Manajemen IKM, Vol. 21 No. 2, September 2026: 11-23 DOI:
ISSN 2085-8418; EISSN 2622-9250 http://journal.ipb.ac.id/index.php/jurnalmpi/
Copyright © 2026 by Authors This is an open-access article distributed under the CC BY-SA 4.0 License

Peluang Usaha Biochar Jerami Padi Bagi UKM Perdesaan Melalui Bisnis Sirkular Berbasis Petani

Rice Straw Biochar Business Opportunities for Rural SMEs Through Farmer-Based Circular Business

Mimin Aminah[1], Hardiana Widyastuti[1]*, Arief Hartono[2], Gelar Satya Budhi[3]
[1] Departemen Manajemen, Fakultas Ekonomi dan Manajemen, IPB University
Jl. Agatis, Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680
[2] Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, IPB University
Jl. Meranti, Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680
[3] Pusat Kajian LP2B, IPB University
Jl. Raya Pajajaran, IPB Baranangsiang Gedung Alumni IPB, Bogor 16124

Diterima: 13 September 2026; Direvisi: 19 September 2026; Disetujui: 22 September 2026

ABSTRAK

Jerami padi merupakan sumber karbon dan unsur hara bagi tanah. Namun, jerami memiliki volume besar dengan kerapatan massa yang rendah, bersifat musiman, dan sulit dikumpulkan dalam waktu singkat. Pengolahan surplus jerami menjadi biochar berpotensi memperbaiki sifat tanah, mendukung produktivitas padi, dan menekan emisi metana dibandingkan pembenaman jerami segar pada kondisi tergenang. Rantai pengolahannya juga membuka peluang UKM desa pada kegiatan pengumpulan, pengeringan, karbonisasi, pengendalian mutu, pengemasan, pengangkutan, pemasaran, dan jasa aplikasi. Artikel ini menggunakan tinjauan naratif yang dipadukan dengan pembelajaran dari pengalaman Indonesia mengenai pengelolaan jerami, agregasi biomassa, usaha pupuk organik kelompok tani, dan BUMDes. Hasil sintesis menunjukkan bahwa manfaat biochar dipengaruhi kondisi tanah, mutu bahan, suhu pirolisis, dosis, pengelolaan nitrogen dan air, biaya logistik, serta kemampuan organisasi usaha.Kerangka model yang diusulkan adalah jaringan usaha lokal:kebutuhan jerami untuk tanah dan penggunaan setempat dipenuhi terlebih dahulu; hanya surplus terverifikasi yang diproses; sebagian biochar dikembalikan ke lahan; sedangkan penjualan produk dan jasa membiayai tenaga kerja, pemeliharaan, modal kerja, dan manfaat petani. Model ini belum merupakan usaha komersial yang tervalidasi sehingga perlu diuji melalui percobaan lapang, perhitungan unit ekonomi, uji pasar, dan evaluasi kelembagaan secara bertahap.

Kata kunci: jerami padi; biochar; kesehatan tanah; UKM desa; bisnis sirkular

ABSTRACT

Rice straw is a source of carbon and nutrients for soil. However, straw has a large volume with low bulk density, is seasonal in availability, and is difficult to collect within a short period. Processing surplus straw into biochar has the potential to improve soil properties, support rice productivity, and reduce methane emissions compared to incorporating fresh straw under flooded conditions. The processing chain also opens opportunities for village-level SMEs in activities such as collection, drying, carbonization, quality control, packaging, transportation, marketing, and application services. This article employs a narrative review combined with lessons learned from Indonesian experience in straw management, biomass aggregation, farmer-group organic fertilizer enterprises, and village-owned enterprises (BUMDes). The synthesis results show that the benefits of biochar are influenced by soil conditions, feedstock quality, pyrolysis temperature, application dose, nitrogen and water management, logistics costs, and business organizational capacity. The proposed model is a local business network: straw needs for soil and local use are met first; only verified surplus is processed; a portion of the biochar is returned to the land; while product and service sales finance labor, maintenance, working capital, and farmer benefits.

*) Korespondensi:
Jl. Agatis, Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680; email: hardiana.widyastuti@apps.ipb.ac.id

This model has not yet been validated as a commercial enterprise and therefore requires further testing through field trials, unit economics calculations, market testing, and gradual institutional evaluation.

Key words: biochar; circular business; rice straw; soil health; village SMEs

PENDAHULUAN

Jerami padi mempunyai dua kedudukan yang harus dipertimbangkan secara bersamaan. Jerami menyediakan karbon dan unsur hara yang mendukung bahan organik, siklus hara, retensi air, dan aktivitas biologi tanah. Namun, jerami juga meruah, sangat musiman, dan sulit dikumpulkan dalam waktu singkat. Jerami padi mengandung unsur hara, terutama kalium, serta karbon organik yang dapat dikembalikan ke tanah. Pengambilan jerami secara terus-menerus dari lahan dapat mengurangi pengembalian hara dan bahan organik, sehingga pemanfaatannya di luar lahan perlu mempertimbangkan kebutuhan tanah serta penggunaan lokal yang telah ada (Kaur *et al.,* 2022).

Pengembalian jerami secara langsung dapat menambah bahan organik dan unsur hara. Akan tetapi, dalam sawah tergenang, jerami segar menyediakan karbon yang mudah terurai dan dapat meningkatkan ketersediaan substrat bagi pembentukan metana. Tan *et al.* (2018) menunjukkan bahwa kelompok senyawa organik jerami memberikan respons emisi CH_4 yang berbeda. Islam *et al.* (2018), selanjutnya memperlihatkan bahwa pengaturan drainase pada sistem sawah dengan jerami terinkorporasi dapat menekan emisi CH_4 secara nyata tanpa menurunkan hasil. Dengan demikian, pemanfaatan jerami perlu mempertimbangkan bukan hanya bentuk residu, tetapi juga pengelolaan air; jerami yang harus dipertahankan dalam sistem pertanian perlu dibedakan dari surplus nyata yang dapat diolah menjadi produk bernilai tambah.

Biochar merupakan bahan kaya karbon yang dihasilkan melalui pirolisis biomassa dalam kondisi oksigen terbatas. Karbon biochar umumnya lebih stabil daripada karbon jerami segar, tetapi pH, luas permukaan, kadar abu, kapasitas tukar kation, dan ketersediaan haranya dipengaruhi bahan baku dan suhu proses (Sohi *et al.,* 2010; Wu *et al.,* 2012). Fatkhurohmah (2025) menunjukkan bahwa jerami padi dapat dikarbonisasi dalam reaktor baja skala kecil pada suhu sekitar 300-350°C selama 90 menit dan menghasilkan biochar dengan karbon organik 23,9%. Temuan ini menyediakan titik awal teknis, tetapi mutu setiap batch tetap harus dicatat dan diuji.

Efektivitas biochar tidak seragam. Penelitian jangka panjang menunjukkan interaksi biochar dengan pupuk nitrogen, pengaruh berulang dari dosis rendah, perubahan komunitas mikroba, dan kemungkinan penurunan emisi CH4 (Asai *et al.,* 2009; Zheng *et al.,* 2020; Nan *et al.,* 2020a, 2020b, 2023). Meta-analisis juga menunjukkan bahwa hasil padi, karbon tanah, efisiensi penggunaan nitrogen, CH4, N2O, dan potensi pemanasan global dipengaruhi dosis, suhu pirolisis, pH tanah, serta masukan nitrogen (Liu *et al.,* 2022; Iboko *et al.,* 2023; Pia *et al.,* 2024; Wen *et al.,* 2025; Huang *et al.,* 2026). Karena itu, rekomendasi global tidak dapat langsung dipindahkan ke petani Indonesia tanpa pengujian kondisi setempat.

Selain nilai agronomis, biochar jerami menyediakan ruang bagi kegiatan ekonomi pedesaan. Pengumpulan, pencacahan, pengeringan, pengoperasian reaktor, pengayakan, pengemasan, pengangkutan, pemasaran, dan aplikasi lapang tidak harus dilakukan oleh satu perusahaan besar. Kegiatan tersebut dapat dibagi di antara UKM, kelompok tani, koperasi, dan BUMDes sesuai kemampuan, aset, serta jaringan pelanggan masing-masing. Bukti mengenai BUMDes menunjukkan kaitan positif dengan penguatan ekonomi dan pembangunan desa, tetapi keberhasilannya tetap membutuhkan sumber daya manusia, akuntabilitas, inovasi, kemitraan, dan pemilihan usaha yang sesuai potensi lokal (Puri & Khoirunurrofik, 2021; Nasfi *et al.,* 2023; Ultari & Khoirunurrofik, 2024).

Permasalahan utama bukan sekadar apakah jerami dapat dibuat menjadi biochar, melainkan apakah pengolahannya dapat menjaga fungsi tanah, menghasilkan produk yang konsisten, memberikan manfaat bagi petani, dan membentuk usaha lokal yang bertahan. Artikel ini menempatkan kesejahteraan petani dan keberlanjutan tanah sebagai batas pengembangan usaha. Peralatan pirolisis tidak diperlakukan sebagai titik awal, melainkan sebagai bagian dari rangkaian keputusan yang dimulai dari neraca jerami, kebutuhan pengguna, dan kelayakan pasar.

Artikel ini bertujuan untuk: (1) mensintesis bukti agronomis dan lingkungan mengenai biochar jerami padi, termasuk prinsip penentuan surplus, mutu proses, dosis, dan interaksinya

dengan pengelolaan hara serta air; (2) menilai peluang dan prasyarat kelayakan rantai nilai biochar bagi UKM perdesaan, termasuk logistik, unit ekonomi, pasar, dan manfaat bagi petani; serta (3) merumuskan model kelembagaan bisnis sirkular dan agenda validasi bertahap yang melibatkan petani, kelompok tani, koperasi, UKM, dan BUMDes. Ketiga tujuan tersebut menjadi dasar pengorganisasian hasil dan pembahasan serta dijawab kembali pada bagian kesimpulan.

METODE PENELITIAN

Artikel ini menggunakan tinjauan naratif dan sintesis berbasis praktik. Metode ini dipilih untuk menjawab pertanyaan lintas bidang yang mencakup agronomi, lingkungan, logistik, ekonomi, pemasaran, dan kelembagaan. Tinjauan ini tidak dimaksudkan untuk menghitung satu ukuran pengaruh gabungan atau mengklaim bahwa seluruh publikasi telah tercakup. Setiap temuan dibaca sesuai konteks, rancangan penelitian, bahan biochar, dosis, kondisi tanah, dan skala penerapannya.

Literatur yang digunakan terutama terbit antara 2009 dan 31 Agustus 2026 dan ditelusuri melalui portal jurnal dan repositori Indonesia, PubMed, laman penerbit, serta penelusuran balik daftar pustaka artikel yang relevan. Sebanyak 28 sumber utama dipertahankan dalam sintesis akhir, terdiri atas artikel penelitian, meta-analisis atau tinjauan, skripsi yang relevan, serta publikasi kebijakan dan manajemen yang mendukung konteks Indonesia. Literatur dimasukkan apabila membahas secara langsung atau mendukung salah satu ranah analisis: biochar jerami atau sekam pada sistem padi, pengelolaan residu dan emisi, karakterisasi biochar, logistik biomassa, unit usaha perdesaan, atau kelembagaan petani/BUMDes. Literatur dikeluarkan apabila tidak memiliki keterkaitan yang jelas dengan pertanyaan penelitian, hanya mengulang informasi sekunder tanpa sumber primer yang dapat ditelusuri, atau tidak menyediakan informasi yang memadai mengenai bahan, perlakuan, hasil, atau konteks penerapan. Kata pencarian menggabungkan istilah jerami padi, biochar, padi sawah atau padi gogo, sifat tanah, hasil, efisiensi penggunaan nitrogen, gas rumah kaca, biaya, pengumpulan residu, logistik balik, bisnis sirkular, UKM pedesaan, kelompok tani, koperasi, dan BUMDes. Prioritas diberikan kepada percobaan lapang, penelitian beberapa musim, meta-analisis, dan kajian Indonesia yang berhubungan langsung dengan pertanian padi atau pengembangan usaha desa.

Bukti dikelompokkan menjadi tiga. Bukti langsung mencakup penggunaan biochar jerami pada sistem padi. Bukti pendukung mencakup campuran kompos-biochar, biochar bahan lain, serta perbandingan jerami segar, kompos, dan biochar. Bukti kontekstual mencakup logistik residu, usaha biomassa, pupuk organik, UKM desa, BUMDes, dan kelembagaan petani. Pemisahan ini mencegah bukti tidak langsung diperlakukan sebagai pembuktian keberhasilan biochar jerami.

Sintesis dilakukan dengan membandingkan temuan pada sembilan ranah: neraca jerami, mutu biochar, produktivitas, hara dan kesehatan tanah, emisi, logistik, biaya, pasar, dan kelembagaan. Ketika hasil berbeda, penjelasan diarahkan pada perbedaan tanah, dosis, pupuk, air, bahan baku, suhu, lama percobaan, dan indikator yang digunakan. Kerangka bisnis dikembangkan dengan mempertemukan kebutuhan teknis berulang dengan kendala lapangan dan manajemen yang berulang. Karena belum diuji sebagai satu kesatuan, kerangka tersebut diposisikan sebagai rancangan untuk validasi, bukan sebagai model komersial yang telah terbukti.

Kerangka analisis menghubungkan lima pertanyaan. Pertama, berapa banyak jerami yang harus dipertahankan untuk fungsi tanah, pakan, mulsa, kompos, dan penggunaan lokal? Kedua, bagian mana yang benar-benar merupakan surplus dan dapat dikarbonisasi? Ketiga, pada mutu, dosis, dan pengelolaan apa biochar memberikan manfaat agronomis dan lingkungan? Keempat, kegiatan apa yang dapat menjadi unit usaha UKM desa dan bagaimana pasarnya? Kelima, bagaimana petani, kelompok tani, koperasi, UKM, dan BUMDes membagi peran, biaya, pendapatan, risiko, dan manfaat?

Kerangka tersebut menggabungkan aliran bahan dan aliran nilai. Aliran bahan dimulai dari jerami surplus, berlanjut ke pengumpulan, pengeringan, pirolisis, pengendalian mutu, dan penggunaan biochar. Aliran nilai berasal dari penjualan produk dan jasa, kemudian dialokasikan untuk upah, insentif pemasok, pemeliharaan, modal kerja, pengembalian biochar ke lahan, dan surplus organisasi. Keberhasilan dinilai bukan dari banyaknya jerami yang dikeluarkan, melainkan dari kemampuan sistem menjaga tanah, menciptakan manfaat petani, menghasilkan pendapatan lokal, dan mempertahankan permintaan pasar.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Potensi Agronomis dan Lingkungan Biochar Jerami

Bukti Indonesia dekat dengan kondisi petani, tetapi masih terpecah. Sebagian penelitian menggunakan biochar jerami sebagai salah satu perlakuan di antara beberapa bahan, sebagian menguji campuran kompos-biochar, dan sebagian membandingkan jerami segar dengan kompos. Penelitian yang sekaligus mengukur hasil pada skala lapang, emisi, karakter biochar, dan biaya masih terbatas. Oleh sebab itu, temuan positif perlu digunakan sebagai dasar penyaringan teknologi dan bukan sebagai rekomendasi universal.

Herman dan Resigia (2018) menguji kombinasi biochar sekam padi dan kompos jerami padi pada padi yang ditanam di tanah Ultisol menggunakan rancangan acak kelompok dengan lima komposisi perlakuan. Kombinasi 75% biochar sekam padi dan 25% kompos jerami padi menghasilkan produksi tertinggi sebesar 8,238 t ha^{-1}, dibandingkan 5,512 t ha^{-1} pada kontrol, sekaligus meningkatkan pH serta ketersediaan sejumlah unsur hara. Temuan ini menunjukkan potensi kombinasi biochar-kompos, tetapi tidak dapat digunakan sebagai bukti langsung mengenai biochar jerami padi murni karena bahan biochar berasal dari sekam dan perlakuannya merupakan campuran dengan kompos jerami.

Widijanto *et al.* (2023) menguji biochar sekam padi pada dosis 0, 5, 10, dan 20 t ha^{-1} yang dikombinasikan dengan empat jenis pemupukan pada tanah Inceptisol. Hasilnya menunjukkan bahwa dosis biochar dan jenis pupuk memengaruhi pertumbuhan serta serapan P padi, dengan respons tinggi pada kombinasi biochar dosis tinggi dan pemupukan anorganik. Penelitian ini relevan untuk menunjukkan interaksi biochar-pupuk, tetapi bukan bukti biochar jerami padi. Sebaliknya, Gupta *et al.* (2020) secara langsung menguji biochar jerami padi 5 t ha^{-1} dan abu sekam padi 5 t ha^{-1} pada empat tingkat N selama tiga rotasi padi-gandum. Biochar jerami meningkatkan kesuburan tanah, hasil, serta efisiensi N; pada perlakuan biochar, hasil optimum dicapai pada 80 kg N ha^{-1} dibandingkan 120 kg N ha^{-1} pada perlakuan tanpa biochar, yang menunjukkan potensi penghematan 40 kg N ha^{-1} per tanaman. Perbedaan ini penting karena bukti biochar jerami, biochar sekam, dan campuran biochar-kompos tidak boleh diperlakukan sebagai bukti yang setara.

Untuk padi gogo, Gea *et al.* (2020) melaporkan perbaikan respons tanaman pada Ultisol melalui penggunaan biochar sekam dan jerami, sedangkan Kartika *et al.* (2021) memperoleh respons terbaik beberapa variabel pada sekitar 10 t ha^{-1} dalam kondisi cekaman kekeringan. Perbedaan dosis tersebut menunjukkan bahwa respons bergantung pada media, tingkat cekaman, kesuburan awal, dan rancangan percobaan. Dosis yang efektif dalam pot belum tentu layak secara ekonomi di lahan petani. Ringkasan bukti Indonesia yang menjadi dasar penilaian potensi dan keterbatasan biochar jerami disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 menunjukkan adanya sinyal manfaat pada hasil, sifat tanah, pengelolaan hara, dan emisi, tetapi tingkat kekuatan buktinya berbeda. Bukti langsung biochar jerami padi antara lain ditunjukkan Gupta *et al.* (2020), sedangkan Widijanto *et al.* (2023) dan Kartika *et al.* (2021) menggunakan biochar sekam, dan Herman dan Resigia (2018) menggunakan kombinasi biochar sekam-kompos jerami. Gea *et al.* (2020) juga menggunakan perlakuan yang terdiri atas beberapa komponen, karena bahan baku dan komposisi perlakuan berbeda, hasil antarstudi tidak dapat langsung dipertukarkan. Pemisahan jenis bukti ini memperkuat kebutuhan percobaan lapang Indonesia yang menggunakan biochar jerami terkarakterisasi, kontrol yang jelas, dosis terukur, serta pencatatan biaya.

Pelajaran dari Penelitian Internasional

Penelitian internasional memperjelas kondisi ketika biochar bekerja. Asai *et al.* (2009) menunjukkan bahwa respons padi gogo tidak seragam antarlokasi; kenaikan hasil lebih jelas pada lokasi dengan P awal rendah dan pengelolaan N yang memadai. Pada sawah, Nan *et al.* (2020a) membandingkan pengembalian jerami 8 t ha^{-1} per tahun, biochar ekuivalen biomassa 2,8 t ha^{-1} per tahun, dan satu kali biochar 22,5 t ha^{-1}. Dosis tahunan rendah meningkatkan hasil pada tiga tahun berturut-turut sekaligus menurunkan CH4, dan pengamatan enam tahun memperlihatkan bahwa strategi tahunan rendah lebih stabil daripada dosis tinggi satu kali (Nan *et al.*, 2023).

Nitrogen merupakan faktor pengubah utama. Zheng *et al.* (2020) menemukan bahwa 7,5 t ha^{-1} biochar jerami yang digabungkan dengan campuran urea konvensional dan urea lepas terkendali meningkatkan hasil 10,2% dan efisiensi penggunaan nitrogen 16,5%. Iboko *et al.* (2023) menunjukkan bahwa biochar dosis rendah dan N

sedang dapat memberikan kompromi antara hasil dan intensitas gas rumah kaca. Sebaliknya, Huang *et al.* (2026) menemukan bahwa masukan N mineral sangat tinggi dapat melemahkan bahkan membalikkan manfaat mitigasi CH4.

Meta-analisis memberikan angka pembanding, bukan resep tunggal. Liu *et al.* (2022) melaporkan kenaikan rata-rata hasil 10,73% dan efisiensi penggunaan N 12,04%. Wen *et al.* (2025), berdasarkan 1.827 pengamatan dari 134 studi, melaporkan bahwa aplikasi biochar meningkatkan hasil padi 16,0% dan karbon organik tanah 37,7%, serta menurunkan emisi CH_4 5,2%, emisi N_2O 14,4%, dan potensi pemanasan global 8,6%. Pia et al. (2024) tidak menemukan hubungan dosis-respons linear yang kuat dan menunjukkan bahwa manfaat tambahan per ton menurun ketika dosis meningkat. Dengan demikian, optimum teknis global harus dibedakan dari optimum ekonomi dan kemampuan pasokan lokal.

Perbandingan penelitian internasional yang paling relevan dengan penentuan mutu, dosis, dan pengelolaan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 1. Ringkasan bukti ilmiah dan praktik yang relevan di Indonesia

Sumber	Sistem atau rancangan	Perlakuan	Temuan utama	Catatan penafsiran
Herman & Resigia, 2018	Percobaan lapang padi pada Ultisol; RAK lima perlakuan	Biochar sekam padi + kompos jerami dengan proporsi 0:0, 100:0, 75:25, 50:50, 25:75; dosis total 10 t ha^{-1}	Kombinasi 75% biochar sekam + 25% kompos jerami menghasilkan 8,238 t ha^{-1} dibandingkan 5,512 t ha^{-1} pada kontrol dan meningkatkan pH serta ketersediaan hara	Bukti campuran biochar sekam-kompos jerami; bukan biochar jerami murni dan tidak menguji kelayakan UKM
Widijanto *et al.*, 2023	Percobaan padi pada Inceptisol; 16 kombinasi, tiga ulangan	Biochar sekam 0, 5, 10, 20 t ha^{-1} × empat jenis pemupukan	Dosis biochar dan jenis pupuk memengaruhi pertumbuhan dan serapan P; respons tinggi muncul pada kombinasi biochar dosis tinggi dan pupuk anorganik	Bukti biochar sekam dan interaksi dengan pupuk; tidak dapat dianggap sebagai bukti langsung biochar jerami
Gupta *et al.*, 2020	Percobaan lapang tiga rotasi padi-gandum pada tanah lempung berpasir	Biochar jerami padi 5 t ha^{-1} atau abu sekam 5 t ha^{-1} × N 0, 40, 80, 120 kg ha^{-1}	Biochar jerami meningkatkan kesuburan, hasil, dan efisiensi N; hasil optimum dicapai pada 80 kg N ha^{-1} dibandingkan 120 kg N ha^{-1} pada tanpa biochar	Bukti langsung biochar jerami; menunjukkan pentingnya interaksi dengan N dan efek lintas musim
Gea *et al.*, 2020	Padi gogo pada Ultisol	Biochar sekam/jerami + asap cair	Respons tanaman meningkat	Perlakuan terdiri atas beberapa komponen
Kartika (2021)	Percobaan pot padi O. Glaberrima pada cekaman kekeringan	Biochar sekam padi 3 t ha^{-1} dibandingkan tanpa biochar	Memperbaiki tanah, pertumbuhan akar, dan ketahanan hasil	Menggunakan satu dosis biochar sekam; perlu pengujian lapang
Islam *et al.*, 2018	Percobaan growth chamber sistem padi dengan jerami terinkorporasi	Tujuh rezim drainase: kombinasi *early-season drainage* dan *mid-season drainage*	Drainase awal + pertengahan musim menurunkan CH_4 dan GWP terukur tanpa menurunkan hasil; N_2O relatif kecil	Bukti pengelolaan air pada sistem dengan jerami; bukan perbandingan kompos vs jerami
Tan *et al.*, 2018	Tanah sawah	Berbagai kelompok senyawa organik jerami	Komponen jerami memberikan respons emisi CH_4 yang berbeda	Pengaruh jerami terhadap emisi bergantung pada jenis senyawa organiknya

Tabel 2. Bukti internasional mengenai padi dan biochar

Sumber	Konteks	Dosis atau rancangan	Hasil penting	Implikasi
Asai *et al.*, 2009	Padi gogo; 10 lokasi	0-16 t ha^{-1}	Respons kuat pada lokasi P rendah; interaksi N/P	Respons spesifik lokasi
Wu *et al.*, 2012	Karakterisasi biochar jerami	300-700°C	Suhu mengubah hasil biochar, pH, KTK, dan aromatisitas	Mutu proses harus dicatat
Nan *et al.*, 2020a	Percobaan lapang tiga tahun	2,8 t ha^{-1} tahun^{-1} vs jerami 8 t dan 22,5 t sekali	Hasil meningkat; CH4 turun pada dosis tahunan rendah	Strategi ekuivalen biomassa
Zheng *et al.*, 2020	Percobaan lapang tiga tahun	7,5 t ha^{-1} + N	Hasil +10,2%; efisiensi N +16,5%	Integrasi pupuk
Liu *et al.*, 2022	Meta-analisis	Beragam	Hasil +10,73%; efisiensi N +12,04%	Respons heterogen
Iboko *et al.*, 2023	Tinjauan sistematis 45 artikel	Biochar × N	Dosis rendah + N sedang memberi hasil tinggi dan intensitas GRK rendah	Kompromi N2O/CH4
Pia *et al.*, 2024	Tinjauan dan analisis data	2-48 t ha^{-1}	Tidak ada dosis-respons linear; manfaat marjinal menurun	Hindari aplikasi berlebihan
Wen *et al.*, 2025	Meta-analisis 1.827 pengamatan	Beragam	Hasil +16%; C tanah +37,7%; CH4 dan N2O turun	Angka pembanding global
Huang *et al.*, 2026	Meta-analisis jaringan + lapang	Biochar × N mineral	N sangat tinggi dapat membalikkan mitigasi CH4	N merupakan moderator kritis

Tabel 2 menegaskan bahwa tanah, nitrogen, suhu produksi, dosis, dan lama pengamatan harus dianalisis bersama. Bukti yang paling konsisten bukan bahwa semakin tinggi dosis semakin baik, melainkan bahwa biochar perlu disesuaikan dengan tanah dan sistem pemupukan serta dinilai selama lebih dari satu musim.

Surplus Jerami, Mutu Biochar, dan Dosis Ekonomis

Penentuan surplus harus mendahului keputusan kapasitas alat. Neraca jerami menghitung total produksi, kadar air, bagian yang perlu kembali ke tanah, kebutuhan pakan atau mulsa, penggunaan untuk kompos, dan kehilangan selama pengumpulan. Surplus bersih adalah sisa setelah seluruh kebutuhan tersebut dipenuhi. Pendekatan ini mencegah usaha memperoleh keuntungan dengan memindahkan biaya kesuburan dan kehilangan hara kepada petani pemasok.

Biochar bukan input yang seragam. Peningkatan suhu pirolisis umumnya menurunkan rendemen tetapi meningkatkan karbon tetap, pH, dan aromatisitas, sedangkan KTK serta ketersediaan hara dapat mempunyai pola optimum yang berbeda (Wu *et al.*, 2012). Setiap batch perlu mencatat kadar air dan massa jerami, profil suhu-waktu, massa keluaran, rendemen, pH, daya hantar listrik, karbon organik, abu, dan unsur hara jika memungkinkan. Catatan tersebut penting untuk konsistensi produk UKM dan validitas uji lapang.

Dosis perlu ditetapkan berdasarkan prinsip dosis efektif dan menguntungkan minimum. Pada nilai ilustratif Rp5.000 kg^{-1}, dosis 10 t ha^{-1} bernilai Rp50 juta ha^{-1} sebelum biaya angkut dan aplikasi sehingga sulit dijangkau petani. Bukti Mempawah pada 1 t ha^{-1} dan kompos-biochar pada 2 t ha^{-1} memberi dasar untuk menyaring dosis 0,5–2 t ha^{-1} dalam uji awal Indonesia. Dosis lebih tinggi hanya layak diuji apabila kondisi tanah, pasokan biomassa, dan perhitungan ekonomi mendukung.

Keputusan dosis harus menggabungkan tambahan nilai gabah, penghematan pupuk, pengaruh sisa antarmusim, biaya produksi biochar, angkut, dan aplikasi. Apabila dua dosis tidak berbeda nyata dalam hasil, dosis yang lebih rendah lebih layak dipilih ketika menghasilkan manfaat bersih lebih besar dan memungkinkan cakupan petani lebih luas. Dengan cara ini, sasaran agronomis tidak dipisahkan dari keterjangkauan usaha tani.

Peluang UKM Desa pada Rantai Nilai Jerami-Biochar

Peluang usaha tersebar pada seluruh rantai nilai dan tidak hanya terletak pada kepemilikan reaktor. UKM dapat mengkhususkan diri sebagai penyedia jasa pengumpulan dan baling, pengeringan dan penyimpanan, operator karbonisasi, penggilingan dan pengayakan,

pengemasan, pengangkutan, penjualan pembenah tanah, atau jasa aplikasi. Pembagian modular menurunkan tuntutan agar satu organisasi menguasai seluruh fungsi dan memungkinkan usaha yang sudah ada masuk sesuai aset, keterampilan, serta jaringan pelanggannya. Usaha pedesaan juga menghadapi hambatan akses pasar, keterampilan, konektivitas, dan layanan pendukung sehingga penguatan pasar harus berjalan bersama investasi alat (Phillipson *et al.,* 2019).

Empat unit yang paling mudah diuji adalah jasa pengumpulan yang dibayar per ton jerami bersih, jasa karbonisasi untuk jerami milik petani atau kelompok, usaha produk biochar berkelas mutu, dan paket biochar beserta angkut dan aplikasi. Pelanggan awal tidak harus terbatas pada petani padi. Persemaian, tanaman hortikultura, produsen media tanam, program penghijauan, dan kebun skala kecil dapat menjadi segmen uji selama klaim produk dibatasi oleh hasil pengujian.

Kelayakan UKM sebaiknya dinilai dengan unit ekonomi sederhana. Indikator minimal meliputi biaya pengumpulan per ton, rendemen biochar, biaya produksi per kilogram, margin kontribusi, kebutuhan modal kerja, tingkat pemanfaatan kapasitas, radius pengumpulan, tingkat produk tidak memenuhi mutu, jumlah pelanggan, pembelian ulang, pendapatan tenaga kerja, dan manfaat bersih petani. Produksi yang meningkat tanpa penjualan ulang atau margin positif belum menunjukkan usaha yang layak. Untuk memperjelas cara penggunaannya, Tabel 5 menyajikan skenario ilustratif satu ton jerami kering. Angka tersebut bukan hasil survei biaya dan tidak dimaksudkan sebagai harga baku, melainkan sebagai alat penyaringan awal yang harus diganti dengan data lokal sebelum investasi.

Skenario ilustratif unit ekonomi per satu ton jerami kering.

Pada rendemen 25%, biaya setara sekitar Rp8.600/kg dan pada harga jual Rp8.000/kg terjadi margin −Rp150.000/t jerami. Pada skenario dasar (rendemen 30%), biaya setara sekitar Rp6.333/kg dan margin Rp500.000/t jerami. Pada rendemen 35%, biaya setara sekitar Rp5.429/kg dan margin Rp900.000/t jerami.

Asumsi skenario dasar mencakup pengadaan/pengumpulan jerami, pengeringan dan angkut dalam radius sekitar 10 km, karbonisasi, pengayakan-pengemasan, pengendalian mutu, serta alokasi depresiasi dan overhead. Skenario pesimistik menggambarkan rendemen turun menjadi 25% dan biaya logistik meningkat, misalnya karena radius pengumpulan melebar atau kadar air bahan lebih tinggi. Pada harga jual ilustratif Rp8.000 kg^{-1}, titik impas harga produk setara dengan sekitar Rp8.600 kg^{-1} pada skenario pesimistik, Rp6.333 kg^{-1} pada skenario dasar, dan Rp5.429 kg^{-1} pada skenario optimistik. Karena harga jerami, energi, tenaga kerja, rendemen, dan jarak sangat lokal, angka ini harus diuji melalui pencatatan batch dan transaksi nyata.

Model jasa dapat menghasilkan arus kas lebih awal dan mengurangi risiko persediaan. Model penjualan produk memberi peluang margin lebih besar tetapi membutuhkan pengujian mutu, pengemasan, edukasi, saluran distribusi, dan modal kerja. Model hibrida menggabungkan jasa dan produk: sebagian biochar dikembalikan kepada petani pemasok, sedangkan kelebihan produk dijual ke pasar lain. Model hibrida lebih sesuai pada tahap awal karena pendapatan tidak bergantung pada satu sumber.

Pembagian Peran dan Model Bisnis Sirkular

Pengalaman usaha biomassa sekam menunjukkan bahwa ketersediaan bahan baku saja tidak cukup; segmen pelanggan, saluran distribusi, dan hubungan dengan pelanggan harus diperkuat (Muniroh & Aminah, 2021). Pada usaha pupuk organik Kelompok Tani Parikesit, pendidikan pelanggan mengenai mutu menjadi strategi prioritas (Lestari *et al.,* 2024). Kedua pengalaman tersebut menunjukkan bahwa UKM biochar tidak boleh memperbesar kapasitas sebelum memiliki pemasok, mutu produk, pelanggan uji, dan cara menjelaskan manfaat secara dapat dipercaya.

Kelompok tani paling sesuai untuk mencatat panen, penggunaan jerami, pemasok, dan kebutuhan aplikasi. Koperasi dapat mengonsolidasikan pembelian, pelayanan anggota, serta pembagian sisa hasil usaha. UKM dapat menjadi operator khusus yang dibayar berdasarkan volume dan mutu pekerjaan. BUMDes dapat menyediakan aset bersama, kontrak, modal kerja, atau unit pelayanan formal bila tata kelola dan kemampuan usahanya memadai. Bukti Indonesia mengaitkan BUMDes dengan perbaikan ekonomi dan pembangunan desa, termasuk ketika kegiatan ekonomi dan lingkungan dipadukan (Puri & Khoirunurrofik, 2021; Ultari & Khoirunurrofik, 2024).

Penetapan BUMDes sebagai pengelola tidak boleh bersifat otomatis. Tinjauan Nasfi *et al.* (2023) menunjukkan pentingnya sumber daya manusia,

akuntabilitas, inovasi, kerja sama, dan kesesuaian model usaha. Pembagian peran perlu dituangkan dalam aturan mengenai kepemilikan jerami, standar mutu, harga atau tarif jasa, tanggung jawab produk, pembukuan, dana pemeliharaan, penggunaan surplus usaha, dan mekanisme keluhan petani.

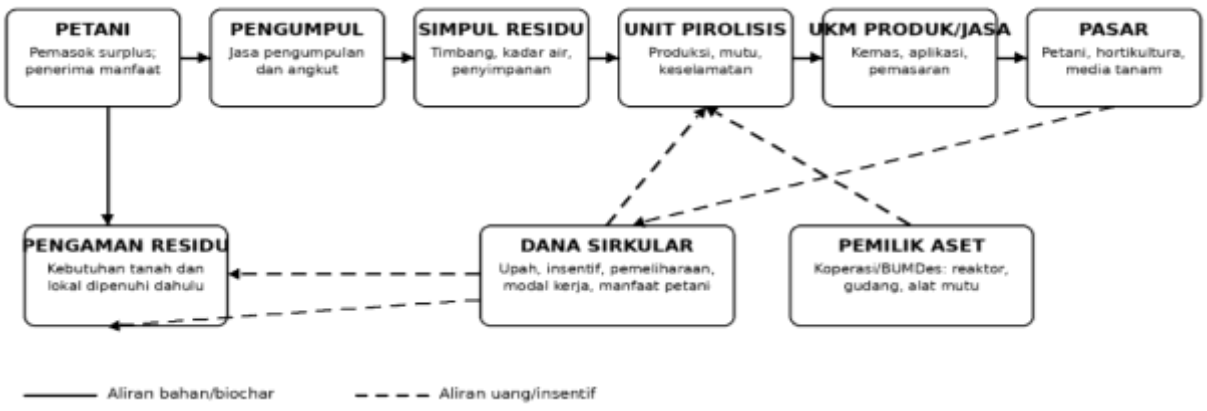
Tiga pilihan organisasi dapat digunakan. Pada model terpusat, satu koperasi atau BUMDes mengelola seluruh rantai; model ini sederhana dalam pengendalian tetapi berat dalam kemampuan. Pada model jaringan, beberapa UKM menangani fungsi khusus dengan standar dan kontrak yang sama; model ini fleksibel tetapi membutuhkan koordinasi. Pada model hibrida, organisasi petani mengendalikan pasokan dan manfaat anggota, sedangkan UKM mengoperasikan kegiatan teknis dan BUMDes menyediakan aset atau dukungan kontrak. Model terakhir paling sejalan dengan pembagian risiko dan penguatan ekonomi lokal.

Kontribusi penelitian manajemen dan kelembagaan terhadap rancangan usaha biochar diringkas dalam Tabel 3. Tabel 3 menegaskan bahwa ketersediaan jerami dan reaktor belum membentuk usaha yang layak. Mutu, pelanggan, kemampuan pengelola, pembukuan, kemitraan, perlindungan residu, dan pembagian manfaat mempunyai kedudukan yang sama penting. Teknologi harus ditempatkan sebagai bagian dari sistem usaha, bukan sebagai pengganti sistem tersebut.

Hubungan antara petani, pengumpul, simpul residu, unit pirolisis, UKM produk dan jasa, pasar, serta dana sirkular ditunjukkan pada Gambar 1.

Tabel 3. Kontribusi penelitian manajemen dan kelembagaan terhadap usaha biochar jerami

Publikasi	Konteks	Pendekatan	Kontribusi utama	Implikasi
Muniroh & Aminah, 2021	Usaha biomassa sekam	BMC + SWOT	Pelanggan, saluran, dan hubungan pelanggan perlu diperkuat	Pastikan pemasok dan pembeli sebelum menambah kapasitas
Lestari *et al.*, 2024	Usaha pupuk organik sirkular kelompok tani	BMC + SWOT + ANP	Edukasi pelanggan tentang mutu menjadi prioritas	Pengujian dan komunikasi manfaat harus menjadi fungsi usaha
Aminah & Sudaryanto, 2026	Trade-off biomassa pangan	Sintesis kebijakan	Biomassa terbatas dan multifungsi	Gunakan surplus saja dan kembalikan nilai kepada wilayah pemasok
Puri & Khoirunurrofik, 2021	BUMDes dan ekonomi desa	PSM + difference-in-differences	BUMDes berkaitan dengan perbaikan ekonomi desa	BUMDes berperan bila unit usaha, kapasitas, dan akuntabilitas jelas
Nasfi *et al.*, 2023	Kajian BUMDes Indonesia	Tinjauan sistematis	SDM, tata kelola, inovasi, kemitraan, dan model usaha menentukan	Bangun sistem manajemen bersama teknologi
Ultari & Khoirunurrofik, 2024	BUMDes dan pembangunan desa	Regresi data panel desa	Usaha ekonomi dan lingkungan berkaitan positif dengan pembangunan	Biochar dapat menghubungkan pendapatan dan layanan lingkungan



Gambar 1. Model bisnis sirkular biochar jerami dan peluang UKM desa

Gambar 1 memperlihatkan tiga unsur yang harus bergerak bersama: aliran bahan, aliran uang, dan penguasaan aset. Jerami surplus bergerak dari petani menuju pengumpul, simpul residu, dan unit pirolisis; biochar kemudian masuk ke UKM produk/jasa dan pasar atau dikembalikan ke lahan. Arus pendapatan dari pasar masuk ke dana sirkular yang membiayai upah pengumpulan dan operasi, insentif pemasok, pemeliharaan, modal kerja, serta manfaat petani. Pada tahap awal, aset utama seperti reaktor, ruang penyimpanan, dan alat pengayak lebih aman dimiliki bersama oleh koperasi atau BUMDes dan dioperasikan oleh UKM berdasarkan kontrak dan standar kinerja. Dengan pengaturan ini, pembagian nilai dan tanggung jawab lebih eksplisit serta risiko investasi tidak seluruhnya dibebankan kepada satu pelaku.

Kesenjangan Bukti dan Prioritas Pengujian

Indonesia tidak kekurangan gagasan dan temuan awal, tetapi belum memiliki kesinambungan rancangan penelitian. Sinyal hasil, perbaikan hara, respons padi gogo, mekanisme Eh-pH, dan contoh ekonomi telah tersedia, tetapi jarang dipadukan dalam percobaan beberapa musim yang sekaligus mengkarakterisasi biochar, mengukur emisi, menghitung biaya aktual, serta menilai organisasi usaha. Kesenjangan tersebut membuat keputusan investasi masih mengandung ketidakpastian tinggi.

Uji tahap awal perlu menggunakan rancangan acak kelompok sekurang-kurangnya tiga ulangan, kontrol tanpa biochar, dan dosis rendah misalnya 0,5; 1; dan 2 t ha^{-1}. Bila sumber daya memungkinkan, biochar diuji dengan dua tingkat N agar interaksinya terlihat. Variabel minimum mencakup hasil dan komponennya, pH, karbon organik, N, P, K, biaya, dan tenaga kerja. Pada sawah tergenang, pengukuran CH4 dan N2O sangat dianjurkan.

Pengujian usaha berjalan sejajar dengan pengujian lahan. Setiap batch mencatat bahan masuk, rendemen, mutu, waktu kerja, biaya energi, dan produk tidak sesuai. Setiap transaksi mencatat segmen pelanggan, harga, biaya antar, margin, keluhan, dan pembelian ulang. Wawancara petani dan pembeli digunakan untuk menguji kesediaan memasok surplus, bentuk manfaat yang disukai, kebutuhan produk, dan batas harga. Dengan demikian, keputusan akhir tidak hanya bertumpu pada peningkatan hasil tanaman. Kesenjangan bukti dan prioritas yang perlu dipenuhi sebelum perluasan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4 menunjukkan bahwa prioritas bukan memperbanyak percobaan pendek atau membeli reaktor. Prioritasnya adalah menghubungkan mutu biochar, respons tanaman, emisi, biaya aktual, penerimaan pasar, pembelian ulang, kemampuan organisasi, dan manfaat petani dalam satu rangkaian pengujian.

Peta Jalan Implementasi

Tahap pertama adalah pemetaan jerami dan pelaku. Lokasi mencatat produksi, kelembapan, penggunaan yang sudah ada, bagian yang perlu dipertahankan, serta calon pemasok, pengumpul, operator, dan pelanggan. Tahap kedua adalah standardisasi proses dan logistik, termasuk jadwal panen, titik kumpul, aturan kebersihan dan kadarair, biaya per ton, keselamatan reaktor, serta pencatatan mutu batch.

Tabel 4. Kesenjangan bukti dan prioritas pengembangan di Indonesia

Dimensi	Kondisi Indonesia	Arah bukti	Prioritas Indonesia
Rancangan bukti	Banyak studi jangka pendek atau campuran perlakuan	Percobaan multi-musim dan multi-lokasi	Bangun uji lapang beberapa musim dengan kontrol jelas
Dosis	Rentang sangat lebar; 1–2 t ha^{-1} menjanjikan	Tidak ada hubungan dosis-respons sederhana	Saring 0; 0,5; 1; dan 2 t ha^{-1} lebih dahulu
Mutu biochar	Karakterisasi tidak konsisten	Bahan, suhu, pH, karbon, dan abu menjadi moderator	Gunakan catatan batch dan spesifikasi minimum
Gas rumah kaca	Sedikit pengukuran langsung	CH4, N2O, GWP, dan intensitas emisi dinilai	Gabungkan hasil dan pemantauan emisi
Ekonomi	Analisis biaya masih jarang	Logistik dan adopsi semakin diperhatikan	Hitung unit biaya, margin, manfaat petani, dan tenaga kerja
Pasar UKM	Permintaan dan pembelian ulang belum terbukti	Nilai, saluran, layanan, dan kemitraan diuji	Mulai dari pelanggan uji dan kontrak jasa kecil
Kelembagaan	Peran kelompok, UKM, dan BUMDes belum teruji terpadu	Kolaborasi dan akuntabilitas menentukan	Tetapkan peran, kontrak, pembukuan, dan pembagian manfaat

Tahap ketiga adalah uji dosis rendah dan pengukuran biaya di lahan petani. Tahap keempat menilai hasil agronomis, emisi bila memungkinkan, manfaat bersih, margin UKM, dan pendapatan tenaga kerja. Tahap kelima menguji pasar produk dan jasa melalui penjualan terbatas, demonstrasi, serta pencatatan pembelian ulang. Tahap keenam memilih model organisasi dan membakukan perjanjian. Perluasan baru dilakukan pada tahap ketujuh setelah terdapat pasokan surplus yang stabil, produk memenuhi mutu, unit ekonomi positif, permintaan berulang, dan manfaat petani terverifikasi. Urutan pengujian dan pengembangan usaha tersebut disajikan pada Gambar 2.

Gambar 2 menempatkan implementasi dalam tiga fase waktu. Fase I (0-3 bulan) mencakup pemetaan surplus, calon pelaku, pelanggan awal, dan standardisasi dasar; keputusan lanjut hanya diambil apabila surplus dapat dibuktikan, terdapat minimal satu pelanggan uji, dan lokasi memenuhi syarat logistik serta keselamatan. Fase II (4-8 bulan) mencakup produksi pilot, uji mutu, uji dosis rendah di lahan, pencatatan biaya, dan penjualan terbatas; keputusan lanjut mensyaratkan mutu relatif konsisten, tidak ada dampak agronomis negatif, serta unit ekonomi menunjukkan jalur menuju margin positif. Fase III (9-18 bulan) mencakup pengulangan pembelian, pembakuan kontrak, evaluasi manfaat petani, dan perluasan bertahap. Skala diperbesar hanya apabila pasokan surplus stabil, pembelian berulang terbukti, margin positif dapat dipertahankan, dan tata kelola serta pembagian manfaat telah berjalan.

Keterbatasan Tinjauan

Artikel ini merupakan tinjauan naratif berbasis praktik, bukan tinjauan sistematis PRISMA. Literatur dipilih berdasarkan kegunaannya untuk menjawab persoalan Indonesia dan tidak mewakili inventaris lengkap seluruh penelitian global. Sebagian bukti Indonesia menggunakan campuran kompos-biochar atau biochar dari bahan lain, sedangkan beberapa kasus usaha membahas sekam, pupuk organik, atau biomassa secara umum. Bukti tersebut dipakai sebagai pendukung dan konteks, bukan sebagai pembuktian bahwa usaha biochar jerami pasti berhasil.

Angka biaya, rentang dosis, dan rancangan usaha yang disajikan merupakan dasar penyaringan. Keputusan setempat harus mempertimbangkan kelembapan jerami, jarak pengumpulan, tenaga kerja, efisiensi reaktor, mutu produk, tanah, pupuk, harga gabah, dan daya beli pelanggan. Pendapatan karbon atau klaim lingkungan hanya boleh dimasukkan bila tersedia metode pengukuran, verifikasi, dan dasar hukum yang diakui.

KESIMPULAN

Biochar jerami berpotensi memperbaiki sifat tanah, mendukung hasil dan efisiensi hara, serta menekan emisi metana, tetapi manfaatnya tidak otomatis. Respons ditentukan oleh kondisi tanah, mutu biochar, dosis, nitrogen, air, dan lama pengamatan. Bukti Indonesia cukup untuk memulai uji lapang, tetapi belum cukup untuk menetapkan satu dosis nasional.



Gambar 2. Peta jalan bertahap, horizon waktu, dan kriteria go/no-go pengembangan UKM biochar jerami

Jerami bukan sumber daya tanpa biaya ekologis. Kebutuhan tanah, pakan, mulsa, kompos, dan penggunaan lokal harus dipenuhi sebelum surplus ditetapkan. Setiap batch biochar perlu dikendalikan mutunya dan dosis awal sebaiknya diarahkan pada dosis efektif dan menguntungkan minimum. Rentang 0,5-2 t ha^{-1} dapat digunakan sebagai titik awal pengujian, bukan sebagai rekomendasi umum.

Peluang UKM desa terdapat pada pengumpulan, pengeringan, penyimpanan, karbonisasi, pengayakan, pengemasan, transportasi, pemasaran, dan jasa aplikasi. Model jasa, penjualan produk, dan hibrida dapat diuji.Model hibrida relatif lebih fleksibel pada tahap awalkarena menggabungkan arus kas jasa, pasar produk, dan pengembalian sebagian biochar kepada petani.

Model usaha yang paling tepat adalah jaringan lokal dengan pembagian peran. Kelompok tani atau koperasi mengoordinasikan pasokan dan layanan anggota; UKM menjalankan fungsi teknis atau komersial; sedangkan BUMDes menyediakan aset, kontrak, atau modal kerja bila tata kelolanya memadai. Aturan mutu, harga, pembukuan, tanggung jawab, dana pemeliharaan, dan pembagian manfaat harus disepakati sebelum produksi diperluas.

Implementasi harus bertahap dari pemetaan surplus, standarisasi proses, uji dosis rendah, pengukuran manfaat dan unit ekonomi, uji pasar, pemilihan model organisasi, hingga perluasan berbasis permintaan. Keberhasilan diukur melalui perlindungan fungsi tanah, manfaat bersih petani, mutu produk, margin positif, pembelian ulang, pendapatan lokal, dan akuntabilitas organisasi.

DAFTAR PUSTAKA

Aminah M., Sudaryanto T. 2026. Managing Biomass Trade-offs in Indonesia's Smallholder Agriculture. *FFTC* Agricultural Policy Platform, Food and Fertilizer Technology Center for the Asian and Pacific Region. Published 18 May 2026.

Asai H., Samson BK., Stephan HM., Songyikhangsuthor K., Homma K, Kiyono Y., Inoue Y., Shiraiwa T., Horie T. 2009. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. *Field Crops Research*. 111(1-2): 81-84. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.10.008

Fatkhurohmah N. 2025. Pengaruh jerami segar, kompos jerami, dan biochar jerami terhadap dinamika Eh dan pH pada tanah sawah Karawang [Skripsi]. IPB University, Bogor.

Gea K. Nelvia, Adiwirman. 2020. Utilization of biochar rice husk and straw to increase yield of upland rice (Oryza sativa L.) on Ultisol medium. *Jurnal Agronomi Tanaman Tropika.* 2(2): 101-118. https://doi.org/10.36378/juatika.v2i2.374.

Gupta RK., Hussain A., Yadvinder-Singh, Sooch, SS., Kang JS., Sharma S., Dheri GS. 2020. Rice straw biochar improves soil fertility, growth, and yield of rice–wheat system on a sandy loam soil. Experimental Agriculture. 56(1): 118-131. https://doi.org/10.1017/S001-44797-19000218.

Herman W., & Resigia E. 2018. Pemanfaatan biochar sekam dan kompos jerami padi terhadap pertumbuhan dan produksi padi (Oryza sativa L.) pada tanah ordo Ultisol. Jurnal Ilmiah Pertanian. 15(1): 42-50. https://doi.org/10.31849/jip.v15i1.1487.

Huang W., Liu X., Deng Y., Zhao D., Yuan J., Shen Q., Xue C. 2026. Mineral nitrogen input modulates the methane mitigation potential of biochar in rice systems: Based on meta-analysis and field experiment demonstration. *Biochar* 8:60. https://doi.org/10.1007/s42773-025-00563-y.

Iboko MP., Dossou-Yovo ER., Obalum SE., Oraegbunam CJ., Diedhiou S., Brümmer C., Témé 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(11): e22132. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22132.

Islam SFU., van Groenigen JW., Jensen LS., Sander BO., & de Neergaard A. 2018. The effective mitigation of greenhouse gas emissions from rice paddies without compromising yield by early-season drainage. Science of the Total Environment. 6(12): 1329-1339. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.022.

Kartika K., Sakagami JI., Lakitan B., Yabuta S., Akagi I., Widuri LI., Siaga E., Iwanaga H., Nurrahma AHI. 2021. Rice husk biochar effects on improving soil properties and root development in rice (Oryza glaberrima Steud.) exposed to drought stress during early reproductive stage. *AIMS Agriculture*

and Food. 6(2): 737-751. https://doi.org/10.3934/agrfood.2021043.

Kaur M., Malik DP., Malhi GS., Sardana V., Bolan NS., Lal R., Siddique KHM. 2022. Rice residue management in the Indo-Gangetic Plains for climate and food security: A review. Agronomy for Sustainable Development, 42:92. https://doi.org/10.1007/s13593-022-00817-0.

Lestari DT., Aminah M., Munandar JM. 2024. Circular Economy Business Strategy of Organic Fertilizer in Parikesit Farmer Group. Indonesian Journal of Business and Entrepreneurship, 10(2): 400-410. https://doi.org/10.17358/IJBE.10.2.400.

Liu Y., Li H., Hu T., Mahmoud A., Li J., Zhu R., Jiao X., & 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, 830: 154792. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154792.

Muniroh NA., Aminah M. 2021. Business Model Canvas dan Strategi Bisnis Sekam Padi BUMD PT Gerbang NTB Emas Sebagai Bahan Co-Firing Energi Listrik Terbarukan [Business Model Canvas and Business Strategy of Rice Husk BUMD PT Gerbang NTB Emas as a Renewable Electrical Energy Co-Firing Material. Manajemen IKM: Jurnal Manajemen Pengembangan Industri Kecil Menengah, 16(1): 38-52. https://doi.org/10.29244/mikm.16.1.38-52.

Nan Q., Tang L., Chi W., Waqas M., & Wu W. 2023. The implication from six years of field experiment: The aging process induced lower rice production even with a high amount of biochar application. Biochar 5:27. https://doi.org/10.1007/s42773-023-00218-w

Nan Q., Wang C., Wang H., Yi Q., Liang B., Xu J., & Wu W. 2020b. Biochar drives microbially-mediated rice production by increasing soil carbon. Journal of Hazardous Materials, 387: 121680. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121680.

Nan Q., Wang C., Yi Q., Zhang L., Ping F., Thies JE., & Wu W. 2020a. Biochar amendment pyrolysed with rice straw increases rice production and mitigates methane emission over successive three years. Waste Management, 118: 1-8. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.013.

Nasfi, Aimon H., & Sentosa SU. 2023. Build the village economy: A systematic review on academic publication of Indonesian village-owned enterprises. Cogent Social Sciences, 9(2): 2252682. https://doi.org/10.1080/2331-1886.2023.2252682.

Phillipson J., Tiwasing P., Gorton M., Maioli S., Newbery R., Turner R. 2019. Shining a spotlight on small rural businesses: How does their performance compare with urban? *Journal of Rural Studies.* 68: 230-239. https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2018.09.017.

Pia HI., Lee SI., Kim HY., Tang S., Cheng W., Kwak JH., Park HJ., et al. 2024. Luxury application of biochar does not enhance rice yield and methane mitigation: A review and data analysis. *Journal of Soils and Sediments.* 24:2652-2668. https://doi.org/10.1007/s11368-024-03830-w.

Puri IT., Khoirunurrofik. 2021. The role of Village-Owned Enterprises (BUMDes) for the village community economy. *Economics Development Analysis Journal.* 10(1): 12-21. https://doi.org/10.15294/edaj.v10i1.40823.

Sohi SP., Krull E., Lopez-Capel E., Bol R. 2010. A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*. 105: 47-82. https://doi.org/10.1016/S0065-113(10)05002-9.

Tan W., Yu H., Huang C., Li D., Zhang H., Jia Y., Wang G., Xi B. 2018. Discrepant responses of methane emissions to additions with different organic compound classes of rice straw in paddy soil. *Science of the Total Environment.* 630: 141-145. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.230.

Ultari, T., Khoirunurrofik. 2024. The role of Village-Owned Enterprises (BUMDes) in village development: Empirical evidence from villages in Indonesia. *Jurnal Manajemen Pembangunan Indonesia: The Indonesian Journal of Development Planning.* 8(2): 256-280. https://doi.org/10.36574/jpp.v8i2.559.

Wen S., Cui N., Wang Y., Gong D., Wang Z., Xing L., Wu Z., & Zhang Y. 2025. Effect of biochar application on yield, soil carbon pools and greenhouse gas emission in rice fields: A global meta-analysis. Agricultural and Forest Meteorology. 369:110571. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2025.110571.

Widijanto H, Rissanti SRN, Suntoro S, & Syamsiyah J. 2023. Pengaruh biochar sekam padi dan macam pupuk terhadap pertumbuhan dan serapan padi. Agrotechnology Research Journal. 7(2): 85-92. https://doi.org/10.20961/agrotechresj.v7i2.77295.

Wu W., Yang M., Feng Q., McGrouther K., Wang H., Lu H., Chen Y. 2012. Chemical characterization of rice straw-derived biochar for soil amendment. *Biomass and Bioenergy*. 47: 268-276. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012. 09.034.

Zheng Y., Han X., Li Y., Liu S., Ji J., Tong Y. 2020. Effects of mixed controlled release nitrogen fertilizer with rice straw biochar on rice yield and nitrogen balance in Northeast China. *Scientific Reports.* 10: 9452. https://doi.org/10.1038/s41598-020-66300-6.