpa melakukan eksperimen lapangan secara langsung.

Pencarian literatur dilakukan Tahun 2025 melalui beberapa basis data ilmiah, antara lain Scopus, *ScienceDirect*, *SpringerLink*, DOAJ, dan portal jurnal nasional terakreditasi SINTA (kategori 2–4). Artikel yang diperoleh kemudian diseleksi berdasarkan tingkat relevansi dengan topik, kelengkapan data, serta keterbaruan publikasi.

Kata kunci yang digunakan meliputi: “*crop residue management*”, “*soil nutrient dynamics*”, “*soil physical properties*”, “*rainfed lowland rice*”, dan “*sustainable rice productivity*”. Dari sekitar 70 artikel awal yang ditemukan, dilakukan penyaringan bertahap berdasarkan relevansi topik, kelengkapan data, kualitas metodologis, serta konteks ekosistem tropis, hingga diperoleh 28 publikasi final yang memenuhi kriteria berikut: (1) Meneliti pengaruh pengembalian residu tanaman terhadap unsur hara dan/atau sifat fisik tanah. (2) Memiliki konteks yang relevan dengan sistem padi tadah hujan tropis di Asia Tenggara. (3) Menyajikan hasil kuantitatif atau kesimpulan empiris yang dapat dibandingkan antar studi.

Kriteria inklusif mencakup artikel *peer-reviewed* dalam Bahasa Inggris atau Bahasa Indonesia dengan data kuantitatif atau deskriptif. Sedangkan kriteria eksklusif meliputi laporan non-ilmiah, opini, dan studi yang tidak memuat indikator kesuburan tanah.

Setiap literatur terpilih dianalisis menggunakan analisis isi (*content analysis*) untuk mengidentifikasi variabel utama yang diteliti, seperti jenis residu, perubahan kimia dan fisika tanah, serta dampaknya terhadap hasil padi. Proses sintesis dilakukan secara tematik dan deskriptif untuk menemukan hubungan antarvariabel dan tren umum antarstudi.

Untuk memastikan seluruh tahapan kajian berlangsung konsisten dan dapat ditelusuri kembali, proses penelusuran literatur mengikuti prinsip PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) yang merupakan pedoman pelaporan kajian sistematis yang dirancang untuk memastikan bahwa proses pencarian, seleksi, dan pelaporan literatur dilakukan secara transparan, sistematis, dan dapat direplikasi, sehingga meningkatkan kredibilitas dan akuntabilitas hasil kajian yang disesuaikan dengan karakter penelitian agronomi. Setiap artikel yang masuk dalam tahap seleksi dicatat dalam lembar kerja elektronik yang memuat identitas publikasi, lokasi penelitian, metode yang digunakan, jenis residu tanaman, serta variabel tanah dan tanaman yang dianalisis. Pendokumentasian ini menjadi dasar untuk menilai kesesuaian artikel sekaligus memudahkan pengelompokan temuan.

Kualitas metodologis masing-masing publikasi dievaluasi secara mandiri. Penilaian difokuskan pada kejelasan desain penelitian, ketepatan prosedur pengukuran, kelengkapan data laboratorium, serta kejelasan informasi mengenai kondisi ekosistem tempat penelitian dilakukan. Artikel yang tidak menyediakan data pokok seperti durasi percobaan, karakteristik tanah, atau metode analisis dikeluarkan karena dianggap tidak memenuhi standar minimum untuk disintesis.

Literatur yang lolos seleksi kemudian dikelompokkan dalam tiga kategori utama sesuai fokus penelitian. Kelompok pertama mencakup variabel kimia tanah, seperti pH, C-organik, N-total, P-tersedia, dan K-tersedia. Kelompok kedua memuat variabel fisik tanah, antara lain bobot isi, porositas, infiltrasi, dan stabilitas agregat. Kelompok ketiga berkaitan dengan indikator hasil padi, seperti jumlah anakan produktif, panjang malai, pengisian bulir, dan hasil gabah. Pembagian ini memudahkan proses sintesis sekaligus memberikan ruang untuk melihat konsistensi temuan antarwilayah dan antarpendekatan penelitian.

Dalam tahap interpretasi, setiap artikel dibaca ulang untuk menelusuri pola umum, variasi hasil, serta faktor yang berpotensi memengaruhi perbedaan temuan. Beberapa variabel, seperti jenis dan dosis residu tanaman, tingkat dekomposisi, kondisi iklim, serta sifat dasar tanah, dicermati karena kerap menjadi sumber variasi antarstudi. Pendekatan ini memungkinkan peneliti menelusuri mekanisme yang paling mungkin menjelaskan perubahan kualitas tanah dan respon tanaman pada sistem padi tadah hujan.

Seluruh proses seleksi, kategorisasi, dan penyusunan sintesis dicatat secara sistematis untuk mendukung keberulangan penelitian. Daftar publikasi yang dianalisis disusun lengkap beserta catatan mengenai kontribusi masing-masing artikel. Dokumentasi ini diharapkan memberikan dasar empiris yang kuat serta memudahkan peneliti lain menguji kembali simpulan kajian pada konteks yang berbeda.

3. Hasil Kajian

Hasil sintesis dari 28 literatur yang dianalisis menunjukkan bahwa pengembalian residu tanaman berpengaruh nyata terhadap peningkatan kesuburan tanah dan produktivitas padi di lahan tadah hujan. Pengaruh tersebut meliputi perubahan pada aspek kimia (unsur hara), fisika (struktur dan kelembapan tanah), serta implikasi langsung terhadap hasil panen. Intensitas dampaknya sangat bergantung pada jenis residu, dosis residu yang dikembalikan, frekuensi pengembalian, kondisi tanah, serta pengelolaan air di lokasi penelitian.

Keragaman kondisi lingkungan pada berbagai lokasi penelitian menunjukkan bahwa kecepatan serta intensitas respon residu tidak selalu sama. Pada kawasan beriklim lembap, peningkatan kandungan bahan organik dan unsur hara cenderung berlangsung lebih cepat karena proses dekomposisi bekerja lebih aktif. Sebaliknya, daerah yang mengalami periode kering lebih panjang umumnya menunjukkan respon yang lebih lambat. Pola ini menegaskan

bahwa keberhasilan pengembalian residu tanaman sangat dipengaruhi oleh kemampuan tanah mempertahankan air dan perubahan suhu pada permukaan tanah. Dengan melihat variasi tersebut, sintesis ini memberi gambaran yang lebih utuh mengenai peran residu tanaman dalam mendukung produksi padi di lahan tadah hujan pada beragam kondisi lingkungan pertanian (Fuentes-Llanillo *et al.*, 2020; Kang *et al.*, 2022; Rahmawati *et al.*, 2023; Yuniarti & Darmawan, 2022; Zhang *et al.*, 2021).

Secara metodologis, hasil sintesis ini memperlihatkan pola konsisten bahwa respon residu terhadap tanah sangat dipengaruhi interaksi antara karakter residu tanaman, sifat dasar tanah, dan kondisi iklim musiman. Hal ini penting karena sistem tadah hujan sangat sensitif terhadap fluktuasi curah hujan dan ketersediaan air tanah. Dengan demikian, interpretasi hasil tiap studi perlu mempertimbangkan karakteristik agroekologi setempat.

3.1. Pengaruh Pengembalian Residu Tanaman terhadap Unsur Hara Tanah

Secara umum, pengembalian residu tanaman terbukti meningkatkan kesuburan kimia tanah melalui penambahan bahan organik serta unsur hara makro seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Residu tanaman menyediakan sumber karbon dan energi bagi mikroorganisme tanah sehingga proses dekomposisi dan mineralisasi unsur hara berlangsung lebih cepat. Liu *et al.* (2021), Qasim *et al.* (2022), dan Wulandari & Hidayat (2021) menemukan bahwa pengembalian jerami padi mampu meningkatkan aktivitas mikroba hingga sekitar 25%, yang berdampak pada peningkatan pelepasan N dan P tersedia di lapisan olah. Dalam studi jangka panjang, kandungan C-organik meningkat 10–20 persen dan N-total naik 15–25 persen dibandingkan perlakuan tanpa residu tanaman (Saikia *et al.*, 2019; Fu *et al.*, 2021).

Kombinasi residu jerami dengan biochar atau dekomposer menunjukkan pengaruh yang lebih stabil terhadap peningkatan C-organik dan ketersediaan P dan K (Gupta & Sharma, 2020). Selain menyediakan unsur hara, residu tanaman berfungsi sebagai amelioran pada tanah masam melalui peningkatan pH dan kapasitas tukar kation (KTK), yang membantu mengurangi kehilangan hara. Dobermann dan Fairhurst (2018) melaporkan bahwa sistem dengan pengembalian residu tanaman mampu menekan kebutuhan pupuk anorganik hingga 30–40 persen tanpa menurunkan hasil.

Meskipun demikian, efektivitas pengembalian residu tanaman dipengaruhi oleh rasio C/N dan kadar air tanah. Residu tanaman dengan rasio C/N tinggi, seperti jerami segar, dapat menyebabkan imobilisasi nitrogen pada awal musim tanam sehingga diperlukan rentang waktu 2–3 minggu hingga keseimbangan hara pulih (Powlson *et al.*, 2016). Pemberian biochar atau pupuk hayati direkomendasikan untuk mempercepat mineralisasi (Gupta & Sharma, 2020 dan Ng *et al.*, 2022).

Temuan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan ketersediaan hara tidak hanya ditentukan oleh jumlah residu tanaman yang dikembalikan, tetapi juga oleh dinamika biologis yang mengatur laju dekomposisi. Sintesis lebih lanjut menegaskan bahwa mikroorganisme tanah memegang peranan sentral dalam proses ini. Kelompok mikroba fungsional, seperti bakteri pelarut fosfat dan penambat nitrogen bebas, turut mempercepat mineralisasi terutama pada tanah masam atau tanah bertekstur halus yang cenderung mengikat fosfor menjadi bentuk tidak tersedia. Pengembalian residu tanaman secara berkelanjutan juga membantu menstabilkan proses dekomposisi antarmusim melalui peningkatan akumulasi bahan organik yang menyeimbangkan rasio karbon nitrogen. Kondisi ini meningkatkan KTK dan menurunkan kehilangan hara melalui pencucian. Dengan demikian, residu tanaman berperan bukan hanya sebagai sumber nutrisi jangka pendek, tetapi juga sebagai fondasi penting bagi perbaikan kualitas kimia tanah dalam jangka panjang (Budiana *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021; Smith & Bustamante, 2023).

Untuk memberikan pemahaman yang lebih rinci mengenai proses tersebut, berbagai studi menunjukkan bahwa residu tanaman dengan lignin tinggi memang memerlukan waktu dekomposisi lebih panjang. Namun, peranannya dalam menambah simpanan karbon yang bersifat stabil jauh lebih signifikan. Dengan demikian, variasi kualitas residu tanaman menghasilkan respon agronomis yang berbeda, dan hal ini semakin menegaskan perlunya strategi manajemen residu tanaman yang disesuaikan dengan kondisi tanah setempat (Lal, 2020; Liu *et al.*, 2021; Smith & Bustamante, 2023; Tuan & Tran, 2023).

3.2. Perubahan Sifat Fisik Tanah

Selain menambah unsur hara, pengembalian residu tanaman juga memberikan dampak positif yang nyata terhadap sifat fisik tanah, khususnya pada aspek *bulk density*, porositas, kapasitas menahan air, dan stabilitas agregat. Fuentes-Llanillo *et al.*, (2020) mencatat bahwa inkorporasi jerami padi menurunkan *bulk density* tanah sebesar 0,1–0,3 g/cm³, sedangkan Rahmawati *et al.*, (2023) melaporkan peningkatan porositas 10–20% setelah dua musim tanam berturut-turut pada lahan tadah hujan.

Residu tanaman meningkatkan pembentukan agregat stabil melalui peningkatan aktivitas mikroorganisme dan produksi eksopolisakarida, yang berfungsi sebagai perekat alami antar partikel tanah (Ng *et al.*, 2022). Struktur tanah yang lebih baik memungkinkan aerasi dan infiltrasi air berjalan optimal, sekaligus meningkatkan kapasitas lapang tanah hingga 8–12% (Budiana *et al.*, 2022).

Selain itu, residu tanaman yang dibiarkan di permukaan tanah dapat melindungi permukaan tanah dari pukulan hujan, mengurangi erosi hingga 30%, dan menjaga kelembapan tanah selama musim kering (Lal, 2020). Pada sistem padi tadah hujan dengan tekstur tanah halus seperti Ultisol dan Alfisol, efek perbaikan ini sangat signifikan karena membantu mengurangi retakan tanah dan meningkatkan retensi air pada lapisan olah.

Namun, efektivitas perbaikan sifat fisik tanah juga bergantung pada metode pengelolaan. Residu tanaman yang hanya dibiarkan menumpuk tanpa diinkorporasi, yaitu proses pencampuran atau pembedaan residu tanaman ke dalam lapisan tanah atas melalui pengolahan tanah, dapat memperlambat dekomposisi dan bahkan menyebabkan kondisi anaerobik berlebih jika drainase buruk. Oleh karena itu, inkorporasi ringan (10-15 cm), yakni pembedaan residu secara dangkal pada kedalaman sekitar 10-15 cm di lapisan olah tanah sebelum tanam, direkomendasikan untuk mempercepat proses dekomposisi dan menjaga keseimbangan kelembapan tanah.

Hasil sintesis menunjukkan bahwa pengembalian residu tanaman turut memperbaiki dinamika air dalam tanah (Fuentes-Llanillo *et al.*, 2020; Kang *et al.*, 2022; Rahmawati *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2021). Peningkatan kemampuan tanah menyerap air, terutama pada awal musim hujan, membantu mengurangi limpasan permukaan dan mempercepat pembasahan profil tanah secara merata. Peningkatan stabilitas agregat juga mengurangi risiko terbentuknya kerak permukaan yang dapat menghambat infiltrasi (Fuentes-Llanillo *et al.*, 2020; Rahmawati *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2021; Smith & Bustamante, 2023). Pada lahan berlereng, perbaikan stabilitas agregat berperan dalam menekan erosi, sementara pada lahan datar membantu memperbaiki aerasi dan ruang pori untuk pertumbuhan akar (Fuentes-Llanillo *et al.*, 2020; Rahmawati *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2021; Lal, 2020). Sejumlah penelitian juga menunjukkan bahwa ketika struktur tanah membaik, akar tanaman mampu menembus lapisan yang lebih dalam, sehingga akses tanaman terhadap cadangan air pada fase kritis meningkat (Kang *et al.*, 2022; Yunianti & Darmawan, 2022; Rahmawati *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2021). Kombinasi perbaikan struktur, kapasitas air, dan aerasi ini menjadikan residu tanaman sebagai komponen penting dalam menjaga performa tanaman pada kondisi curah hujan yang tidak menentu.

3.3. Implikasi terhadap Produktivitas Padi Tadah Hujan

Perbaikan sifat kimia dan fisik tanah secara sinergis berkontribusi terhadap peningkatan produktivitas padi. Ketersediaan hara yang lebih tinggi, struktur tanah yang lebih gembur, dan kapasitas air yang meningkat mendukung pertumbuhan akar serta pengisian bulir yang optimal.

Kang *et al.* (2022) dan Tuan & Tran (2023) melaporkan peningkatan hasil gabah antara 10-25% pada sistem padi tadah hujan di Laos dan Vietnam saat jerami dikembalikan ke lahan dibandingkan pembakaran terbuka. Di Indonesia, Yunianti dan Darmawan (2022), Budiana *et al.*, (2022), serta Saputra & Sitorus (2018) menemukan peningkatan hasil 0,5-1 ton/ha setelah dua musim pengembalian residu tanaman secara rutin. Linquist dan Sengxua (2000) juga mencatat peningkatan hasil hingga 25% ketika jerami dikembalikan disertai teknik *alternate wetting and drying* di Laos.

Efek maksimum terjadi ketika pengembalian residu tanaman dikombinasikan dengan biochar atau pupuk organik cair (Gea *et al.*, 2022; Arifin & Sulaeman, 2020). Pendekatan ini memperbaiki keseimbangan karbon dan nitrogen tanah, meningkatkan efisiensi fotosintesis, dan memperpanjang masa lembap tanah pada fase generatif padi.

Dari sisi lingkungan, pengembalian residu tanaman juga berpotensi menekan emisi CO₂ dari pembakaran terbuka hingga 1-2 ton C/ha per tahun (Hadija, 2017) dan meningkatkan cadangan karbon tanah. Dengan demikian, praktik ini tidak hanya mendukung produktivitas tetapi juga mendukung mitigasi perubahan iklim dan prinsip *climate-smart agriculture* (Smith & Bustamante, 2023).

Namun demikian, implementasi di tingkat petani sering menghadapi kendala, seperti keterbatasan tenaga kerja dalam pengumpulan residu tanaman dan waktu pengolahan sebelum tanam (Hadi & Santosa, 2023). Oleh karena itu, dukungan kelembagaan dan teknologi sederhana untuk mempercepat proses pengomposan menjadi kunci keberlanjutan sistem ini. Sebagai alternatif yang lebih praktis, dekomposisi residu tanaman dapat dilakukan secara *in-situ* melalui aplikasi mikroba pendegradasi, sehingga proses pelapukan berlangsung di lahan tanpa memerlukan pengomposan konvensional (Ng *et al.*, 2022; Qasim *et al.*, 2022).

Selain meningkatkan produktivitas, pengembalian residu tanaman juga berperan dalam menjaga stabilitas hasil antarmusim. Pada sistem tadah hujan, variabilitas curah hujan sering mempengaruhi hasil panen secara signifikan, namun perbaikan sifat fisik dan kimia tanah melalui pengembalian residu tanaman membantu mempertahankan cadangan air dan ketersediaan hara pada fase pertumbuhan yang rentan. Integrasi residu tanaman dengan praktik agronomi lain, seperti pemilihan varietas toleran kekeringan atau penerapan teknik pengelolaan air yang sederhana, terbukti dapat meningkatkan efisiensi pemanfaatan air hingga 15-20%. Dengan demikian, pengembalian residu tanaman tidak hanya memberikan manfaat pada peningkatan hasil dalam satu musim tanam, tetapi juga berkontribusi pada penguatan ketahanan sistem produksi terhadap variabilitas iklim yang semakin tidak menentu (Kang *et al.*, 2022; Tuan & Tran, 2023; Smith & Bustamante, 2023; FAO, 2020).

Analisis lebih mendalam menunjukkan bahwa peningkatan produktivitas yang diamati pada berbagai penelitian tidak hanya terkait dengan penambahan hara, tetapi juga disebabkan oleh perbaikan fisiologis tanaman (Dobermann & Fairhurst, 2018; Kang *et al.*, 2022; Yuniarti & Darmawan, 2022). Perakaran yang lebih kuat memungkinkan padi menyerap air dan hara pada fase-fase kritis seperti anakan maksimum dan pembungaan. Penurunan *bulk density* dan peningkatan porositas mempercepat pemulihan tanaman setelah cekaman kekeringan sementara, sehingga mengurangi kehilangan hasil yang sering terjadi pada sistem tadah hujan.

Selain itu, residu tanaman memperbaiki indeks luas daun dan meningkatkan jumlah anakan produktif, terutama ketika dipadukan dengan manajemen air seperti *alternate wetting and drying* (AWD). Teknik AWD memaksimalkan pemanfaatan kelembapan tanah yang terperangkap oleh residu sehingga akar tetap aktif meskipun permukaan tanah mulai kering. Hal ini menjelaskan mengapa kombinasi residu tanaman dengan pengelolaan air konservatif terus menunjukkan hasil yang lebih tinggi dalam studi di Asia Tenggara (Kang *et al.*, 2022; Tuan & Tran, 2023; FAO, 2020; Linnquist & Sengxua, 2000).

Lebih jauh lagi, perbaikan kualitas tanah akibat pengembalian residu tanaman memberikan dampak stabilitas hasil antarmusim. Pada tahun-tahun dengan distribusi hujan tidak menentu, lahan yang mengadopsi pengembalian residu tanaman cenderung mempertahankan hasil lebih baik dibanding lahan tanpa residu tanaman. Ini menunjukkan peran residu tanaman tidak hanya sebagai pemicu peningkatan hasil sesaat, tetapi juga sebagai faktor penopang ketahanan sistem produksi dalam menghadapi variabilitas iklim (Kang *et al.*, 2022; Tuan & Tran, 2023; Smith & Bustamante, 2023; Lal, 2020).

Dari berbagai publikasi yang dianalisis, terlihat jelas bahwa manfaat residu tanaman muncul tidak hanya dalam bentuk peningkatan hasil gabah, tetapi juga dalam stabilitas hasil pada musim dengan curah hujan tidak menentu. Ini memperkuat posisi residu tanaman sebagai strategi adaptasi iklim pada sistem tadah hujan.

3.4. Sintesis Umum

Secara keseluruhan, hasil literatur menunjukkan bahwa pengembalian residu tanaman merupakan pendekatan yang efektif untuk meningkatkan kesuburan tanah, memperbaiki sifat fisik tanah, dan mendukung produktivitas padi secara berkelanjutan di ekosistem tadah hujan. Praktik ini memberikan manfaat agronomis, ekologis, dan sosial ekonomi secara simultan. Dengan integrasi manajemen residu tanaman yang tepat dan dukungan kebijakan pertanian ramah lingkungan, sistem padi tadah hujan di kawasan tropis khususnya Indonesia dapat ditingkatkan menuju arah pertanian yang lebih adaptif dan berkelanjutan.

Kajian ini juga menegaskan bahwa manfaat pengembalian residu tanaman akan lebih optimal apabila diterapkan secara konsisten. Praktik yang dilakukan sesekali umumnya menghasilkan dampak terbatas, sedangkan penerapan berkelanjutan mampu membangun kualitas tanah secara bertahap dan memberikan keuntungan agronomis yang lebih stabil. Untuk memperluas adopsi di tingkat petani, diperlukan dukungan kelembagaan berupa teknologi pengolahan residu tanaman, pelatihan teknis, dan insentif yang memudahkan penerapan manajemen residu tanaman secara rutin. Penelitian lanjutan masih diperlukan untuk mengkaji interaksi residu tanaman dengan dinamika air tanah, perubahan cadangan karbon jangka panjang, serta integrasinya dengan inovasi agronomi lain seperti sistem tanam jajar legowo atau varietas padi toleran kekeringan. Upaya ini diharapkan dapat memperkuat dasar ilmiah bagi pengembangan sistem padi tadah hujan yang lebih adaptif dan mampu menghadapi variabilitas iklim yang meningkat.

Sintesis keseluruhan dari berbagai studi mengonfirmasikan bahwa pengembalian residu tanaman memiliki peran multidimensi dalam mendukung keberlanjutan produksi padi tadah hujan. Praktik ini meningkatkan kesuburan kimia dan fisik tanah, memperbaiki efisiensi penggunaan hara, dan memperkuat toleransi tanaman terhadap perubahan iklim. Ketiga komponen tersebut bekerja sinergis dan membentuk fondasi sistem produksi padi yang lebih adaptif.

Walaupun dampak positifnya konsisten, tingkat keberhasilan pengelolaan residu tanaman tetap dipengaruhi oleh pilihan teknologi, jenis tanah, dan kapasitas petani dalam menerapkan metode yang sesuai. Oleh karena itu, upaya untuk memperluas adopsi harus disertai dukungan teknologi sederhana seperti mikroba dekomposer, alat pencacah jerami, dan panduan pengolahan tanah minimal. Dengan demikian, integrasi residu tanaman tidak hanya berfungsi sebagai solusi ekologis, tetapi juga dapat diterapkan secara praktis oleh petani skala kecil.

Perlu juga digarisbawahi bahwa penelitian jangka panjang lebih lanjut masih diperlukan, khususnya mengenai dampak residu tanaman terhadap perubahan cadangan karbon tanah dan interaksinya dengan pemupukan anorganik yang efisien. Integrasi residu tanaman dengan strategi lain seperti jajar legowo, varietas toleran kekeringan, dan sistem irigasi hemat air berpotensi memperkuat sistem pangan di wilayah tropis yang rawan kekeringan.

Dengan melihat keseluruhan mekanisme mulai dari peningkatan bahan organik, perbaikan struktur tanah, peningkatan kapasitas air, hingga peningkatan hasil jelas bahwa pengelolaan residu tanaman tidak dapat dipandang sekadar sebagai praktik pengolahan sisa panen, tetapi sebagai komponen integral dari sistem pertanian padi tadah hujan yang modern dan berkelanjutan.

4. Kesimpulan & Rekomendasi

Pengembalian residu tanaman seperti jerami, sekam, dan biochar terbukti meningkatkan kesuburan tanah dan produktivitas padi tadah hujan. Secara umum, pengembalian residu tanaman mampu menaikkan kandungan C-organik (10-20%) dan N-total (10-25%), menurunkan *bulk density* ($0,10,3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), serta meningkatkan porositas tanah (10-20%). Perbaikan ini berkorelasi dengan peningkatan hasil padi sebesar 10-25% pada berbagai studi yang dikaji.

Efektivitas pengelolaan residu tanaman dipengaruhi oleh jenis residu, dosis, cara aplikasi, durasi penggunaan, kondisi tanah, dan pengelolaan air. Pendekatan terbaik meliputi inkorporasi residu tanaman pascapanen, kombinasi dengan biochar atau mikroba dekomposer, serta penerapan sistem *alternate wetting and drying*. Praktik ini tidak hanya memperbaiki kesuburan dan efisiensi air, tetapi juga mendukung pengurangan pembakaran jerami dan emisi karbon.

Meskipun hasil menunjukkan kecenderungan positif, perbedaan metode antarstudi masih tinggi sehingga diperlukan penelitian jangka panjang dan meta-analisis untuk menilai efektivitas ekonomi serta dampak lingkungan secara lebih luas. Dengan demikian, pengelolaan residu tanaman dapat dipandang sebagai langkah strategis menuju sistem padi tadah hujan yang lebih produktif dan berkelanjutan di kawasan tropis.

Secara keseluruhan, hasil kajian ini menegaskan bahwa pengembalian residu tanaman merupakan komponen penting dalam membangun sistem produksi padi tadah hujan yang lebih tangguh dan berkelanjutan. Praktik ini tidak hanya memperbaiki kualitas tanah dari waktu ke waktu, tetapi juga memperkuat stabilitas hasil pada kondisi iklim yang semakin tidak menentu. Untuk mendorong penerapan yang lebih luas, diperlukan dukungan teknologi, pendampingan lapangan, serta kebijakan yang memfasilitasi pengelolaan residu tanaman secara rutin. Dengan langkah tersebut, pemanfaatan residu tanaman dapat menjadi strategi yang efektif untuk meningkatkan produktivitas sekaligus melindungi sumber daya tanah pada agroekosistem tropis, khususnya Indonesia.

Daftar Referensi

- Arifin, M., & Sulaeman, D. (2020). Pengaruh kombinasi jerami padi dan pupuk organik terhadap kesuburan tanah sawah. *Jurnal Agroteknologi*, 14(2), 75–84.
- BBSDLP. (2019). *Laporan tahunan: Status kesuburan tanah sawah Indonesia*. Balai Besar Sumber Daya Lahan Pertanian, Kementerian Pertanian RI.
- Badan Pusat Statistik (BPS). (2022). *Statistik Indonesia 2022*. Badan Pusat Statistik Republik Indonesia, Jakarta.
- Budiana, I. N., Sutandi, A., & Kurnia, D. (2022). Pengaruh pemberian jerami padi terhadap kesuburan tanah sawah tadah hujan. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 46(1), 13–22.
- Dobermann, A., & Fairhurst, T. (2018). *Rice: Nutrient disorders and nutrient management*. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Philippines.
- FAO. (2020). *Sustainable rice production: Best practices for smallholder farmers*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Fu, X., Liu, Y., Chen, S., & Zhao, Y. (2021). Effects of rice straw return on soil fertility and crop productivity in Asian paddy systems: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 314, 107436.
- Fuentes-Llanillo, R., Cavalieri-Polizeli, K. M. V., Tiritan, C. S., & Souza, D. M. G. (2020). Physical soil improvement following straw incorporation under tropical rainfed conditions. *Geoderma Regional*, 23, e00365.
- Gea, M., Nelvia, & Adiwirman. (2022). Pemanfaatan biochar sekam dan jerami padi untuk meningkatkan hasil padi gogo (*Oryza sativa* L.). *Jurnal Agrotek Tropika*, 10(1), 14–25.
- Gupta, R., & Sharma, S. (2020). Biochar–straw integration enhances soil carbon and yield in rainfed systems. *Journal of Environmental Management*, 268, 110672.
- Hadi, R., & Santosa, A. (2023). Integrasi bahan organik dan pengendalian hayati dalam sistem padi sawah berkelanjutan di NTB. *Jurnal Pertanian Tropik*, 10(2), 95–106.
- Hadija, S. (2017). Dampak pembakaran jerami terhadap kehilangan karbon dan degradasi lahan sawah. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*, 19(2), 87–96.
- Handayani, T., & Mulyani, A. (2019). Pengelolaan bahan organik untuk mempertahankan kesuburan tanah sawah. *Jurnal Penelitian Pertanian Terapan*, 19(3), 175–184.
- Kang, G., Linqvist, B., & Sengxua, P. (2022). Sustainable residue management in rainfed lowland rice: Linking soil health to yield stability in Lao PDR. *Field Crops Research*, 280, 108444.
- Lal, R. (2020). Carbon sequestration in dryland agroecosystems: Challenges and opportunities. *Soil Systems*, 4(2), 34.

- Linguist, B., & Sengxua, P. (2000). Rainfed lowland rice in the Lao PDR: Opportunities and challenges. *International Rice Research Institute (IRRI)*, Los Baños, Philippines.
- Liu, Y., Zhang, X., & He, P. (2021). Long-term residue retention improves soil C and N stocks in tropical rice systems. *Soil & Tillage Research*, 208, 104906.
- Ng, L. S., Chew, J. R., Bong, C. P. C., & Lim, L. Y. (2022). Microbial-mediated decomposition of rice residues in tropical soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 164, 108517.
- Powlson, D. S., Bhogal, A., Chambers, B. J., Coleman, K., Macdonald, A. J., Goulding, K. W. T., & Whitmore, A. P. (2016). Balancing productivity and environmental protection in rice residue management. *Global Change Biology*, 22(3), 1183–1193.
- Qasim, W., Chen, Z., & Zhang, Y. (2022). Impact of crop residue on soil microbial activity and nutrient availability in rainfed rice systems. *Applied Soil Ecology*, 173, 104362.
- Rahmawati, E., Sari, M. I., & Anwar, S. (2023). Perubahan sifat fisik tanah akibat pengelolaan residu organik pada lahan tadah hujan. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 17(1), 33–42.
- Saikia, P., Singh, B., & Pathak, H. (2019). Straw incorporation and nutrient dynamics in flooded rice soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 114(2), 149–161.
- Saputra, A., & Sitorus, N. (2018). Analisis produktivitas padi berdasarkan perbaikan sifat tanah melalui pengembalian residu organik. *Jurnal Agroekoteknologi*, 6(3), 127–137.
- Smith, P., & Bustamante, M. (2023). Agricultural practices for soil carbon management in Asia. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 115004.
- Tuan, T. M., & Tran, D. N. (2023). Rainfed rice residue management in Vietnam: Lessons for sustainable intensification. *Asian Journal of Agriculture and Biology*, 12(1), 21–30.
- Wulandari, N., & Hidayat, R. (2021). Evaluasi residu tanaman terhadap dinamika hara di tanah sawah tadah hujan. *Jurnal Agrosains*, 23(1), 51–60.
- Yunianti, R., & Darmawan, M. (2022). Pengembalian residu jerami dan dampaknya terhadap sifat fisik tanah serta hasil padi. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 27(2), 187–197.
- Zhang, J., Wang, Y., & Li, X. (2021). Effect of straw biochar on soil structure and nutrient retention under monsoonal climates. *Soil Use and Management*, 37(4), 735–748.