

KARAKTERISASI KIMIA DAN MORFOLOGI BIOKOKAS DARI BAGLOG JAMUR DENGAN PEREKAT LIMBAH LILIN MALAM BATIK MENGGUNAKAN FTIR DAN SEM

¹Siti Azzahra Santika, ¹Adeecha Cinta Islamiah, ¹Hamim Thohari Mahfudhillah*

¹MTsN 6 Malang, Jl. Raya Sukoraharjo No.37, Kec. Kepanjen, Kab. Malang, Jawa Timur, 65163, Indonesia
E-mail: sitiazzahra7i30@gmail.com, cinchaisla@gmail.com, hamimtm@gmail.com*

Article History

Received: 30 October 2025; Received in Revision: 18 March 2026; Accepted: 20 March 2026

Abstract

The global energy crisis caused by the depletion of fossil fuels and increasing greenhouse gas emissions has accelerated the development of biomass-based renewable energy such as biocoke. This study aims to analyze the chemical and morphological characteristics of biocoke derived from mushroom baglog with batik wax waste binder using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Scanning Electron Microscope (SEM). Samples were used are raw mushroom baglog (M50%) and pyrolyzed baglog biochar (P50%), each mixed with 50% batik wax waste. The pyrolysis process was carried out at 350-400 °C for 3 hours in an oxygen-limited reactor. FTIR analysis revealed that M50% biocoke contained strong aliphatic C-H and O-H hydroxyl groups, indicating high moisture (7.55%) and volatile matter (41.75%). In contrast, P50% biocoke exhibited intensified aromatic C=C peaks (1588 cm⁻¹) and reduced O-H bands (3616 cm⁻¹), reflecting higher carbonization with 46.76% fixed carbon and a heating value of 27.31 MJ/kg. SEM micrographs showed a distinct morphological difference: M50% had a fibrous and highly porous structure, while P50% displayed a compact, homogeneous surface with micro-pores (1–10 μm). The combination of pyrolysis and batik wax waste addition produced biocoke with improved combustion stability, higher thermal efficiency, and lower exhaust emissions. In conclusion, pyrolysis significantly enhances the energy quality and structural stability of biocoke, while batik wax waste acts as an effective thermoplastic binder, improving particle homogeneity and calorific performance.

Keywords: Biocoke; Mushroom Baglog; Batik Wax Waste; Pyrolysis; FTIR; SEM; Morphological Characterization; Chemical Structure

Abstrak

Krisis energi global akibat menurunnya ketersediaan bahan bakar fosil serta meningkatnya emisi gas rumah kaca telah mendorong pengembangan energi terbarukan berbasis biomassa, salah satunya biokokas. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik kimia dan morfologi biokokas berbasis baglog jamur tiram dengan perekat limbah lilin malam batik menggunakan metode Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) dan Scanning Electron Microscope (SEM). Sampel terdiri atas dua jenis, yaitu baglog jamur mentah (M50%) dan biochar hasil pirolisis (P50%), yang masing-masing dicampur dengan 50% limbah lilin malam batik. Proses pirolisis dilakukan pada suhu 350–400 °C selama 3 jam. Hasil analisis FTIR menunjukkan bahwa biokokas M50% masih mengandung gugus C-H alifatik dan O-H hidroksil dengan intensitas tinggi, yang mengindikasikan kadar air (7,55%) dan zat volatil (41,75%) yang relatif besar. Sebaliknya, biokokas P50% menunjukkan peningkatan gugus C=C aromatik (1588 cm⁻¹) serta penurunan gugus O-H (3616 cm⁻¹), menandakan tingkat karbonisasi yang lebih tinggi, dengan Fixed Carbon mencapai 46,76% dan nilai kalor 27,31 MJ/kg. Citra SEM memperlihatkan perbedaan morfologi yang signifikan, di mana biokokas M50% memiliki struktur berserat dan pori besar, sedangkan P50% lebih padat, homogen, dan didominasi pori mikro berukuran 1–10 μm. Kombinasi pirolisis dan penambahan lilin malam batik menghasilkan biokokas dengan stabilitas pembakaran yang lebih baik, efisiensi termal tinggi, serta emisi gas buang yang lebih rendah.

Keyword: Biokokas; Baglog Jamur; Limbah Lilin Malam Batik; Pirolisis; FTIR; SEM; Karakterisasi Morfologi; Struktur Kimia

1. Introduction

Krisis energi global akibat menurunnya ketersediaan bahan bakar fosil dan meningkatnya emisi gas rumah kaca telah mendorong pengembangan sumber energi terbarukan berbasis biomassa. Biomassa merupakan sumber energi yang melimpah, terbarukan, dan berpotensi besar dalam

mendukung agenda dekarbonisasi nasional (Haqiqi, 2023). Salah satu bentuk energi padat hasil konversi biomassa yang memiliki nilai kalor tinggi adalah biokokas (*biocoke*), yaitu bahan bakar padat yang dihasilkan melalui proses pemadatan (densifikasi) dan karbonisasi biomassa sehingga memiliki karakteristik serupa dengan kokas batu bara namun bersifat lebih ramah lingkungan (Yustanti et al., 2021).

Melihat keunggulan tersebut, Indonesia memiliki potensi besar untuk produksi biokokas, terutama melalui pemanfaatan limbah agroindustri yang melimpah (Mukminah et al., 2019). Salah satu limbah biomassa yang berpotensi adalah baglog jamur tiram (*Pleurotus ostreatus*), yaitu media tanam berbasis serbuk kayu, dedak, dan kapur yang menjadi limbah setelah masa panen berakhir. Limbah baglog jamur masih mengandung lignoselulosa (selulosa, hemiselulosa, dan lignin) dalam proporsi tinggi, sehingga berpotensi menjadi bahan bakar padat dengan kandungan karbon tetap yang signifikan (Tranggono et al., 2021). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa limbah baglog dapat diolah menjadi briket biomassa dengan nilai kalor yang cukup tinggi dan emisi rendah (Puspitawati et al., 2023). Namun, penggunaan langsung baglog mentah sering kali menghasilkan produk yang rapuh dan tidak homogen karena kadar air tinggi dan ikatan partikel yang lemah.

Untuk meningkatkan kualitas biokokas, diperlukan bahan perekat (*binder*) yang mampu memperkuat ikatan antarpartikel dan sekaligus berkontribusi terhadap peningkatan nilai kalor (Glah et al., 2024). Mekanisme penguatan ini terjadi melalui kombinasi interaksi fisik dan kimia antarpartikel. Secara fisik, bahan perekat yang bersifat termoplastik akan melebur saat pemanasan, kemudian mengalir dan mengisi pori-pori serta celah antarpartikel biomassa, sehingga membentuk jembatan padat (*solid bridge*) setelah pendinginan yang meningkatkan kekuatan mekanik biokokas (Jannah, 2018). Selain itu, gaya adhesi dan kohesi, termasuk gaya van der Waals, turut memperkuat kontak antarpermukaan partikel. Secara kimia, interaksi antara komponen perekat dan gugus fungsional biomassa, seperti gugus hidroksil (-OH), dapat meningkatkan afinitas antarpartikel. Salah satu alternatif bahan pengikat yang potensial adalah limbah lilin malam batik, yang banyak dihasilkan oleh industri batik tradisional di Indonesia. Limbah ini mengandung parafin, hidrokarbon jenuh, dan resin yang bersifat termoplastik (Rahmad et al., 2023). Ketika dipanaskan, lilin malam dapat melebur dan melapisi permukaan partikel biomassa, memperkuat ikatan melalui mekanisme pengisian pori dan pembentukan lapisan hidrofobik yang stabil. Selain meningkatkan kekompakan struktur, kandungan hidrokarbonnya juga menambah fraksi karbon tetap yang berkontribusi terhadap nilai kalor tinggi. Pemanfaatan limbah lilin malam batik sebagai binder tidak hanya meningkatkan efisiensi energi produk biokokas, tetapi juga berperan dalam pengelolaan limbah industri batik yang selama ini berpotensi mencemari lingkungan.

Beberapa penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa proses pirolisis mampu meningkatkan kadar karbon tetap, menurunkan kadar air dan volatil, serta memperbaiki kestabilan termal biomassa (Wardani et al., 2024). Namun, penelitian yang mengkaji secara spesifik pengaruh pirolisis dan penambahan limbah lilin malam batik terhadap struktur kimia (gugus fungsi) dan morfologi biokokas dari baglog jamur masih sangat terbatas. Gugus fungsi yang umumnya terdapat pada biomassa lignoselulosa seperti baglog jamur meliputi gugus hidroksil (-OH) yang berasal dari selulosa dan hemiselulosa, gugus karbonil (C=O) dan karboksil (-COOH) yang berkaitan dengan hemiselulosa dan produk oksidasi, serta gugus aromatik C=C yang merupakan karakteristik utama lignin (Sapitri, 2021). Selain itu, setelah proses pirolisis, dapat terbentuk gugus fungsi baru seperti gugus alifatik C-H dan peningkatan struktur aromatik terkonjugasi akibat proses dekomposisi termal. Sementara itu, penambahan limbah lilin malam batik yang kaya akan hidrokarbon jenuh juga berkontribusi terhadap keberadaan gugus C-H alifatik yang dominan. Padahal, karakterisasi struktur kimia dan morfologi sangat penting untuk memahami hubungan antara komposisi bahan, sifat fisis, dan performa pembakaran biokokas.

Dalam konteks tersebut, analisis Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) digunakan untuk mengidentifikasi perubahan gugus fungsi utama seperti C-H, C=C, C=O, dan O-H yang menunjukkan proses dehidrasi, dekarboksilasi, dan aromatisasi selama karbonisasi (Rofidah et al., 2023). Sementara itu, pengamatan menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM) memberikan gambaran detail mengenai perubahan struktur mikro, distribusi pori, dan homogenitas permukaan akibat pengaruh pirolisis dan penambahan lilin (Joni et al., 2025). Kombinasi kedua teknik analisis ini memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai struktur kimia dan fisik biokokas yang terbentuk. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik kimia dan morfologi permukaan biokokas berbasis baglog jamur yang dibuat dengan perekat limbah lilin malam batik menggunakan metode FTIR dan SEM. Secara khusus, penelitian ini membandingkan dua jenis biokokas, yaitu dari baglog mentah dan biochar hasil pirolisis, guna mengetahui perbedaan struktur kimia, morfologi, serta implikasinya terhadap kualitas energi dan performa pembakaran.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan bahan bakar padat alternatif berbasis limbah, serta mendukung upaya pemanfaatan limbah agroindustri dan industri batik secara berkelanjutan.

2. Metode Penelitian

2.1. Alat dan Bahan Penelitian

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas Baglog jamur tiram (*Pleurotus ostreatus*) bekas media tanam yang diperoleh dari sentra budidaya jamur di Kecamatan Pakisaji, Kabupaten Malang.

Baglog dipilih karena memiliki kandungan lignoselulosa yang tinggi serta kadar abu rendah, sehingga potensial sebagai bahan dasar biokokas. Limbah lilin malam batik yang berasal dari pengrajin batik di Desa Sengguruh, Kab. Malang. Limbah ini mengandung senyawa parafin, asam lemak, dan resin yang berfungsi sebagai bahan perekat (binder) sekaligus sumber karbon tambahan.

2.2. Pembuatan Biochar dan Bahan Campuran

Penelitian ini menggunakan dua jenis bahan dasar biokokas, yaitu baglog mentah (varian M) dan biochar baglog jamur (varian P). Baglog mentah digunakan setelah dikeringkan hingga kadar air $\pm 10\%$. Biochar diperoleh melalui pirolisis tertutup pada suhu 350–400 °C selama 3 jam tanpa suplai udara untuk menghasilkan karbon padat dengan struktur aromatik stabil. Hasil pirolisis dihaluskan dan diayak hingga ukuran partikel seragam. Limbah lilin malam batik dicairkan pada suhu ± 90 °C, kemudian dicampurkan dengan biomassa dengan perbandingan massa 1:1 (50%) hingga homogen. Campuran selanjutnya dicetak dalam bentuk silinder (diameter 3,2 cm; tinggi 12 cm) dan dikompaksi dengan tekanan ± 20 ton metrik. Biokokas yang dihasilkan dikeringkan pada suhu ruang hingga mencapai kondisi stabil sebelum dilakukan pengujian.

2.3. Variasi Sampel

Dua jenis sampel biokokas yang dihasilkan adalah biokokas M50% yang terbuat dari baglog jamur mentah + 50% limbah lilin malam batik dan biokokas P50% yang terbuat dari *biochar* baglog jamur + 50% limbah lilin malam batik. Kedua sampel dianalisis dan dibandingkan berdasarkan karakteristik kimia, fisik, dan morfologi permukaannya.

2.4. Analisis Fourier Transform Infrared (FTIR)

Analisis FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) dilakukan menggunakan spektrometer Shimadzu di Laboratorium Terpadu, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Brawijaya. Data spektrum FTIR digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi utama seperti O–H (3340 cm^{-1}), C–H alifatik (2915 cm^{-1} dan 2858 cm^{-1}), C=O ($1730\text{--}1620\text{ cm}^{-1}$), C=C aromatik (1600 cm^{-1}), serta C–O ($1000\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$). Menentukan perubahan kimia akibat pirolisis dan interaksi lilin malam dengan matriks karbon biomassa.

2.5. Analisis Scanning Electron Microscope (SEM)

Karakterisasi morfologi permukaan dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM) HITACHI di Laboratorium Biologi Universitas Muhammadiyah Malang dengan mode BSE-COMPO (Backscattered Electron-Composition Mode). Parameter pengamatan yang digunakan meliputi tegangan percepatan (accelerating voltage) 15 kV, working distance (WD): 8–10 mm, dan perbesaran: 500 \times , 1000 \times , 1800 \times dan 2000 \times . Citra hasil pengamatan dianalisis untuk melihat struktur pori, homogenitas partikel, dan interaksi lilin malam dengan matriks karbon. Perbedaan morfologi antara biokokas M50% dan P50% digunakan untuk menjelaskan pengaruh pirolisis terhadap pembentukan pori, kerapatan partikel, dan sifat mekanik.

2.6. Analisis Pendukung

Selain karakterisasi FTIR dan SEM, pengujian sifat fisik dasar biokokas dilakukan untuk memperkuat hasil interpretasi, meliputi kadar air, kadar abu, volatile matter, fixed carbon, nilai kalor menggunakan bomb kalorimeter Parr-6400 Calorimeter di Laboratorium Kimia Terapan Politeknik Negeri Malang sedangkan kekuatan mekanik meliputi ketahanan tekan dan kekuatan tarikan diuji di Laboratorium Struktur dan Bahan Konstruksi Teknik Sipil, Universitas Brawijaya. Data hasil uji

digunakan untuk mengkorelasikan hasil karakterisasi kimia–morfologi dengan performa energi biokokas.

2.7. Analisis Data

Analisis data dilakukan secara deskriptif–komparatif, dengan membandingkan hasil FTIR dan SEM antara dua varian biokokas (M50% dan P50%). Perubahan gugus fungsi kimia diinterpretasikan terhadap tingkat karbonisasi dan interaksi lilin malam, sedangkan hasil SEM digunakan untuk mendeskripsikan perbedaan struktur mikro yang berkaitan dengan kerapatan dan porositas. Keterkaitan hasil karakterisasi dengan nilai kalor, kekuatan mekanik, dan efisiensi pembakaran dibahas pada bagian hasil dan pembahasan untuk memperoleh pemahaman komprehensif mengenai kualitas biokokas yang dihasilkan.

3. Result and Discussion

3.1. Hasil uji karakteristik fisik dan kimiawi biokokas

Pengujian karakteristik fisik dan kimiawi biokokas mencakup penentuan kadar abu, fixed carbon, kadar air, volatile matter, densitas, ketahanan tekan, dan ketahanan tarik. Hasil pengujian karakteristik fisik dan kimiawi biokokas dapat dilihat pada Tabel 1 .

Tabel 1. Hasil uji karakteristik fisik dan kimiawi biokokas

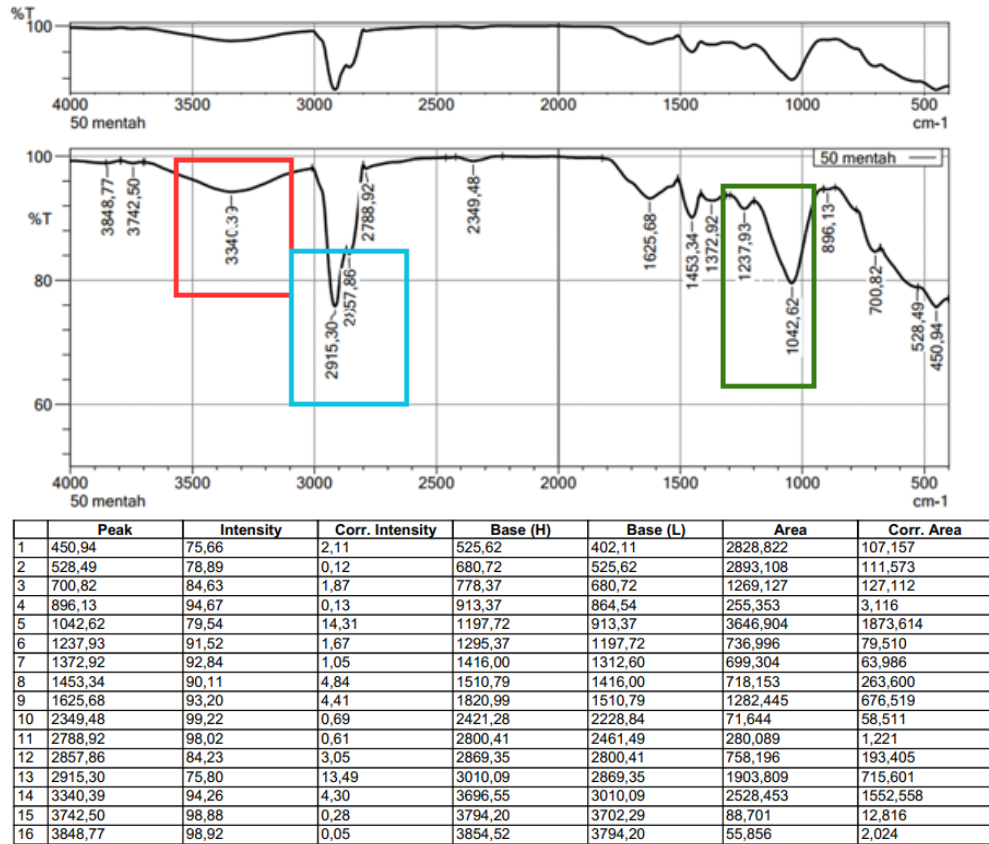
Parameter Biokokas	M50%	P50%
Nilai Kalor (MJ/kg)	26,57	27,31
Kadar abu (%)	7,9	24,88
Fixed carbon (%)	42,8	46,76
Kadar air (%)	7,55	1,85
Volatile matter (%)	41,75	26,5
Densitas (g/cm ³)	0,92	0,9
Ketahanan tekan (kg)	182,73	88,25
Ketahanan tarik (kg)	1,65	0.3
Waktu penyalaan (detik)	14,83	7,05
Emisi CO ₂ (%)	0.2	0.6
Kadar O ₂ (%)	20.51	20.35
Emisi NO _x (%)	A 0.0	A 0.0
Emisi CO (%)	0.00	0.00
Emisi HC (ppm)	0	0
Lambda	2.000	2.000
Asap	+	+
Bau	+	+
Struktur morfologi (SEM)	Berserat,	Padat,

3.2. Analisis FTIR

Analisis FTIR menguatkan hasil uji karakteristik biokokas variasi M50%, menyoroti peran dominan lilin malam batik sebagai sumber energi dan pengikat. Puncak regangan C–H alifatik yang sangat kuat (2915 cm⁻¹ dan 2858 cm⁻¹) membuktikan tingginya fraksi hidrokarbon jenuh dari lilin. Kandungan ini secara signifikan meningkatkan Nilai Kalor (6.349,33 cal/g). Keberadaan ikatan C=C aromatik (1626 cm⁻¹) dari lignin menjelaskan proporsi Fixed Carbon yang cukup tinggi (42,8%). Sebaliknya, tingginya Volatile Matter (41,75%) disebabkan oleh banyaknya gugus C–O (1043 cm⁻¹) dan O–H (3340 cm⁻¹) dari senyawa teroksidasi dan polisakarida. Pita lebar 3340 cm⁻¹ juga memvalidasi kadar air (7,55%).

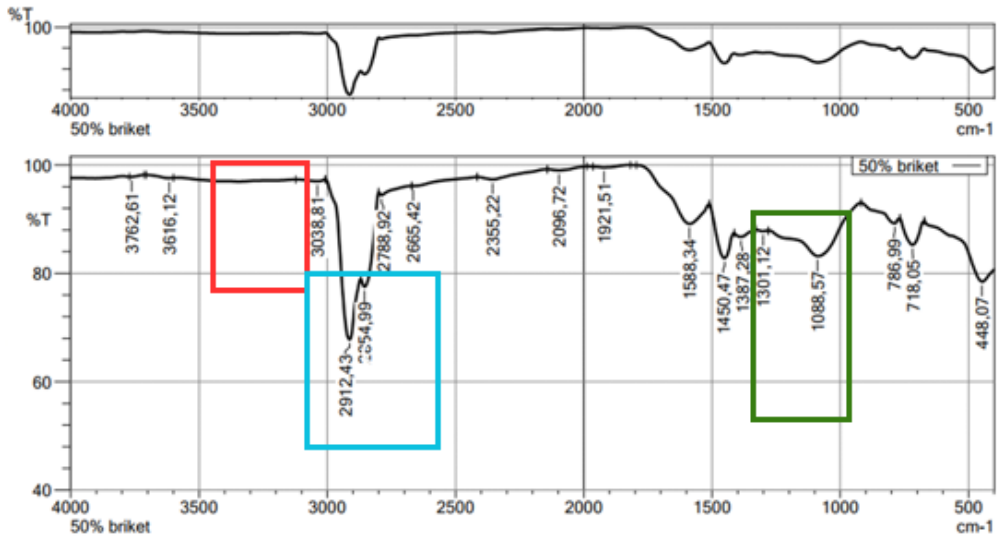
Puncak alifatik yang kuat juga menjelaskan tingginya Kekuatan Mekanik dan Densitas (0,92 g/cm³), karena gugus CH₂\CH₃ pada lilin bertindak sebagai agen adhesi yang efektif (Asyri et al., 2015). Komposisi kimia ini mendukung pembakaran yang relatif bersih, menghasilkan emisi CO₂ yang

rendah (0,2%), CO, dan NO_x (0%). Adapun grafik hasil uji FTIR biokokas variasi M50% dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Hasil uji FTIR biokokas variasi M50%

Analisis FTIR pada biokokas variasi P50% mengonfirmasi perubahan struktur signifikan pasca pirolisis baglog jamur. Spektrum menunjukkan peningkatan signifikan pada struktur aromatik/terkonjugasi (1588 cm^{-1}), ciri khas Fixed Carbon yang tinggi (46,76%) yang dihasilkan dari pirolisis. Sebaliknya, Volatile Matter (26,5%) dan Kadar Air (1,85%) sangat rendah, didukung oleh hilangnya gugus teroksigenasi dan pita O-H yang sangat kecil (3616 cm^{-1}) dari biochar. Meskipun lilin ditambahkan setelah pirolisis, sisa hidrokarbon alifatik dari lilin ditunjukkan oleh puncak 2912 cm^{-1} dan 2854 cm^{-1} . Keberadaan alifatik ini menaikkan rasio H/C, menghasilkan Nilai Kalor yang Tinggi ($6.528,31\text{ cal/g}$). Peningkatan Kadar Abu (24,88%) didukung oleh penguatan pita 448 cm^{-1} (mineral/anorganik). Adapun grafik hasil uji FTIR biokokas variasi P50% dapat dilihat pada Gambar 2.



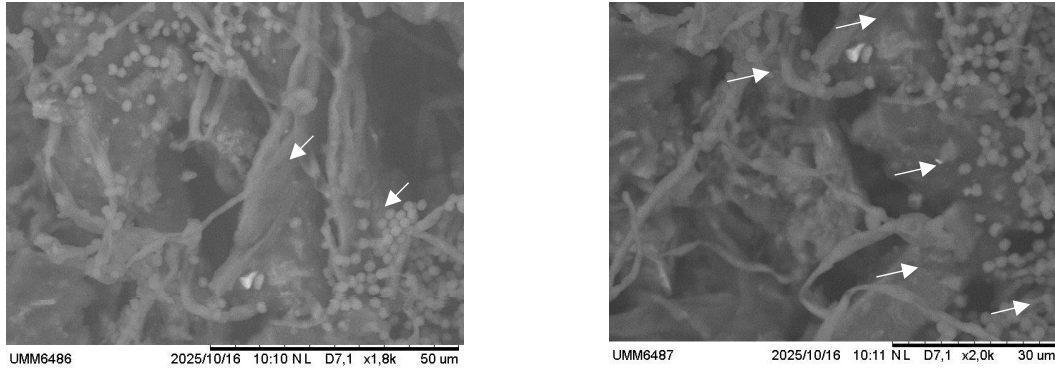
	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area
1	448,07	78,47	3,83	672,10	399,24	4188,361	146,401
2	718,05	85,26	4,65	766,88	672,10	1215,112	259,030
3	786,99	89,24	1,28	919,11	766,88	1363,512	84,700
4	1088,57	83,17	7,47	1281,01	919,11	4736,167	1287,791
5	1301,12	87,79	0,20	1329,84	1281,01	591,715	6,384
6	1387,28	86,75	0,92	1413,13	1329,84	1059,425	43,318
7	1450,47	82,80	6,70	1510,79	1413,13	1340,612	376,212
8	1588,34	89,13	5,62	1795,14	1510,79	1698,151	666,916
9	1921,51	99,54	0,25	1964,60	1818,11	40,004	17,927
10	2096,72	99,00	0,37	2142,68	1987,58	110,404	29,407
11	2355,22	97,33	0,77	2415,54	2142,68	498,591	88,723
12	2665,42	96,12	0,04	2671,16	2415,54	758,027	-20,456
13	2788,92	94,43	0,64	2800,41	2671,16	588,119	12,674
14	2854,99	77,52	4,79	2869,35	2800,41	1178,040	279,914
15	2912,43	67,79	16,93	3007,21	2869,35	2524,102	892,124
16	3038,81	97,02	0,32	3122,10	3007,21	326,191	20,003
17	3616,12	97,57	0,16	3705,16	3598,89	229,927	7,476
18	3762,61	97,80	0,07	3771,22	3713,78	116,960	2,150

Gambar 2. Hasil Uji FTIR biokokas variasi P50%

3.3. Analisis Pengamatan Permukaan (SEM)

Adapun hasil pengamatan SEM biokokas variasi M50% dapat dilihat pada Gambar 3.

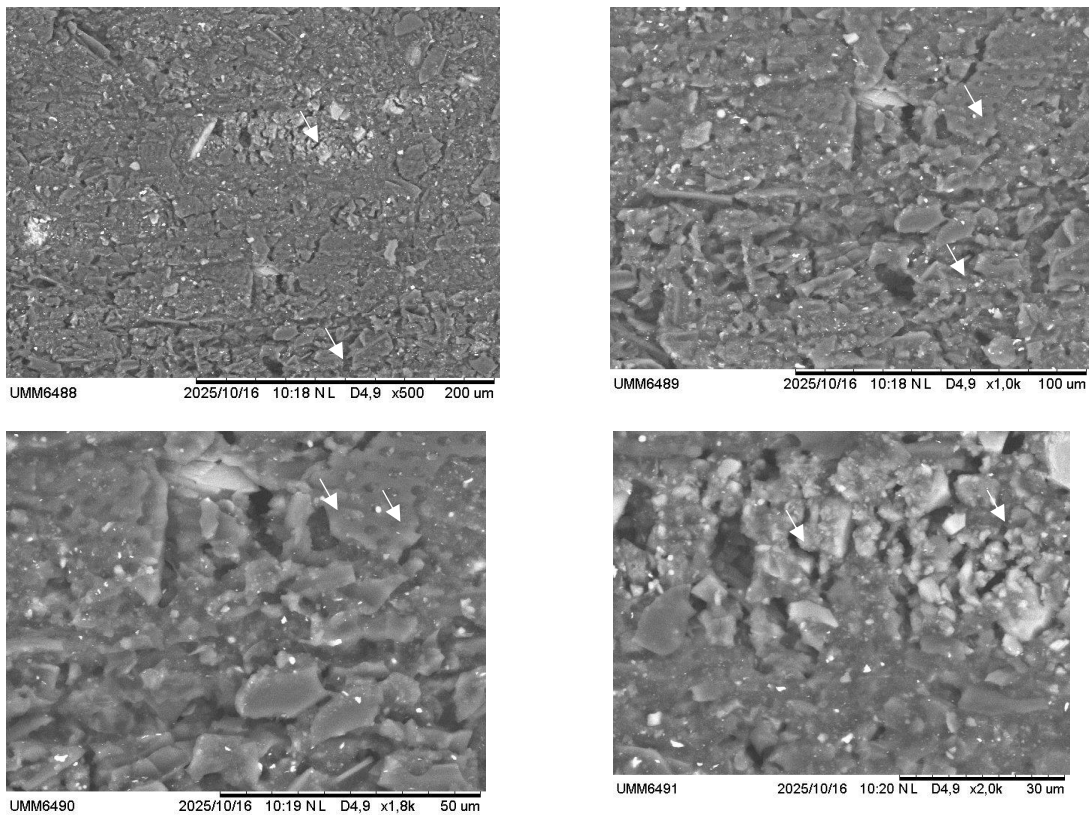




Gambar 3. Hasil pengamatan SEM biokokas variasi M50%

Analisis Scanning Electron Microscope (SEM) terhadap biokokas dari baglog jamur mentah dengan 50% lilin malam batik menunjukkan morfologi yang berserat, sangat berpori, dan tidak homogen. Struktur permukaan masih mempertahankan bentuk alami jaringan lignoselulosa (serat memanjang), mengindikasikan bahwa proses karbonisasi belum terjadi. Ini berarti sebagian besar komponen organik (selulosa, hemiselulosa, lignin) masih utuh. Biokokas menampilkan porositas tinggi dengan rongga makro yang saling terhubung (ukuran pori 10–150 µm). Struktur yang longgar dan terbuka ini berdampak pada sifat fisik dan termal: ikatan antarpartikel lemah, menyebabkan kekuatan mekanik yang rendah dan mudah pecah saat penanganan. Di sisi lain, porositas tinggi mempermudah penyalaan karena difusi oksigen cepat, namun menghasilkan pembakaran yang singkat dan kurang efisien (Sudiro & Sugiyanto, 2014). Distribusi lilin malam batik tidak merata. Lilin tampak menutupi permukaan luar atau menggumpal sebagai butiran (1–5 µm) tetapi tidak meresap ke dalam pori-pori internal. Ini menunjukkan bahwa lilin lebih berfungsi sebagai pengikat eksternal daripada perekat internal.

Adapun hasil pengamatan SEM biokokas variasi P50% dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil pengamatan SEM biokokas variasi P50%

Analisis Scanning Electron Microscope (SEM) pada biokokas berbahan biochar hasil pirolisis baglog jamur dengan penambahan 50% lilin malam batik (P50%) menunjukkan struktur yang lebih padat, homogen, dan kompak dibandingkan varian berbahan mentah. Dalam konteks ini, kekompakan mengacu pada tingkat kerapatan susunan partikel yang tinggi, ditandai dengan minimnya celah antarpartikel, rendahnya porositas terbuka, serta terbentuknya kontak antarmuka yang kuat dan kontinu antarpartikel (Setianingsih, 2018). Proses pirolisis telah mengubah jaringan lignoselulosa alami menjadi fase karbon padat (amorf) (Darmawan, 2015). Pada semua perbesaran, permukaan biokokas terlihat padat dan menyatu. Lilin malam batik berperan sebagai binder termoplastik yang efektif, menyelimuti partikel biochar dan mengisi celah mikro, menghasilkan struktur dengan porositas rendah (pori mikro 1–10 μm). Citra BSE mengonfirmasi penyebaran lilin yang relatif merata di permukaan partikel karbon, sehingga membentuk matriks karbon kontinu yang homogen. Struktur yang lebih kompak ini berkorelasi dengan efisiensi pembakaran yang tinggi. Porositas yang rendah menghambat difusi oksigen, menyebabkan pembakaran lebih lambat, stabil, dan terkendali. Biokokas P50% menunjukkan nilai kalor tinggi (27,31 MJ/kg) dan emisi gas buang sangat rendah. Meskipun kekuatan mekanik (tekan/tarik) menurun karena sifat biochar yang rapuh, kerapatan struktur dan kontinuitas matriks tetap memberikan stabilitas bentuk serta ketahanan panas yang lebih baik.

3.4. Analisis Komparatif Karakteristik Biokokas M50% dan P50%

Hasil karakterisasi menunjukkan perbedaan signifikan antara biokokas M50% (baglog mentah + 50% lilin malam batik) dan P50% (biochar hasil pirolisis + 50% lilin malam batik) dalam sifat fisik, kimia, dan performa termal. Perbandingan parameter utama dapat dilihat kembali pada Tabel 1. Berdasarkan Tabel 1, biokokas P50% menunjukkan peningkatan nilai kalor dan kandungan karbon tetap, serta penurunan kadar volatil dibandingkan M50%, yang mengindikasikan struktur karbon lebih stabil akibat proses pirolisis. Hal ini berdampak pada efisiensi pembakaran yang lebih baik dan lebih stabil. Sebaliknya, M50% memiliki kadar air dan volatil lebih tinggi, sehingga mudah menyala namun menghasilkan pembakaran yang lebih cepat dan kurang stabil.

Dari sisi mekanik, M50% memiliki kekuatan tekan dan tarik lebih tinggi karena struktur biomassa yang masih berserat, sedangkan P50% cenderung lebih rapuh akibat proses karbonisasi. Namun demikian, struktur P50% yang lebih padat dan homogen (berdasarkan SEM) mendukung distribusi panas yang merata dan pembakaran yang lebih sempurna, sebagaimana ditunjukkan oleh emisi CO₂ yang sedikit lebih tinggi. Meskipun kadar abu P50% lebih tinggi akibat akumulasi mineral anorganik pasca-pirolisis, material ini menunjukkan stabilitas termal yang lebih baik dibandingkan M50%.

4. Conclusion

Penelitian ini menunjukkan bahwa bahan dasar dan proses pirolisis memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik kimia dan morfologi biokokas berbasis baglog jamur dengan perekat limbah lilin malam batik. Analisis FTIR menunjukkan bahwa biokokas M50% (baglog mentah + 50% lilin) masih didominasi oleh gugus C–H alifatik (2915 cm^{-1}) dan O–H hidroksil (3340 cm^{-1}) menandakan tingginya komponen teroksigenasi serta volatil. Sebaliknya, biokokas P50% (biochar hasil pirolisis + 50% lilin) menunjukkan peningkatan intensitas gugus C=C aromatik (1600 cm^{-1}) dan penurunan gugus O–H (3340 cm^{-1}), yang menandakan peningkatan tingkat aromatisasi karbon dan kestabilan termal. Citra SEM memperlihatkan perbedaan morfologi yang jelas: biokokas M50% memiliki struktur berserat, berpori besar (10–150 μm), dan tidak homogen, sedangkan biokokas P50% memiliki permukaan padat, homogen, dan berpori mikro (1–10 μm). Struktur kompak pada P50% dihasilkan oleh interaksi termoplastik lilin malam batik yang mengisi celah antarpartikel karbon. Secara performa, biokokas P50% memiliki nilai kalor lebih tinggi (27,31 MJ/kg), kadar air (1,85%) dan volatil lebih rendah (26,5%), serta pembakaran lebih stabil dibanding M50%. Sebaliknya, M50% memiliki kekuatan mekanik lebih tinggi (182,73 kg) namun efisiensi termalnya lebih rendah (26,57 MJ/Kg). Kesimpulan bahwa proses pirolisis meningkatkan kualitas energi dan kestabilan struktur biokokas, sedangkan penambahan limbah lilin malam batik berperan sebagai binder efektif yang memperbaiki homogenitas dan nilai kalor produk akhir.

References

Asyri, F., Hafni, K. N., & Simamora, A. H. (2015). Pengaruh limbah abu pembakaran biomassa kelapa sawit terhadap sifat-sifat fisika dan mekanik high impact polystyrene. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 4(3), 23–28.

- Darmawan, S. (2015). *Karbon nanoporous dari biomasa hutan melalui proses karbonisasi bertingkat: Pirolisis, hidrotermal dan aktivasi*.
- Glalah, M., Antwi-Boasiako, C., & Adu-Gyamfi, D. (2024). Binder-type effect on the physico-mechanical, combustion and emission properties of *Alstonia boonei* De Wild. Sawdust and *Theobroma cacao* L. pod biochar briquettes for energy applications. *PLOS ONE*, 19(7), e0306827. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306827>
- Haqiqi, A. Z. (2023). Penggunaan biomassa sebagai energi alternatif pembangkit listrik di wilayah pedesaan. *Journal of Optimization System and Ergonomy Implementation*, 1(1), 42–51.
- Jannah, R. (2018). *Pengaruh jenis perekat terhadap nilai kalor briket arang tempurung kawista (Limonia acidissima) teraktivasi NaOH* [PhD Thesis]. Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim.
- Joni, R., Rokim, M., Asrori, I., Rahman, A., & others. (2025). Analisis Mikrostruktur Permukaan Karbon Aktif Yang Diaktivasi Dengan Hidroksi Alkali Menggunakan Scanning Electron Microscopy. *Jurnal Kimia Dan Ilmu Lingkungan: Chemviro*, 3(2), 228–233.
- Mukminah, N., Destiana, I. D., endah Rahayu, W., & Sobari, E. (2019). Inovasi teknologi pakan komplit (complete feed) sapi potong berbasis limbah agroindustri di Kabupaten Subang. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat (MEDITEG)*, 4(1), 33–42.
- Puspitawati, I. N., Wahyusi, K. N., Santi, S. S., Ijeise, S., Saputro, E. A., & Karaman, N. (2023). Characteristics Biobriquettes from Mushroom Baglog Waste Carbonization Production. *International Journal of Eco-Innovation in Science and Engineering*, 4(1). <https://doi.org/10.33005/ijeise.v4i1.112>
- Rahmad, D., Herliansyah, M. K., Sudiarmo, A., & Haerudin, A. (2023). Optimasi Komposisi Malam Batik Tulis dari Bahan Daur Ulang dengan Menggunakan Metode Taguchi. *Prosiding Seminar Nasional Waluyo Jatmiko*, 91–100.
- Rofidah, H., Ramadhani, T. A., Salsabila, I. E., Fq, S. S. A. A. L., & Almayda, N. (2023). *Identifikasi Komposisi dan Uji Kualitas Briket Arang Komersial*.
- Sapitri, R. (2021). *Ekstraksi Dan Karakterisasi Selulosa Dari Kulit Buah Aren (Arenga pinnata) Untuk Penyerapan Ion Logam Cr (VI)* [PhD Thesis]. Universitas Jambi.
- Setianingsih, T. (2018). *Karakterisasi Pori dan Luas Muka Padatan*. Universitas Brawijaya Press.
- Sudiro, S. S., & Sugiyanto, D. (2014). Pengaruh komposisi dan ukuran serbuk briket yang terbuat dari batubara dan jerami padi terhadap karakteristik pembakaran. *Jurnal Sainstech Politeknik Indonusa Surakarta*, 2(2), 1–18.
- Tranggono, D., Pramitha, A. O., Sholikhah, A. M., Fandillah, G. A., Sugiharto, N. O., & Achmad, Z. A. (2021). Pemanfaatan limbah baglog jamur tiram putih menjadi briket yang bernilai ekonomis tinggi. *Jabn*, 2(1), 1–17.
- Wardani, S. J., Fahrurrozi, M., & Sulisty, H. (2024). Pengaruh Kondisi Pirolisis terhadap Penurunan Kandungan Volatile Matter pada Batubara Kualitas Rendah. *Jurnal Sosial Teknologi*, 4(8), 537–545.
- Yustanti, E., Wardhono, E. Y., Mursito, A. T., & Alhamidi, A. (2021). Types and Composition of Biomass in Biocoke Synthesis with the Coal Blending Method. *Energies*, 14(20), 6570. <https://doi.org/10.3390/en14206570>