

Teknologi dan Karakterisasi dalam Proses Produksi Arang Sekam Padi untuk Berbagai Aplikasi: Tinjauan Pustaka

Muhamad Muhajir¹,
Adhielia Noer Syaief²,
Pratama Yoga Wica³,

^{1,2,3}Teknologi Rekayasa Pemeliharaan Alat Berat, Politeknik Negeri Tanah Laut, Jl. Ahmad Yani No.Km.06, Pemuda, Kec. Pelaihari, Kabupaten Tanah Laut, Kalimantan Selatan 70815

¹Korespondensi penulis: muhamadmuhajir@politla.ac.id

Article Info: Received: July 17, 2025; Accepted: November 27, 2025; Available online: November 30, 2025

DOI: 10.30588/jeemm.v9i2.2356

Abstract: Rice husk is an abundant agricultural waste with high potential to be processed into charcoal (biochar) through pyrolysis as part of sustainable biomass management strategies. This study aims to analyze the integration among pyrolysis technologies, characterization of rice husk biochar and its relevance to various functional applications, as part of sustainable biomass development. The review was conducted using a narrative approach, analyzing recent scientific literature (2019–2024) relevant to inclined grate furnace-based pyrolysis systems and biochar characterization methods, such as morphology, crystallinity, and functional group analyses. The results indicate that the inclined grate furnace system provides optimal thermal control, producing high-quality biochar with well-developed pore structures, good carbon stability, and high potential for adsorption and nutrient retention. Biochar derived from rice husks has also proven effective as a soil amendment, pollutant adsorbent, catalyst support, cement additive, and alternative fuel. These characteristics are significantly influenced by process parameters and reactor design. These findings underscore the importance of interdisciplinary approaches in optimizing biomass technologies. This study contributes to the development of more efficient biochar production strategies and provides a foundation for further research on the long-term stability and environmental impacts of its applications.

Keywords: Rice husk, Biochar, Pyrolysis, characterization, technology

Abstrak: Sekam padi merupakan limbah pertanian yang melimpah dengan potensi tinggi untuk diolah menjadi arang (biochar) melalui pirolisis sebagai bagian dari strategi pengelolaan biomassa berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis integrasi antara teknologi pirolisis dengan karakterisasi biochar sekam padi, dan relevansinya terhadap berbagai aplikasi fungsional, sebagai upaya mendukung pengembangan biomassa berkelanjutan. Tinjauan ini dilakukan dengan pendekatan naratif, menganalisis literatur ilmiah terkini (2019–2024) yang relevan dengan sistem pirolisis berbasis tungku kisi miring dan metode karakterisasi biochar, seperti morfologi, kristalinitas, dan analisis gugus fungsi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem tungku kisi miring memberikan kontrol termal yang optimal, menghasilkan biochar berkualitas tinggi dengan struktur pori yang berkembang baik, stabilitas karbon yang baik, dan potensi tinggi untuk adsorpsi dan retensi hara. Biochar yang berasal dari sekam padi juga terbukti efektif sebagai amandemen tanah, penyerap polutan, penopang katalis, aditif semen, dan bahan bakar alternatif. Karakteristik ini sangat dipengaruhi oleh parameter proses dan desain reaktor. Temuan ini menggarisbawahi pentingnya pendekatan interdisipliner dalam mengoptimalkan teknologi biomassa. Studi ini berkontribusi pada pengembangan strategi produksi biochar yang lebih efisien dan menyediakan dasar untuk penelitian lebih lanjut tentang stabilitas jangka panjang dan dampak lingkungan dari penerapannya.

Kata Kunci: Sekam padi, Biochar, Pirolisis, Karakterisasi, Teknologi

I. Pendahuluan

Peningkatan jumlah limbah sekam padi telah menjadi isu penting dalam konteks pelestarian lingkungan dan pengelolaan sumber daya pertanian. Sekam padi merupakan salah satu limbah utama

yang dihasilkan dari proses penggilingan padi. Jika tidak dikelola dengan baik, limbah ini dapat menimbulkan dampak negatif yang luas terhadap ekosistem. Produksi padi secara global menghasilkan sekam dalam jumlah besar. Sebagai contoh, Vietnam menghasilkan sekitar 1,9 juta ton sekam padi setiap tahun (Nam et al., 2022), sedangkan di India, sekam menyumbang hampir 20% dari total biomassa tanaman padi (Munarso & Mulyawanti, 2023). Mengingat pentingnya padi sebagai makanan pokok di banyak negara, termasuk Indonesia, maka penanganan limbah sekam menjadi isu strategis dalam pengembangan teknologi pengolahan biomassa. Dalam beberapa tahun terakhir, pendekatan konversi termal sekam padi menjadi biochar telah banyak diteliti karena kemampuannya mengubah limbah menjadi produk bernilai tambah dengan manfaat agronomis, lingkungan, dan energi.

Kemajuan dalam ilmu material dan teknologi energi terbarukan telah mendorong inovasi dalam pengolahan sekam padi menjadi biochar yang fungsional. Pirolisis, yakni proses pemanasan bahan organik tanpa keberadaan oksigen, merupakan metode utama dalam konversi tersebut. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa biochar hasil pirolisis memiliki potensi untuk menyerap karbon dan memperbaiki kualitas tanah (Dey et al., 2021; Premchand et al., 2024). Di sisi lain, aktivasi kimia pada arang sekam padi telah terbukti efektif dalam aplikasi filtrasi air dan udara (Kaya et al., 2023; Mai Huong et al., 2022). Selain itu, teknologi briket berbasis arang sekam mendukung pengembangan bahan bakar padat yang lebih ramah lingkungan (Yiga et al., 2023). Namun, praktik pembakaran langsung atau pembuangan sekam padi secara terbuka masih menimbulkan masalah serius, seperti pencemaran udara, degradasi tanah, dan dampak buruk terhadap kesehatan masyarakat (El-Naggar et al., 2023; Kang et al., 2024a; Si et al., 2025). Fenomena ini menunjukkan perlunya pendekatan integratif untuk meningkatkan nilai guna dan mengurangi dampak limbah sekam secara berkelanjutan.

Salah satu tantangan utama dalam pemanfaatan sekam padi sebagai biochar adalah variabilitas sifat produk akhir, yang sangat dipengaruhi oleh teknik konversi termal dan parameter proses yang digunakan. Faktor seperti suhu pirolisis, laju pemanasan, waktu tinggal, serta jenis aktivator kimia terbukti memengaruhi kualitas fisik dan kimia biochar, termasuk porositas, luas permukaan, stabilitas karbon, dan kandungan unsur hara (Premchand et al., 2024; Singh et al., 2020). Sebagai contoh, biochar yang diproduksi pada suhu rendah cenderung memiliki kandungan volatil tinggi namun kurang stabil secara struktur, sedangkan biochar hasil suhu tinggi memiliki struktur aromatik yang lebih kompleks dan stabil (Suleman et al., 2024). Ketidaksesuaian ini semakin diperparah oleh perbedaan sifat bahan baku, teknik prapengolahan, serta belum adanya standar baku dalam proses produksi *biochar*.

Beberapa studi telah mengusulkan solusi teknis melalui rekayasa sistem reaktor, seperti *rotary kiln*, *fluidized bed*, dan *cyclonic furnace*. *Rotary kiln* memiliki keunggulan dalam hal kontinuitas operasi dan distribusi panas merata, namun kurang efisien dalam pengolahan biomassa berpartikel halus (Qayyum et al., 2024). Sementara itu, reaktor *fluidized bed* menawarkan peningkatan karbonisasi dan porositas pada suhu tinggi, tetapi memiliki keterbatasan dalam hal homogenitas bahan baku (Ortega-Ramírez et al., 2024). *Cyclonic furnace* unggul dalam efisiensi pembakaran, tetapi memerlukan pengaturan parameter yang presisi untuk menjaga emisi tetap rendah (S. Piyathissa et al., 2023a). Di sisi lain, *inclined grate furnace* dinilai lebih unggul dalam mengatasi tantangan ini dengan memberikan kontrol termal yang lebih baik dan distribusi udara yang optimal (Campos et al., 2020).

Inclined grate furnace memungkinkan operasi berkelanjutan dengan pengaturan suhu dan waktu tinggal yang presisi. Sistem ini menawarkan keuntungan dalam hal efisiensi energi, stabilitas termal, dan pengurangan emisi gas rumah kaca seperti CO₂ dan CH₄ (Williams et al., 2023). Penelitian terbaru menunjukkan bahwa biochar yang dihasilkan menggunakan sistem ini memiliki kandungan karbon tinggi dan luas permukaan besar, yang ideal untuk adsorpsi polutan maupun perbaikan sifat tanah. Namun, aspek teknis seperti kebutuhan desain spesifik dan biaya awal yang tinggi tetap menjadi kendala dalam implementasi luas teknologi ini.

Meskipun beberapa studi telah meneliti potensi pembakaran dalam memproduksi biochar dari berbagai biomassa, studi yang secara khusus fokus pada sekam padi masih terbatas. Selain itu, masih sedikit penelitian yang menyoroti hubungan antara parameter operasi tungku dan performa biochar secara kuantitatif dan aplikatif. Penelitian yang ada jarang mengulas dampak integratif karakteristik biochar terhadap kualitas tanah, retensi hara, dan aktivitas mikroba secara bersamaan. Kesenjangan ini

menunjukkan perlunya studi sistematis dan menyeluruh terhadap teknologi, karakterisasi, dan aplikasi biochar dari sekam padi, serta bagaimana teknologi pirolisis dapat diadaptasikan secara efektif untuk material tersebut.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis integrasi antara teknologi pirolisis karakterisasi biochar sekam padi, dan relevansinya terhadap berbagai aplikasi fungsional, sebagai upaya mendukung pengembangan biomassa berkelanjutan. Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan sistematis yang menghubungkan parameter proses, sifat fisiko-kimia biochar, dan kinerja aplikatifnya dalam satu kerangka analitis. Studi ini juga mencakup ulasan terhadap berbagai tantangan implementasi dan memberikan justifikasi ilmiah atas perlunya pengembangan teknologi berbasis biomassa yang lebih terstandarisasi dan efisien. Ruang lingkup kajian mencakup identifikasi parameter utama dalam proses produksi, evaluasi performa biochar, serta analisis prospek aplikatifnya dalam praktik berkelanjutan.

II. Bahan dan Metode

Untuk menyajikan tinjauan literatur yang komprehensif tentang teknologi dan karakterisasi dalam proses produksi arang sekam padi untuk berbagai aplikasi, metode yang digunakan dalam penelitian ini dirancang secara sistematis. Fokus utama desain metode ini adalah pada kualitas sumber data, relevansi tema, dan validitas ilmiah. Pendekatan ini bertujuan untuk menjawab tujuan utama penelitian, yaitu memahami bagaimana parameter proses dan desain reaktor memengaruhi sifat fisiko-kimia biochar, serta bagaimana karakteristik tersebut menentukan kinerjanya dalam aplikasi pertanian, lingkungan, energi, dan material.

2.1 Strategi Pencarian Literatur

Pengumpulan data dilakukan melalui pendekatan narrative review dengan memprioritaskan sumber literatur ilmiah yang relevan dan mutakhir. Basis data utama yang digunakan adalah Google Scholar karena memiliki cakupan luas dan menyediakan publikasi terbaru. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian meliputi: “Teknologi arang sekam padi,” “*biochar production*,” “*pyrolysis system*,” “*thermal management*,” “*emission control*,” dan “*char quality*.” Untuk meningkatkan akurasi dan cakupan hasil pencarian, operator Boolean seperti AND, OR, dan NOT digunakan.

2.2 Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Agar hasil tinjauan tetap fokus dan sesuai dengan ruang lingkup penelitian, beberapa kriteria inklusi dan eksklusi ditetapkan. Kriteria inklusi mencakup:

- Artikel berbahasa Inggris,
- Diterbitkan antara tahun 2019 hingga 2024,
- Membahas topik utama terkait teknologi pirolisis, dan
- Menggunakan sekam padi sebagai bahan baku biochar.

Sementara itu, kriteria eksklusi meliputi:

- Artikel yang membahas sistem pirolisis selain secara manual,
- Studi yang menggunakan biomassa selain sekam padi,
- Publikasi non-ilmiah atau yang tidak melalui proses peer review.

2.3 Prosedur Ekstraksi dan Analisis Data

Data dari artikel yang telah diseleksi diekstraksi secara sistematis untuk mengidentifikasi informasi penting yang mencakup tiga aspek utama: (1) parameter operasional sistem produksi biochar, (2) karakteristik biochar, serta (3) kinerja dan potensi aplikasi biochar di berbagai sektor. Parameter operasional yang menjadi fokus meliputi suhu pirolisis, waktu pembakaran, kontrol aliran udara, dan efisiensi termal. Karakteristik biochar yang dievaluasi mencakup *Scanning Electron Microscopy* (SEM), Pemukaan, porositas, *X-Ray Diffraction* (XRD) Struktur kandungan karbon, dan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) struktur kimia dan Gugus fungsi.

Seluruh data dianalisis secara kualitatif menggunakan pendekatan komparatif. Temuan dari setiap studi dimasukkan ke dalam matriks perbandingan untuk meninjau kesamaan, perbedaan, serta tren utama

yang muncul dari berbagai sumber. Pendekatan ini mendukung identifikasi pola teknologi pirolisis dan relevansi karakteristik biochar terhadap aplikasi praktisnya.

2.4 Evaluasi Kualitas Studi

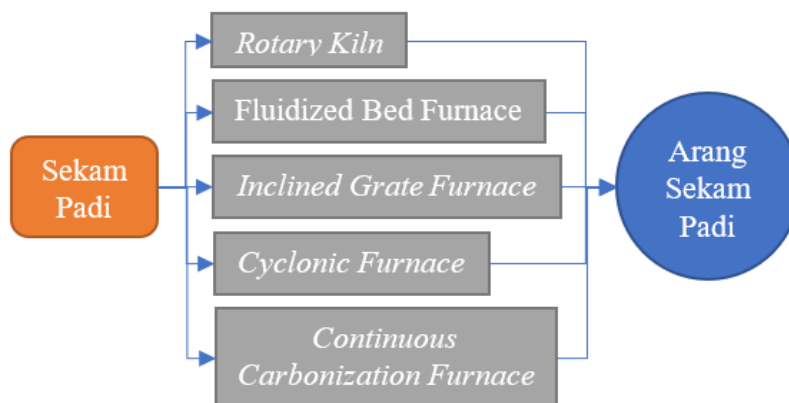
Setiap artikel yang lolos seleksi awal kemudian dievaluasi secara kritis berdasarkan metodologi penelitian, kejelasan penyajian hasil, kontribusinya terhadap pengembangan teknologi pirolisis, serta reputasi jurnal tempat artikel tersebut diterbitkan. Prioritas diberikan pada artikel dari jurnal bereputasi tinggi, khususnya jurnal basis data Scopus di bidang material dan energi terbarukan, teknologi lingkungan, dan teknik kimia.

Penilaian kualitas dilakukan untuk memastikan bahwa hanya studi yang memenuhi standar akademik tinggi yang digunakan dalam penyusunan sintesis literatur. Penelitian eksperimental dan ulasan sistematis mendapat prioritas utama karena menyediakan data empiris yang kuat dan relevan.

III. Hasil dan Pembahasan

3.1. Evaluasi Teknologi Produksi Arang Sekam Padi

Produksi arang dari sekam padi melibatkan berbagai metode pirolisis gambar 1, yang secara umum dibagi menjadi sistem reaktor batch (sekali proses) dan sistem kontinu (berkelanjutan).



Gambar 1. Skema Teknologi Produksi arang sekam padi

Setiap teknologi memiliki kelebihan dan kekurangan, tergantung pada karakter bahan baku, efisiensi energi, kualitas produk, serta kemampuan untuk ditingkatkan ke skala yang lebih besar.

3.1.1 Rotary Kiln

Teknologi *rotary kiln* sering digunakan dalam proses pirolisis biomassa. Sistem ini bekerja dengan memutar silinder untuk mendistribusikan panas secara merata dan mampu memproses material dalam jumlah besar secara terus-menerus. Menurut penelitian oleh Okida et al., (2024), *rotary kiln* menghasilkan biochar dengan struktur stabil dan kadar abu sedang. Keunggulan ini disebabkan oleh efisiensi termal yang meningkat karena rotasi silinder membantu menjaga suhu tetap stabil selama proses pirolisis.

Namun, ada beberapa tantangan teknis yang perlu diatasi. Kandungan air yang tinggi pada sekam padi meningkatkan kebutuhan energi untuk pengeringan awal (Mulyono et al., 2021) Selain itu, ukuran partikel yang terlalu halus dapat mengganggu distribusi panas secara merata (Qayyum et al., 2024). Untuk mengatasi masalah ini, pemantauan suhu secara real-time direkomendasikan guna menjaga stabilitas proses.

3.1.2 Fluidized Bed Furnace

Reaktor *fluidized bed* menunjukkan kinerja yang baik dalam hal efisiensi konversi termal dan pembentukan struktur aromatik pada biochar. Penelitian oleh El-Naggar et al., (2022) dan Su et al., (2020) menemukan bahwa peningkatan suhu pirolisis hingga 600°C memperkuat struktur karbonisasi

dan meningkatkan porositas biochar. Namun, dekomposisi yang lebih intensif pada suhu tinggi menyebabkan penurunan jumlah biochar yang dihasilkan.

Parameter seperti laju pemanasan, waktu tinggal, dan komposisi kimia sekam padi (kandungan lignin dan abu) sangat memengaruhi kualitas akhir biochar (Kang et al., 2024). Meskipun demikian, heterogenitas bahan baku dan kesulitan dalam mengontrol distribusi panas tetap menjadi kendala untuk implementasi teknologi ini dalam skala industri.

3.1.3 *Inclined Grate Furnace*

Sistem inclined grate menunjukkan hasil yang paling menjanjikan dalam tinjauan ini. Dengan distribusi panas yang merata dan pengaturan aliran udara yang presisi, sistem ini memungkinkan proses pirolisis yang stabil dan menghasilkan biochar berkualitas tinggi (Campos et al., 2020; Nam et al., 2022). Biochar yang dihasilkan memiliki kandungan karbon tinggi, luas permukaan spesifik besar, serta struktur yang stabil. Selain itu, sistem ini mendukung operasi berkelanjutan, sehingga efisiensi termal dapat ditingkatkan secara signifikan. Manajemen pembakaran yang optimal juga berhasil menurunkan emisi CO₂ dan CH₄ secara drastis (Premchand et al., 2024; Williams et al., 2023). Kendati demikian, tantangan tetap ada, terutama terkait biaya awal investasi dan kebutuhan desain sistem yang spesifik.

3.1.4 *Cyclonic Furnace*

Reaktor siklon bergantung pada aliran turbulen melingkar untuk mencapai pembakaran sempurna dan konversi biomassa secara efisien. Efisiensi pembakaran mencapai lebih dari 90%, sebagaimana dilaporkan oleh Ortega-Ramirez et al., (2024), dengan residu yang rendah dan kemampuan untuk memproses biomassa berpartikel halus seperti sekam padi. Namun, efisiensi sistem ini sangat bergantung pada kontrol parameter operasional yang presisi, terutama dalam menjaga stabilitas aliran udara dan suhu pembakaran (Piyathissa et al., 2023b). Oleh karena itu, penerapan teknologi ini memerlukan sistem kontrol adaptif yang canggih.

3.1.5 *Continuous Carbonization Furnace*

Tungku karbonisasi kontinu menawarkan efisiensi tinggi melalui sistem umpan dan keluaran biomassa secara berkelanjutan. Proses ini mengurangi waktu jeda dan memungkinkan pemulihan energi dari panas sisa untuk pengeringan awal bahan baku (Mort et al., 2021). Sistem ini juga mendukung pengendalian suhu yang lebih presisi dan mengurangi emisi melalui sirkulasi ulang gas (Campos et al., 2020). Meski begitu, kompleksitas operasional dan biaya awal masih menjadi kendala utama dalam penerapan teknologi ini di tingkat petani atau industri kecil.

3.2 Karakterisasi Arang Sekam Padi

Evaluasi kualitas biochar mencakup analisis morfologi, struktur kristal, gugus fungsi, dan luas permukaan. Pemilihan teknik karakterisasi yang tepat sangat penting untuk menentukan potensi aplikatif biochar (Castiglioni et al., 2021).

3.2.1 *Morfologi Arang Sekam Padi*

Analisis SEM mengungkapkan struktur pori-pori biochar yang terbentuk dengan baik, yang penting untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi dan retensi air dalam tanah (Gonçalves Matoso et al., 2020). Morfologi biochar sangat dipengaruhi oleh metode pirolisis. Misalnya, hasil pirolisis langsung cenderung padat dan kristalin, sedangkan metode hidrotermal (HTC) menghasilkan pori-pori yang lebih besar dan permukaan bertekstur kasar (Premchand et al., 2024).

3.2.2 *Struktur Kristalin*

Difraksi sinar-X menunjukkan bahwa arang sekam padi mengandung campuran karbon amorf dan silika kristalin. Silika dalam bentuk kuarsa meningkatkan kestabilan struktur (Munarso & Mulyawanti, 2023), sementara karbon amorf memiliki reaktivitas permukaan yang tinggi untuk aplikasi adsorpsi (Barakat et al., 2022). Pembentukan struktur grafitik pada suhu tinggi ($\geq 600^\circ\text{C}$) mendukung aplikasi biochar dalam penyimpanan energi (Piyathissa et al., 2023).

3.2.3 Gugus Fungsi

Analisis FTIR menunjukkan hilangnya gugus hidroksil dan metoksi setelah pirolisis, yang menandakan degradasi senyawa organik dari *lignoselulosa* (Nam et al., 2022). Aktivasi kimia dengan KOH atau H_3PO_4 memperkenalkan gugus tambahan seperti-COOH, yang memperkuat kapasitas adsorpsi biochar (Dey et al., 2021). Namun, aktivasi pada suhu tinggi dapat merusak gugus fungsional aktif.

3.3 Aplikasi Arang Sekam Padi

Keberhasilan dalam memproduksi dan menganalisis karakteristik biochar dari sekam padi harus dipahami dalam konteks pemanfaatannya di berbagai bidang. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa arang sekam padi memiliki banyak fungsi, seperti bahan pembenah tanah, adsorben, material konstruksi, hingga komponen dalam formulasi farmasi dan energi.



Gambar 2. Aplikasi Arang Sekam Padi

3.3.1 Pembenah Tanah dan Remediasi Lingkungan

Biochar dari sekam padi telah banyak dilaporkan mampu meningkatkan kesuburan tanah serta memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah. Struktur pori-pori biochar membantu meningkatkan kemampuan tanah untuk menahan air dan menyediakan hara, terutama pada tanah kering dan miskin nutrisi (Williams et al., 2023). Penelitian oleh Asirifi et al., (2021) menunjukkan bahwa penggunaan biochar dapat meningkatkan pH tanah, mendukung pertumbuhan akar tanaman, serta meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah.

Selain itu, biochar memiliki kemampuan tinggi untuk menyerap logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), dan arsenik (As), sehingga cocok digunakan untuk membersihkan tanah yang tercemar (Azlan Halmi & Simarani, 2024). Gugus fungsional seperti -OH dan -COOH yang terbentuk selama proses pirolisis dan aktivasi kimia memfasilitasi ikatan dengan zat pencemar.

3.3.2 Material Pendukung Katalis

Karakteristik biochar yang memiliki luas permukaan besar dan gugus aktif membuatnya menjadi bahan pendukung ideal untuk sistem katalitik. Dang et al., (2023) mencatat bahwa biochar dapat meningkatkan stabilitas dan efektivitas katalis logam seperti besi (Fe), nikel (Ni), dan tembaga (Cu). Munarso & Mulyawanti, (2023) juga melaporkan bahwa biochar dari sekam padi efektif digunakan dalam reaksi degradasi senyawa organik dalam air limbah. Namun, pengaruh kondisi sintesis terhadap kestabilan termal dan struktur aktif dari sistem katalitik ini masih perlu diteliti lebih lanjut, terutama untuk aplikasi industri berskala besar.

3.3.3 Aditif dalam Industri Detergen

Penambahan arang sekam padi sebagai aditif dalam formulasi detergen telah terbukti meningkatkan efisiensi pembersihan dan stabilitas campuran. Fouladidordhani et al., (2021) mencatat bahwa kemampuan adsorpsi biochar terhadap senyawa organik menjadikannya bahan pendukung ideal untuk detergen ramah lingkungan. Struktur pori-pori dan afinitas permukaan biochar memungkinkan interaksi efektif dengan surfaktan, mendukung pembentukan emulsi dan dispersi yang stabil (Okida et al., 2024).

3.3.4 Aditif untuk Semen dan Beton

Arang sekam padi juga digunakan sebagai aditif dalam material konstruksi seperti semen dan beton. Penelitian oleh Nayak & Datta, (2023) menunjukkan bahwa penambahan biochar dalam campuran beton dapat meningkatkan kekuatan tekan, ketahanan terhadap air, serta mengurangi retak akibat penyusutan. Silika dalam arang sekam berperan dalam reaksi pozolanik, yang memperkuat ikatan antar partikel dalam pasta semen. Namun, variasi dalam struktur biochar akibat perbedaan metode produksi dapat memengaruhi homogenitas dan performa akhir beton secara signifikan.

3.3.5 Aplikasi Farmasi

Di bidang farmasi, biochar dari sekam padi menunjukkan potensi sebagai bahan pembawa dalam sistem penghantaran obat. Struktur pori-porinya dan gugus fungsionalnya memungkinkan biochar berikatan dengan senyawa bioaktif serta menyerap toksin dalam sistem pencernaan (Campos et al., 2020). Meski demikian, tantangan dalam standarisasi kualitas biochar serta isu regulasi masih menjadi kendala utama dalam penerapan teknologi ini di industri farmasi.

3.3.6 Energi (Briket dan Aditif Bahan Bakar)

Biochar dari sekam padi juga dimanfaatkan sebagai bahan dasar dalam produksi briket bahan bakar. Nilai kalor yang tinggi dan kestabilan pembakaran menjadikan biochar sebagai alternatif energi terbarukan (Moyo et al., 2020; Tsai et al., 2022). Selain itu, sebagai aditif dalam bahan bakar fosil, biochar berkontribusi pada peningkatan efisiensi pembakaran dan pengurangan emisi gas buang (Duan et al., 2024). Meskipun potensinya sangat besar, tantangan utama dalam komersialisasi terletak pada skala produksi dan distribusi yang masih terbatas.

3.4 Sintesis Temuan dan Implikasi

Berdasarkan hasil kajian secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa produksi dan pemanfaatan arang sekam padi menawarkan peluang strategis untuk mendukung praktik berkelanjutan di berbagai sektor. Teknologi inclined grate furnace terlihat sebagai solusi teknis yang sangat menjanjikan karena memiliki efisiensi termal tinggi, stabilitas operasi yang baik, serta kemampuan untuk mengendalikan emisi dengan efektif. Analisis karakterisasi biochar melalui teknik SEM, XRD, dan FTIR membuktikan bahwa material ini memiliki kualitas yang memadai untuk digunakan dalam aplikasi pertanian, lingkungan, dan energi.

Penelitian ini juga menegaskan bahwa keberhasilan pemanfaatan biochar sangat bergantung pada pemilihan teknologi pirolisis, pengendalian parameter proses, serta integrasi sistem dengan kebutuhan akhir pengguna. Dengan memahami hubungan antara desain reaktor, karakteristik bahan baku, dan sifat akhir biochar, peneliti dan praktisi dapat mengoptimalkan proses produksi serta memperluas implementasi teknologi ini ke skala yang lebih besar.

Namun, ada beberapa aspek yang masih memerlukan penelitian lebih lanjut. Pertama, diperlukan studi jangka panjang untuk mengevaluasi stabilitas biochar di lingkungan, terutama interaksinya dengan mikroorganisme tanah dan ketersediaan unsur hara makro serta mikro. Kedua, perlu dikembangkan model ekonomi sirkular yang mempertimbangkan analisis biaya-manfaat, siklus produk, serta potensi integrasi biochar ke dalam rantai pasok pertanian atau energi. Ketiga, diperlukan pendekatan lintas disiplin yang melibatkan bidang teknik, agronomi, ekologi, dan ekonomi untuk merumuskan kebijakan dan strategi adopsi yang komprehensif.

Sebagai penutup, kajian ini memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk pengembangan teknologi arang sekam padi sebagai bagian dari solusi biomassa berkelanjutan. Tinjauan ini tidak hanya memperkaya literatur ilmiah, tetapi juga memberikan panduan praktis bagi peneliti dan pembuat kebijakan dalam mendorong transisi menuju material pemanfaatan material, pertanian, dan energi yang lebih bersih serta efisien. Studi lanjutan diharapkan dapat memperkuat sinergi antara pengetahuan ilmiah dan aplikasi nyata di lapangan, sehingga dapat mempercepat adopsi teknologi ini secara luas dan memberikan dampak positif yang signifikan.

IV. Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil menganalisis integrasi antara teknologi pirolisis khususnya sistem inclined grate furnace karakterisasi biochar sekam padi, dan relevansinya terhadap berbagai aplikasi fungsional. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa kualitas dan kinerja biochar secara langsung ditentukan oleh parameter proses dan desain reaktor, yang pada gilirannya memengaruhi efektivitasnya dalam aplikasi pertanian, lingkungan, energi, dan material. Sistem inclined grate furnace terbukti unggul dalam menghasilkan biochar berkualitas tinggi berkat kontrol termal yang stabil, efisiensi energi yang optimal, serta emisi gas rumah kaca yang rendah. Karakterisasi melalui morfologi, kristalinitas, dan gugus fungsi menunjukkan pembentukan struktur pori, komposisi karbon-silika yang stabil, serta keberadaan gugus fungsi aktif yang mendukung fungsi adsorpsi, retensi hara, dan reaktivitas permukaan.

Temuan ini memberikan dasar ilmiah untuk pengembangan strategi produksi biochar berbasis limbah pertanian yang lebih terstandarisasi, efisien, dan berkelanjutan. Untuk penelitian mendatang, disarankan untuk melakukan evaluasi jangka panjang terkait stabilitas biochar di berbagai kondisi tanah, interaksi dengan mikrobioma, serta pemanfaatan asap cair sebagai produk samping bernilai tambah. Dengan demikian, studi ini tidak hanya memperkaya literatur ilmiah, tetapi juga menawarkan arahan strategis bagi penerapan teknologi biomassa berkelanjutan berbasis sekam padi di tingkat lapangan maupun industri.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan rasa terima kasih yang tulus kepada Politeknik Negeri Tanah Laut khusus Prodi Teknologi Rekayasa Perawatan Alat Berat atas dukungan berupa fasilitas, kesempatan, serta lingkungan akademik yang mendukung selama proses penulisan artikel ini. Apresiasi juga diberikan kepada semua pihak yang telah memberikan kontribusi pemikiran dan saran yang bersifat membangun.

Daftar Pustaka

- Asirifi, I., Kaetzl, K., Werner, S., Setsoafia Saba, C. K., Abagale, F. K., Amoah, P., & Marschner, B. (2021). Pathogen and Heavy Metal Contamination in Urban Agroecosystems of Northern Ghana: Influence of Biochar Application and Wastewater Irrigation. *Journal of Environmental Quality*. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20260>
- Azlan Halmi, M. F., & Simarani, K. (2024). Response of Soil Microbial Glycoside Hydrolase Family 6 Cellulolytic Population to Lignocellulosic Biochar Reveals Biochar Stability Toward Microbial Degradation. *Journal of Environmental Quality*. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20588>
- Barakat, N. A. M., Irfan, O. M., & Moustafa, H. M. (2022). H₃po₄/Koh Activation Agent for High Performance Rice Husk Activated Carbon Electrode in Acidic Media Supercapacitors. *Molecules*. <https://doi.org/10.3390/molecules28010296>
- Campos, P., Miller, A. Z., Knicker, H., Pereira, M. F. C., Merino, A., & de Arranz, J. M. (2020). Chemical, Physical and Morphological Properties of Biochars Produced From Agricultural Residues: Implications for Their Use as Soil Amendment. *Waste Management*. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.013>
- Castiglioni, M., Rivoira, L., Ingrando, I., Bubba, M. D., & Bruzzoniti, M. C. (2021). Characterization Techniques as Supporting Tools for the Interpretation of Biochar Adsorption Efficiency in Water Treatment: A Critical Review. *Molecules*, 26(16), 5063. <https://doi.org/10.3390/molecules26165063>
- Dang, D., Mei, L., Yan, G., & Liu, W. (2023). Synthesis of Nanoporous Biochar From Rice Husk for Adsorption of Methylene Blue. *Journal of Chemistry*. <https://doi.org/10.1155/2023/6624295>

- Dey, T., Bhattacharjee, T., Nag, P., Ritika, R., Ghati, A., & Kuila, A. (2021). Valorization of Agro-Waste Into Value Added Products for Sustainable Development. *Bioresource Technology Reports*. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100834>
- Duan, S., AL-Huqail, A. A., Alsudays, I. M., Younas, M., Aslam, A., Shahzad, A. N., Qayyum, M. F., Rizwan, M. S., Hamoud, Y. A., Shaghaleh, H., & Hong Yong, J. W. (2024). Effects of Biochar Types on Seed Germination, Growth, Chlorophyll Contents, Grain Yield, Sodium, and Potassium Uptake by Wheat (*Triticum Aestivum* L.) Under Salt Stress. *BMC Plant Biology*. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05188-0>
- El-Naggar, N. E. A., El-Malkey, S. E., Abu-Saied, M. A., & Mohammed, A. B. A. (2022). Exploration of a novel and efficient source for production of bacterial nanocellulose, bioprocess optimization and characterization. *Scientific Reports*, 12(1), 1–22. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22240-x>
- El-Naggar, N. E. A., Mohammed, A. B. A., & El-Malkey, S. E. (2023). Bacterial nanocellulose production using Cantaloupe juice, statistical optimization and characterization. *Scientific Reports*, 13(1), 1–25. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26642-9>
- Fouladidorhani, M., Shayannejad, M., & Arthur, E. (2021). Evaluation of the Potential of Feedstock Combinations and Their Biochars for Soil Amendment. *Waste Management & Research the Journal for a Sustainable Circular Economy*. <https://doi.org/10.1177/0734242x211060611>
- Gonçalves Matoso, S. C., Salvador Wadt, P. G., de Júnior, V. S., Otero, X. L., & Plotegher, F. (2020). Variation in the Properties of Biochars Produced by Mixing Agricultural Residues and Mineral Soils for Agricultural Application. *Waste Management & Research the Journal for a Sustainable Circular Economy*. <https://doi.org/10.1177/0734242x20935180>
- Kang, Y., Chun, J., Yun, Y.-U., Lee, J.-Y., Sung, J., & Oh, T. (2024a). Pyrolysis Temperature and Time of Rice Husk Biochar Potentially Control Ammonia Emissions and Chinese Cabbage Yield From Urea-Fertilized Soils. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54307-2>
- Kang, Y., Chun, J., Yun, Y.-U., Lee, J.-Y., Sung, J., & Oh, T. (2024b). Pyrolysis Temperature and Time of Rice Husk Biochar Potentially Control Ammonia Emissions and Chinese Cabbage Yield From Urea-Fertilized Soils. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54307-2>
- Kaya, N., Özkeser, E. C., & Uzun, Z. Y. (2023). Investigating the Effectiveness of Rice Husk-Derived Low-Cost Activated Carbon in Removing Environmental Pollutants: A Study of Its Characterization. *International Journal of Phytoremediation*. <https://doi.org/10.1080/15226514.2023.2246584>
- Mai Hương, P. T., Hiền Chu, T. T., Nguyen, K. D., Oanh Le, T. K., Obaid, S. Al, Alharbi, S. A., Kim, J.-T., & Viet, N. M. (2022). Alginate-Modified Biochar Derived From Rice Husk Waste for Improvement Uptake Performance of Lead in Wastewater. *Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135956>
- Mort, R., Vorst, K., Curtzwiler, G., & Jiang, S. (2021). Biobased foams for thermal insulation: material selection, processing, modelling, and performance. *RSC Advances*, 11(8), 4375–4394. <https://doi.org/10.1039/d0ra09287h>
- Moyo, G. G., Hu, Z., & Getahun, M. D. (2020). Decontamination of Xenobiotics in Water and Soil Environment Through Potential Application of Composite Maize Stover/Rice Husk (MS/RH) Biochar—a Review. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09163-8>
- Mulyono, E. E., Ruslan, M., Priatmadi, B. J., & Yusran, F. H. (2021). Organic Material Selection for Soil Amendment on Mine Reclamation With Analytic Hierarchy Process. *Environmental Quality Management*. <https://doi.org/10.1002/tqem.21807>

- Munarso, S. J., & Mulyawanti, I. (2023). Effect of Adsorbent From Activated Rice Husk Charcoal on the Characteristics of Crude Palm Oil (CPO); A Preliminary Study. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1172/1/012054>
- Nam, T. S., Thao, H. Van, Chiêm, N. H., Van, C. N., & Tarao, M. (2022). Rice Husk and Melaleuca Biochar Additions Reduce Soil CH₄ and N₂O Emissions and Increase Soil Physicochemical Properties. *F1000research*. <https://doi.org/10.12688/f1000research.74041.2>
- Nayak, P. P., & Datta, A. (2023). Synthesis and Characterization of Si/SiO₂/SiC Composites Through Carbothermic Reduction of Rice Husk-Based Silica. *Silicon*. <https://doi.org/10.1007/s12633-022-02278-2>
- Okida, S., Dohi, H., Kudo, S., Wada, S., Shishido, T., Okuyama, N., Asano, S., & Hayashi, J. (2024). Enhancing the Strength of Formed Coke From Woody Biomass With the Addition of Biomass Extracts. *Energy & Fuels*. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c02892>
- Ortega-Ramírez, A. T., Tovar, M. R., & Silva-Marrufo, Ó. (2024). Rice Husk Reuse as a Sustainable Energy Alternative in Tolima, Colombia. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60115-5>
- Premchand, P., Demichelis, F., Galletti, C., Chiaramonti, D., Bensaid, S., Antunes, E., & Fino, D. (2024). Enhancing Biochar Production: A Technical Analysis of the Combined Influence of Chemical Activation (KOH and NaOH) and Pyrolysis Atmospheres (N₂/Co₂) on Yields and Properties of Rice Husk-Derived Biochar. *Journal of Environmental Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123034>
- Qayyum, M. F., Khan, D.-S., Suliman Alghanem, S. M., S. Alhaithloul, H. A., Alsudays, I. M., Rizwan, M., & Hong Yong, J. W. (2024). Agricultural Waste-Based Modified Biochars Differentially Affected the Soil Properties, Growth, and Nutrient Accumulation by Maize (*Zea Mays* L.) Plants. *BMC Plant Biology*. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05202-5>
- S. Piyathissa, S. D., Kahandage, P. D., Namgay, N., Zhang, H., Noguchi, R., & Ahamed, T. (2023a). Introducing a Novel Rice Husk Combustion Technology for Maximizing Energy and Amorphous Silica Production Using a Prototype Hybrid Rice Husk Burner to Minimize Environmental Impacts and Health Risk. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en16031120>
- S. Piyathissa, S. D., Kahandage, P. D., Namgay, N., Zhang, H., Noguchi, R., & Ahamed, T. (2023b). Introducing a Novel Rice Husk Combustion Technology for Maximizing Energy and Amorphous Silica Production Using a Prototype Hybrid Rice Husk Burner to Minimize Environmental Impacts and Health Risk. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en16031120>
- Si, D., Lin, Y., Xu, Q., & Zhang, S. (2025). Effects of Biochar on Rainwater Redistribution, Soil Water Evaporation and Desiccation Cracking: A Case Study of Limestone Soil in Karst Areas of Southwest China. *The Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178692>
- Singh, S. V., Chaturvedi, S., Dhyani, V., & Govindaraju, K. (2020). Pyrolysis Temperature Influences the Characteristics of Rice Straw and Husk Biochar and Sorption/Desorption Behaviour of Their Biourea Composite. *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123674>
- Su, Y., Liu, L., Zhang, S., Xu, D., Du, H., Cheng, Y., Wang, Z., & Xiong, Y. (2020). A Green Route for Pyrolysis Poly-Generation of Typical High Ash Biomass, Rice Husk: Effects on Simultaneous Production of Carbonic Oxide-Rich Syngas, Phenol-Abundant Bio-Oil, High-Adsorption Porous Carbon and Amorphous Silicon Dioxide. *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122243>
- Suleman, D., Resman, R., Syaf, H., Namriah, N., Suaib, S., Alam, S., Yusuf, D. N., & Nurmashita Mbay, W. O. (2024). Change of Soil Chemical Properties and the Growth of *Pogostemon Cablin* Benth

- on Nickel-Mined Soil Amended With Rice Husk Charcoal. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2024.112.5353>
- Tsai, C.-Y., Lin, P., Hsieh, S., Kirankumar, R., Patel, A. K., Singhania, R. R., Dong, C., Chen, C., & Hsieh, S. (2022). Engineered Mesoporous Biochar Derived From Rice Husk for Efficient Removal of Malachite Green From Wastewaters. *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126749>
- Williams, R., Belo, J. B., Lidia, J., de Soares, S. G., Ribeiro, D., Moreira, C. L., Almeida, L. de, Barton, L., & Erskine, W. (2023). Productivity Gains in Vegetables From Rice Husk Biochar Application in Nutrient-Poor Soils in Timor-Leste. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38072-2>
- Yiga, V. A., Nuwamanya, A., Birungi, A., Lubwama, M., & Lubwama, H. N. (2023). Development of Carbonized Rice Husks Briquettes: Synergy Between Emissions, Combustion, Kinetics and Thermodynamic Characteristics. *Energy Reports*. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.05.066>