



Pengaruh Komposisi Limbah Malam Batik terhadap Kualitas dan Emisi Bio-Kokas dari Biochar Baglog Jamur

Siti Azzahra Santika¹, Adeecha Cinta Islamiah¹, Hamim Thohari Mahfudhillah^{1*}

¹MTsN 6 Malang

*Email: hamimtm@gmail.com

Abstract

Batik wax waste and oyster mushroom baglog waste have high potential as raw materials for biomass-based alternative energy. Batik wax waste contains carbon with a calorific value of approximately 42 MJ/kg, while mushroom baglog waste has a high lignocellulose content that functions as a natural adhesive. This study aimed to determine the effect of varying the composition of batik wax waste on the quality and emissions of pyrolyzed mushroom baglog waste-based bio-coke. Mushroom baglog waste was pyrolyzed at 350–400°C for three hours, then mixed with batik wax waste in varying concentrations of 10%, 20%, 30%, 40%, and 50%, with a total mass of 100 grams each. The pressing process was carried out using a Leybold-Heraeus Compact MDP 10-1 machine with a pressure of 2 tons. Bio-coke characterization included proximate tests (moisture content, ash content, volatile matter, and fixed carbon), calorific value using a Parr-6400 Calorimeter, and exhaust emissions using a KOENG KEG-500 Automotive Gas Analyzer. Results showed that increasing the composition of batik wax waste increased the calorific value from 20.37 MJ/kg (P10) to 27.31 MJ/kg (P50). Ash content decreased from 30.2% to 24.88%, while volatile matter increased from 16% to 26.5%. CO and HC emissions decreased significantly, approaching zero at mixtures of $\geq 20\%$. Thus, the addition of batik wax waste can improve energy efficiency and reduce pollutant emissions, making pyrolysis-derived bio-coke suitable for development as an environmentally friendly fuel to replace firewood in the small industrial sector.

Keywords: *Alternative Energy, Bio-Coke, Batik Wax Waste, Exhaust Emissions, Mushroom Baglog, Pyrolysis*

Abstrak

Limbah malam batik dan limbah baglog jamur tiram memiliki potensi tinggi sebagai bahan baku energi alternatif berbasis biomassa. Limbah malam batik mengandung karbon dengan nilai kalor mencapai ± 42 MJ/kg, sedangkan limbah baglog jamur memiliki kandungan *lignoselulosa* tinggi yang berfungsi sebagai perekat alami. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi komposisi limbah malam batik terhadap kualitas dan emisi bio-kokas berbasis limbah baglog jamur hasil pirolisis. Limbah baglog jamur dipirolisis pada suhu 350–400°C selama tiga jam, kemudian dicampur dengan limbah malam batik dalam variasi 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50% dengan total massa masing-masing 100 gram. Proses pengepresan dilakukan menggunakan mesin Leybold-Heraeus Compact MDP 10-1 dengan tekanan 2 ton. Karakterisasi bio-kokas meliputi uji proksimat (kadar air, kadar abu, volatile matter, dan fixed carbon), nilai kalor menggunakan Parr-6400 Calorimeter, serta emisi gas buang menggunakan KOENG KEG-500 Automotive Gas Analyzer. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan komposisi limbah malam batik meningkatkan nilai kalor dari 20,37 MJ/kg (P10) menjadi 27,31 MJ/kg (P50). Kadar abu menurun dari 30,2% menjadi 24,88%, sedangkan volatile matter meningkat dari 16% menjadi 26,5%. Emisi CO dan HC menurun signifikan, mendekati nol pada campuran $\geq 20\%$. Dengan demikian, penambahan limbah malam batik mampu meningkatkan efisiensi energi dan menurunkan emisi polutan, sehingga *bio-kokas* hasil *pirolisis* layak dikembangkan sebagai bahan bakar ramah lingkungan pengganti kayu bakar untuk sektor industri kecil.

Kata Kunci: Bio-Kokas, Pirolisis, Limbah Malam Batik, Baglog Jamur, Emisi Gas Buang, Energi Alternatif



1. Pendahuluan

Industri batik merupakan salah satu sektor ekonomi kreatif unggulan di Indonesia yang tidak hanya memiliki nilai budaya tinggi, tetapi juga memberikan kontribusi ekonomi yang signifikan. Berdasarkan data Kementerian Perindustrian, terdapat sekitar 6.120 unit industri batik yang tersebar di berbagai daerah di Indonesia dengan total produksi mencapai lebih dari 500 juta meter kain per tahun [1]. Dalam proses pembuatannya, lilin malam digunakan sebagai bahan penutup motif sebelum proses pencelupan warna. Setiap meter kain batik memerlukan sekitar 1,5 ons lilin malam [2]. Namun, efisiensi penggunaannya masih rendah karena hanya sekitar 20% lilin malam yang dapat digunakan kembali, sedangkan 80% sisanya menjadi limbah padat. Secara nasional, potensi limbah malam batik dapat mencapai sekitar 17 ribu ton per tahun. Padahal, limbah ini memiliki nilai kalor tinggi (± 42 MJ/kg) dan kandungan karbon yang melimpah, sehingga sangat potensial untuk dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif [3].

Di sisi lain, sektor pertanian dan budidaya jamur tiram di Indonesia juga menghasilkan limbah *biomassa* dalam jumlah besar berupa baglog jamur bekas. *Baglog* merupakan media tanam jamur yang dibuat dari campuran serbuk kayu, dedak, dan kapur yang dikemas dalam plastik silinder. Setelah masa panen selesai, baglog umumnya dibuang begitu saja meskipun kandungan bahan organiknya masih tinggi. Produksi jamur tiram di Kabupaten Malang, misalnya, mencapai lebih dari 3.500 ton per tahun, dengan rasio limbah sekitar 2–3 kg baglog untuk setiap 1 kg jamur yang dihasilkan [4]. Artinya, hanya di wilayah Malang saja terdapat sekitar 7.000–10.500 ton limbah baglog per tahun yang berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak dimanfaatkan. Padahal, limbah baglog memiliki kandungan lignoselulosa yang tinggi sehingga dapat dijadikan bahan dasar pembuatan bahan bakar padat seperti *briket* atau *bio-kokas*.

Sementara itu, pelaku Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah (UMKM) di sektor pangan, khususnya produsen tahu, menghadapi permasalahan serius terkait kebutuhan energi termal. Proses perebusan kedelai dan penggorengan tahu membutuhkan sumber panas dalam jumlah besar dan kontinu. Mayoritas pelaku usaha masih menggunakan kayu bakar dengan nilai kalor sekitar 20 MJ/kg, yang selain menimbulkan emisi tinggi juga berkontribusi terhadap deforestasi. Sebagian lainnya beralih menggunakan LPG, namun biayanya relatif tinggi. Misalnya, satu unit UMKM tahu di Kabupaten Bondowoso dilaporkan menghabiskan lebih dari 2 ton LPG per tahun dengan biaya mencapai Rp34 juta [5]. Kondisi ini meningkatkan ongkos produksi secara signifikan, sementara harga jual tahu di pasaran relatif stabil. Oleh karena itu, pengembangan sumber energi alternatif yang lebih murah dan ramah lingkungan sangat diperlukan untuk mendukung keberlanjutan usaha kecil.

Salah satu alternatif bahan bakar padat yang potensial dikembangkan adalah *bio-kokas*. *Bio-kokas* merupakan bahan bakar padat berkarbon tinggi yang diperoleh dari proses pirolisis *biomassa*. Dibandingkan dengan *briket biomassa konvensional*, *bio-kokas* memiliki nilai kalor lebih tinggi, kadar air lebih rendah, dan stabilitas pembakaran lebih baik. Proses pirolisis yakni pemanasan bahan organik tanpa oksigen pada suhu 300–600°C mampu mengubah *biomassa* menjadi padatan berkarbon (*char*), gas *pirolitik*, dan cairan *bio-oil* [6]. Padatan *char* ini memiliki struktur karbon teraromatisasi dengan porositas tinggi yang membuatnya cocok sebagai bahan bakar padat berenergi tinggi.

Pemanfaatan limbah malam batik sebagai bahan campuran dalam pembuatan *bio-kokas* dapat meningkatkan nilai kalor sekaligus berperan sebagai binder alami karena sifat termoplastiknya. Sementara limbah baglog jamur berfungsi sebagai sumber karbon dan bahan pengisi (*filler*) *biomassa*. Kombinasi kedua bahan ini diharapkan dapat menghasilkan *bio-kokas* dengan kualitas termal dan emisi yang lebih baik dibandingkan bahan tunggal. Selain itu, pendekatan ini sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular, yakni mengubah limbah industri menjadi produk bernilai guna tinggi yang dapat kembali mendukung kegiatan ekonomi masyarakat.

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji pemanfaatan limbah *biomassa* sebagai bahan bakar padat. Glalah melaporkan bahwa penambahan lilin malam batik dalam pembuatan *briket serbuk kayu* mampu meningkatkan nilai kalor hingga 30% [7]. Sementara penelitian oleh Yanti menunjukkan bahwa proses *pirolisis* pada limbah pertanian mampu menurunkan kadar air dan abu, serta meningkatkan kandungan karbon tetap (*fixed carbon*) [8]. Namun, kajian yang menggabungkan limbah malam batik



dan *baglog* jamur hasil *pirolisis* sebagai bahan penyusun *bio-kokas* masih sangat terbatas, khususnya yang berfokus pada karakteristik emisi gas buang dan kualitas bahan bakar yang dihasilkan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi komposisi limbah malam batik terhadap kualitas dan emisi *bio-kokas* berbasis *biochar* limbah *baglog* jamur. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi energi alternatif ramah lingkungan sekaligus mengurangi timbunan limbah padat dari industri batik dan pertanian. Hasil penelitian ini juga dapat menjadi dasar dalam penerapan bahan bakar *bio-kokas* sebagai pengganti kayu bakar pada skala rumah tangga dan industri kecil di Indonesia.

2. Metode

2.1 Bahan dan Alat

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah malam batik dan limbah *baglog* jamur tiram mentah. Limbah malam batik diperoleh dari Griya Batik Sengguruh (Batik Seng), Kabupaten Malang. Limbah *baglog* jamur diperoleh dari sentra budidaya jamur tiram di Kecamatan Pakisaji, Kabupaten Malang. Limbah malam batik digunakan sebagai bahan pengikat (*binder*) sekaligus penambah karbon, sedangkan limbah *baglog* jamur berfungsi sebagai sumber *biomassa*. Variasi komposisi limbah malam batik yang digunakan adalah 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50% dari total massa 100 gram untuk setiap sampel. Variasi tersebut disebut sebagai P-10, P-20, P-30, P-40, dan P-50.

Peralatan yang digunakan meliputi timbangan digital GSF kapasitas 10 kg, pengaduk kayu, wadah mika *ThinWall* berkapasitas 1 liter, cetakan stainless steel silindris (diameter 3,2 cm; tinggi 12 cm), mesin *press Leybold-Heraeus Compact MDP 10-1*, *Parr-6400 Calorimeter*, *KOENG KEG-500 Automotive Gas Analyzer*, neraca analitik, *desikator*, oven pengering, dan *furnace* untuk analisis *proksimat*.

2.2 Prosedur Penelitian

a. Persiapan Bahan

Limbah *baglog* jamur dikeringkan menggunakan sinar matahari selama empat hari hingga kadar air menurun dan tekstur menjadi rapuh. Bahan kering kemudian dihaluskan untuk memperoleh ukuran partikel yang seragam. Selanjutnya, *baglog* kering dipirolisis pada suhu 350–400°C selama 3 jam dalam reaktor pirolisis tipe tertutup hingga diperoleh arang halus (*biochar*). Sementara itu, limbah malam batik dilelehkan menggunakan wajan aluminium pada suhu $\pm 100^\circ\text{C}$.

b. Pembuatan Bio-Kokas

Campuran *bio-kokas* dibuat dengan menimbang bahan sesuai variasi komposisi malam batik (10–50%) dari total massa 100 gram. Limbah *baglog* hasil *pirolisis* (*biochar*) dicampurkan dengan malam batik cair secara merata pada wajan aluminium yang panas, kemudian diaduk hingga homogen. Campuran kemudian disimpan sementara dalam wadah mika *thinwall* kemudian dimasukkan ke dalam cetakan *stainless steel* silindris berdiameter 3,2 cm dan tinggi 12 cm. Selanjutnya, campuran tersebut dilakukan pengepresan menggunakan mesin *press Leybold-Heraeus Compact MDP 10-1* dengan tekanan sebesar 2 ton metrik (± 20 kN). Setelah pengepresan, *bio-kokas* dilepaskan dari cetakan dan dikeringkan pada suhu ruang selama 24 jam di tempat kering sebelum dilakukan pengujian.



Gambar 1.

Proses pencetakan *biokokas* menggunakan mesin press *Leybold-Heraeus Compact MDP 10-1* dengan tekanan sebesar 2-ton metrik (± 20 kN).

c. Uji Kualitas Bio-Kokas

Karakteristik *bio-kokas* dianalisis berdasarkan tiga jenis pengujian utama, yaitu uji proksimat, uji nilai kalor, dan uji emisi gas buang.

1) *Uji Proksimat*

Uji proksimat dilakukan di Laboratorium Kimia Terapan Politeknik Negeri Malang untuk menentukan kadar air, kadar abu, *volatile matter*, dan *fixed carbon*. Metode pengujian mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI) yaitu SNI 06-3730-1995: untuk pengujian kadar abu, *volatile matter*, dan *fixed carbon* dan SNI 01-1506-1989: untuk pengujian kadar air. Hasil dinyatakan dalam persen massa (% berat kering).

2) *Uji Nilai Kalor*

Uji nilai kalor dilakukan menggunakan Parr-6400 *Calorimeter* di Laboratorium Kimia Terapan Politeknik Negeri Malang. Sampel dikeringkan terlebih dahulu hingga kadar air konstan. Nilai kalor dinyatakan dalam satuan kalori per gram (kal/g), kemudian dikonversi menjadi megajoule per kilogram (MJ/kg). Pengujian dilakukan berdasarkan prinsip bom kalorimeter isoperibol dengan kontrol suhu otomatis sesuai standar ASTM D5865.



Gambar 2. Alat uji nilai kalor Parr-6400 *Calorimeter*

3) *Uji Emisi Gas Buang*

Uji emisi dilakukan di Balai Uji Emisi Dinas Perhubungan Kabupaten Malang menggunakan KOENG KEG-500 *Automotive Gas Analyzer*. Parameter yang diukur meliputi CO₂ (%), O₂ (%), NO_x



(%), CO (%), HC (ppm), dan Lambda (λ). Pengujian dilakukan pada kondisi bara api (non-flame combustion), yaitu saat nyala api padam dan hanya tersisa bara merah pada bio-kokas.



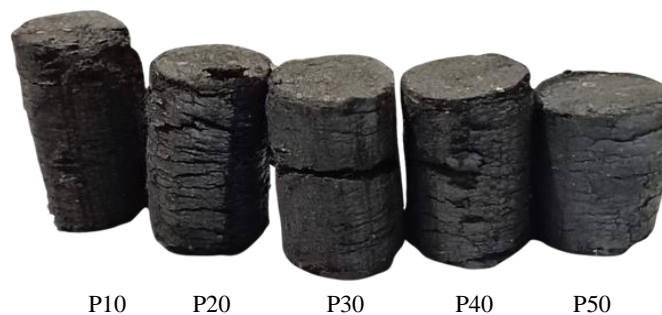
Gambar 3. KOENG KEG-500 Automotive Gas Analyzer

2.3 Analisis Data

Data hasil pengujian meliputi nilai kalor, kadar abu, kadar air, *volatile matter*, *fixed carbon*, serta emisi gas buang (CO_2 , CO, NO_x , HC, dan O_2). Semua data disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk menunjukkan kecenderungan perubahan akibat variasi komposisi malam batik. Analisis statistik deskriptif dilakukan untuk menilai hubungan antara komposisi malam batik dan parameter kualitas bio-kokas. Nilai peningkatan efisiensi energi dihitung dari rasio antara nilai kalor campuran terhadap nilai kalor dasar. Selain itu, interpretasi hasil dibandingkan dengan hasil penelitian terdahulu untuk menilai kelayakan bio-kokas sebagai bahan bakar ramah lingkungan.

3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini telah berhasil membuat biokokas berbahan biochar hasil pirolisis limbah baglog jamur dan limbah malam lilin batik dengan variasi P10% hingga P50%. Biokokas yang dihasilkan dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4. Biokokas berbahan biochar limbah baglog jamur dan limbah malam lilin batik

Adapun hasil uji kualitas biokokas dari biochar limbah baglog jamur dan limbah malam lilin batik dapat dilihat pada **Tabel 1** berikut.



Tabel 1. Hasil uji kualitas biokokas dari biochar limbah baglog jamur dan limbah malam lilin batik

Karakter Biokokas	P-10%	P-20%	P-30%	P-40%	P-50%
Nilai kalor (kalori/gram)	4867.69	5439.03	6038.38	6222.30	6528.31
Nilai kalor (MJ/Kg)	20.37	22.76	25.27	26.03	27.31
Emisi CO ₂ (%)	1.8	0.4	0.3	0.4	0.6
Kadar O ₂ (%)	20.19	20.75	20.67	20.67	20.35
Emisi NO _X (%)	A 0.0	A 0.0	A 0.0	A 0.0	A 0.0
Emisi CO (%)	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00
Emisi HC (ppm)	523	0	0	0	0
Lambda	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Kadar abu (%)	30,2	26,25	25,46	23,25	24,88
Fixed carbon (%)	52,50	54,05	51,23	51,05	46,76
Kadar air (%)	1,29	1,45	1,45	0,95	1,85
Volatile matter (%)	16	18,24	21,85	24,75	26,5
Densitas (g/cm ³)	0,66	0,68	0,75	0,8	0,9
Ketahanan tekan (kg)	1,15	17,2	74,25	86,4	88,25
Ketahan tarik (kg)	0.00	0.00	0.1	0.21	0.3

3.1 Nilai Kalor Bio-Kokas

Nilai kalor merupakan parameter utama yang menentukan kualitas energi suatu bahan bakar padat [9]. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan komposisi limbah malam batik secara signifikan meningkatkan nilai kalor bio-kokas (**Tabel 1**). Nilai kalor terendah diperoleh pada sampel P-10 sebesar 4.867,69 kal/g (20,37 MJ/kg), sedangkan nilai tertinggi pada P-50 mencapai 6.528,31 kal/g (27,31 MJ/kg). Peningkatan nilai kalor sejalan dengan bertambahnya fraksi malam batik dalam campuran. Hal ini dikarenakan malam batik memiliki kandungan karbon dan hidrokarbon jenuh yang tinggi, dengan nilai kalor alami mencapai ± 42 MJ/kg [10]. Selama proses *pirolisis*, komponen organik dalam *baglog* mengalami dekomposisi termal dan menghasilkan padatan berkarbon (*biochar*) dengan porositas tinggi [11]. Penambahan malam batik cair kemudian berperan mengisi pori-pori dan menambah kandungan karbon tetap, sehingga energi pembakaran meningkat.

Hasil ini sejalan dengan penelitian yang melaporkan bahwa penambahan lilin malam pada briket serbuk kayu mampu meningkatkan nilai kalor hingga 25–30% [7]. Ridhuan and J. Suranto juga menemukan bahwa *bio-kokas* hasil *pirolisis biomassa* pada suhu 350–400°C menghasilkan nilai kalor lebih tinggi dibandingkan briket non-*pirolisis* karena penurunan kandungan air dan zat *volatile* [12]. Secara umum, nilai kalor *bio-kokas* pada komposisi $\geq 30\%$ sudah melampaui nilai kalor kayu bakar (sekitar 18–20 MJ/kg) dan mendekati nilai kalor batubara muda (lignit, 25–28 MJ/kg) [13]. Hal ini menunjukkan bahwa *bio-kokas* berbasis *baglog* jamur dan malam batik layak dikategorikan sebagai bahan bakar padat berenergi tinggi.



3.2 Komposisi Proksimat

a. Kadar Air

Kadar air bio-kokas berada pada kisaran 0,95–1,85%, dengan nilai terendah pada sampel P-40. Rendahnya kadar air disebabkan oleh dua faktor utama: (1) proses pirolisis yang menguapkan sebagian besar kelembapan alami pada *baglog* jamur, dan (2) sifat hidrofobik dari malam batik yang menolak penyerapan air. Menurut SNI 01-6235-2000, kadar air ideal untuk bahan bakar padat adalah di bawah 10%. Hasil ini menunjukkan bahwa seluruh sampel telah memenuhi standar tersebut, bahkan jauh lebih rendah, sehingga pembakaran dapat berlangsung stabil tanpa energi terbuang untuk menguapkan air. Untuk bahan yang telah mengalami karbonisasi (*biochar*), kadar air akhir biasanya lebih rendah hal ini disebabkan *karbonisasi* membuat material lebih *hidrofobik*, sehingga *moisture content* dapat mencapai <5% [14].

b. Kadar Abu

Kadar abu menunjukkan jumlah *residu anorganik* yang tersisa setelah pembakaran sempurna [15]. Nilai kadar abu menurun dari 30,20% (P-10) menjadi 23,25% (P-40) sebelum sedikit naik pada P-50 (24,88%). Penurunan ini menandakan meningkatnya kemurnian karbon dan efisiensi proses pirolisis. Kadar abu yang rendah berhubungan langsung dengan peningkatan nilai kalor, karena kandungan mineral anorganik (*silika, oksida logam*) cenderung tidak menghasilkan energi pembakaran. Penelitian Gimba menunjukkan bahwa kadar abu *briket* berbahan biomassa yang telah terkarbonisasi yaitu sekitar 16.41-17.54% [16]

c. Volatile Matter dan Fixed Carbon

Kandungan volatile matter meningkat dari 16% (P-10) menjadi 26,5% (P-50), sedangkan *fixed carbon* relatif tinggi (46–54%). Peningkatan *volatil* menunjukkan bahwa fraksi malam batik memperkaya komponen *hidrokarbon* ringan yang mudah terbakar, sehingga mempermudah penyalaan awal dan meningkatkan efisiensi pembakaran. Sementara itu, kandungan *fixed carbon* yang tinggi (>45%) menjadi indikator penting dari karakteristik bahan bakar berenergi tinggi. Nilai tersebut lebih baik dibandingkan rata-rata *briket biomassa* mentah yang umumnya hanya memiliki 35–40% karbon tetap [2]. Dengan demikian, proses pirolisis pada suhu 350–400°C telah berhasil meningkatkan karakter karbonisasi bahan bakar.

3.3 Densitas dan Kekuatan Mekanik

Terlihat bahwa densitas meningkat secara bertahap seiring dengan bertambahnya konsentrasi lilin malam dari 10% hingga 50%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa penambahan lilin malam berperan positif dalam memperkuat ikatan antar partikel pada *briket*, menghasilkan struktur yang lebih padat dan kompak. Pada P - 10% hingga P - 20%, kenaikan densitas masih relatif kecil (0,66 → 0,68), menunjukkan tahap awal penambahan binder belum signifikan mengisi rongga antar partikel biomassa. Mulai P - 30% hingga P - 50%, densitas meningkat tajam (0,75 → 0,90), menandakan bahwa lilin malam mulai berfungsi efektif sebagai pengikat dan pengisi pori.

Lilin malam bersifat termoplastik, yang meleleh saat proses pencetakan atau pengeringan, lalu mengeras kembali saat dingin, mengisi celah antar partikel *baglog* jamur. Proses ini menurunkan porositas internal dan meningkatkan massa jenis per satuan volume. Selain itu, lilin memiliki viskositas tinggi sehingga membantu *adhesi* antar permukaan partikel biomassa. Densitas yang lebih tinggi umumnya berhubungan dengan (1) nilai kalor yang meningkat, karena *briket* lebih padat dan mengandung lebih sedikit rongga udara, (2) Ketahanan mekanik lebih baik, karena gaya kohesi antar partikel meningkat, (3) laju pembakaran lebih lambat, akibat berkurangnya porositas dan sirkulasi udara internal.

Menurut Glahat et al. penambahan wax sebagai binder meningkatkan *water resistance* dan *densitas briquette* hingga 0,91 g/cm³ [7]. Kurniawan et al. melaporkan bahwa penggunaan *binder* berbasis lilin dan tar dapat meningkatkan *densitas* dari 0,63 g/cm³ menjadi 0,85 g/cm³ pada *briket* sekam



padi, akibat berkurangnya rongga antar partikel [17]. Obi et al, juga menyebut bahwa binder organik seperti *wax*, *resin*, dan *starch* meningkatkan densitas karena sifatnya yang melekat kuat dan mampu menembus struktur pori *biomassa* selama proses pencetakan [18].

3.4 Emisi Gas Buang

Uji emisi gas buang dilakukan untuk menilai karakter lingkungan dari pembakaran bio-kokas. Hasil pengujian menunjukkan tren penurunan kadar polutan dengan meningkatnya komposisi malam batik (Gambar 1). Emisi CO₂ menurun dari 1,8% (P-10) menjadi 0,6% (P-50). Emisi CO turun drastis dari 0,47% (P-10) menjadi 0,00% (P-20 ke atas). Emisi HC (hidrokarbon tak terbakar) juga menurun signifikan dari 523 ppm (P-10) menjadi 0 ppm (\geq P-20). Emisi NO_x tidak terdeteksi pada seluruh sampel, menunjukkan bahwa suhu pembakaran dan kandungan nitrogen dalam bahan relatif rendah.

Penurunan emisi ini menunjukkan bahwa campuran dengan proporsi malam batik tinggi menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna dan efisien. Kandungan hidrokarbon malam batik yang tinggi mempercepat reaksi oksidasi karbon menjadi CO₂, sementara peningkatan nilai kalor memperpendek waktu pembakaran sehingga mengurangi emisi tidak sempurna.

Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Simeng Li dan Maxwell *et al*, yang menyebutkan bahwa bio-kokas hasil pirolisis memiliki emisi CO dan HC lebih rendah dibandingkan *briket non-pirolisis*. Hal tersebut disebabkan oleh struktur pori terbuka dan kadar volatil yang lebih terkendali, sehingga pembakaran berlangsung lebih sempurna. Produk *pirolisis (biochar)* cenderung menghasilkan emisi CO dan *hidrokarbon (HC/VOC)* lebih rendah saat dibakar dibandingkan *briket/biomassa non-pirolisis*. Hal ini disebabkan *pirolisis* mengurangi *fraksi volatile* organik dan meningkatkan fraksi karbon tetap sehingga bahan bakar yang dihasilkan lebih “tersusun” dan lebih mudah terbakar secara lengkap — sehingga emisi gas hasil pembakaran yang disebabkan pembakaran tidak sempurna (CO, HC/VOC) berkurang [19] [20].

3.5 Implikasi Lingkungan dan Energi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa bio-kokas berbasis limbah malam batik dan baglog jamur hasil pirolisis memiliki efisiensi energi tinggi, emisi rendah, dan stabilitas pembakaran baik. Secara lingkungan, pemanfaatan dua limbah padat ini dapat membantu mengurangi timbunan residu industri batik dan pertanian, sekaligus mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil maupun kayu bakar. Selain itu, hasil penelitian ini mendukung pencapaian *Sustainable Development Goals (SDGs)* poin 7 (Energi Bersih dan Terjangkau) dan poin 12 (Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab). Dengan potensi nilai kalor hingga 27,31 MJ/kg dan emisi CO–HC yang hampir nol, bio-kokas ini sangat prospektif untuk diterapkan pada UMKM sektor pangan, seperti industri tahu, tempe, dan pengeringan hasil pertanian.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa variasi komposisi limbah malam batik memberikan pengaruh signifikan terhadap kualitas dan karakteristik emisi bio-kokas berbasis limbah baglog jamur hasil pirolisis. Beberapa kesimpulan utama yang dapat diambil adalah sebagai berikut. (1) Peningkatan fraksi malam batik dari 10% hingga 50% menyebabkan peningkatan nilai kalor bio-kokas dari 20,37 MJ/kg (P-10) menjadi 27,31 MJ/kg (P-50). Hal ini menunjukkan kontribusi signifikan komponen karbon dan hidrokarbon malam batik terhadap densitas energi bahan bakar. (2) Karakteristik *proksimat bio-kokas* menunjukkan tren perbaikan seiring dengan peningkatan komposisi malam batik: kadar abu menurun dari 30,2% menjadi 24,88%, kadar air sangat rendah (<2%), serta kandungan volatile matter meningkat hingga 26,5%. Nilai *fixed carbon* tetap tinggi (46–54%), menandakan efisiensi proses pirolisis dan pembentukan struktur karbon yang stabil. (3) Kekuatan mekanik meningkat drastis dari 1,15 kg menjadi 88,25 kg, menunjukkan bahwa malam batik berperan efektif sebagai perekat alami (*binder*) yang memperkuat ikatan antar partikel karbon. (4) Emisi gas buang menunjukkan perbaikan signifikan dengan meningkatnya komposisi malam batik. Emisi CO dan HC menurun hingga 0% pada



campuran $\geq 20\%$, sedangkan NO_x tidak terdeteksi. Kondisi ini membuktikan bahwa bio-kokas hasil pirolisis menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna dan ramah lingkungan. (5) Berdasarkan parameter termal, fisik, dan emisi, komposisi optimum dicapai pada kisaran 40–50% malam batik, di mana nilai kalor tinggi, kadar abu rendah, dan emisi polutan minimum.

Secara keseluruhan, kombinasi limbah malam batik dan *biochar* limbah baglog jamur terbukti meningkatkan efisiensi energi dan menurunkan dampak lingkungan, sehingga bio-kokas yang dihasilkan layak dikembangkan sebagai bahan bakar alternatif pengganti kayu bakar atau LPG bagi industri kecil dan rumah tangga (UMKM).

Ucapan Terima Kasih

Peneliti menyampaikan terima kasih kepada Ibu Evi Wahyu Astutik, S.A.P., pemilik Griya Batik Sengguruh, atas izin pemanfaatan limbah malam batik sebagai bahan penelitian. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Prof. Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT., Prof. Dr. Eng. Eko Siswanto, ST., MT., dan Dr. Eng. Ir. Ming Narto Wijaya, ST., MT., M.Sc., IPM., ASEAN Eng., Sugeng Hendik P., S.T., beserta tim laboratorium Universitas Brawijaya atas bimbingan dan fasilitas selama proses pirolisis, pengepresan, dan uji mekanik. Ucapan terima kasih juga kami sampaikan kepada tim Laboratorium Teknik Kimia Politeknik Negeri Malang atas bantuan uji proksimat dan nilai kalor, serta kepada Dinas Perhubungan Kabupaten Malang atas fasilitas uji emisi gas.

References

- [1] A. P. Siregar *et al.*, “Upaya Pengembangan Industri Batik di Indonesia,” *DKB*, vol. 37, no. 1, June 2020, doi: 10.22322/dkb.v37i1.5945.
- [2] L. Indrayani, “Pengolahan Limbah Cair Industri Batik Sebagai Salah Satu Percontohan Ipal Batik Di Yogyakarta,” *EJES*, vol. 12, no. 2, p. 173, Nov. 2018, doi: 10.24843/EJES.2018.v12.i02.p07.
- [3] I. Oktaviani, “eksplorasi etnomatematika pada aktivitas membatik di rumah produksi batik gajah mada tulungagung.” Accessed: Aug. 18, 2025. [Online]. Available: <http://repo.uinsatu.ac.id/15764/>
- [4] Y. Pal, S. N. Mahottamananda, S. S, S. K. Palateerdham, and A. Ingenito, “Thermal decomposition kinetics and combustion performance of paraffin-based fuel in the presence of CeO_2 catalyst,” *FirePhysChem*, vol. 3, no. 3, pp. 217–226, Sept. 2023, doi: 10.1016/j.fpc.2022.10.005.
- [5] A. Harijanja, A. Asnah, and Y. Kholil, “Prospek Produksi Jamur Tiram di UMKM Ibu Juwanah Desa Tulungrejo,” 2024. Accessed: Aug. 18, 2025. [Online]. Available: <https://rinjani.unitri.ac.id/handle/071061/3854>
- [6] I. A. Bellapama, K. Hendarto, and R. D. Widyastuti, “Pengaruh pemupukan organik limbah baglog jamur dan pemupukan takaran NPK terhadap pertumbuhan dan produksi pakchoy (*Brassica chinensis* L.),” *Jurnal Agrotek Tropika*, vol. 3, no. 3, 2015.
- [7] Glalah, “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.” Accessed: Oct. 27, 2025. [Online]. Available: https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371%2Fjournal.pone.0306827&utm_source=chatgpt.com
- [8] R. N. Yanti, A. T. Ratnaningsih, and H. Ikhsani, “Pembuatan bio-briket dari produk pirolisis biochar cangkang kelapa sawit sebagai sumber energi alternatif,” *Jurnal Ilmiah Pertanian*, vol. 19, no. 1, pp. 11–18, 2022.
- [9] I. Ardiansyah, A. Y. Putra, and Y. Sari, “Analisis Nilai Kalor Berbagai Jenis Briket Biomassa Secara Kalorimeter,” *Journal of Research and Education Chemistry*, vol. 4, no. 2, pp. 120–120, 2022.
- [10] D. Rahmalina, I. C. Miftahudin, and others, “Peningkatan Performa Termal Phase Change Material dengan Komposit Berbasis Parafin/High-Density Polyethylene Melalui Penambahan Carbon Nanotube,” *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, vol. 12, no. 2, 2023.



- [11] E. F. Permanadewi And P. Inggriani, “Pengaruh jumlah bahan perekat, suhu, dan waktu operasi pada pembuatan bahan bakar padat dari limbah budidaya jamur (LOG) dengan proses torefaksi,” PhD Thesis, Institut Teknologi Nasional Bandung, 2020.
- [12] K. Ridhuan and J. Suranto, “Perbandingan pembakaran pirolisis dan karbonisasi pada biomassa kulit durian terhadap nilai kalori,” *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, vol. 5, no. 1, 2017.
- [13] S. J. Wardani, M. Fahrurrozi, and H. Sulisty, “Pengaruh Kondisi Pirolisis terhadap Penurunan Kandungan Volatile Matter pada Batubara Kualitas Rendah,” *Jurnal Sosial Teknologi*, vol. 4, no. 8, pp. 537–545, 2024.
- [14] C. E. Umeocho, C. O. Ezidi, E. N. Nwosu, C. I. Nwankwo, K. C. Ezejiegu, and T. U. Onuegbu, “Comparative study of the combustion properties of briquettes produced from blends of mung beans shell, uncarbonized and carbonized sawdust,” *Chem. Rep.*, vol. 5, no. 1, pp. 285–290, May 2024, doi: 10.25082/CR.2024.01.003.
- [15] R. Napatipulu, R. J. Pratama, and Y. Dharta, “Analisis Pengaruh Konsentrasi Perekat Tepung Tapioka terhadap Pengurangan Kadar Abu pada Briket Tempurung Kelapa,” *Jurnal Teknologi*, vol. 25, no. 1, pp. 20–24, 2025.
- [16] A. Gimba and A. Zubairu, “Comparative Assessment of Combustion Properties of Carbonized and Non-carbonized Briquettes from Sawdust,” *CPER*, vol. 64, 2022, doi: 10.7176/CPER/64-05.
- [17] F. A. Kurniawan and A. A. Syukron, “Karakteristik Briket Bioarang dari Campuran Limbah Baglog Jamur Tiram (*Pleurotus Ostreatus*) dan Sekam Padi,” *Indonesian J Appl Phys*, vol. 9, no. 02, p. 76, Dec. 2019, doi: 10.13057/ijap.v9i2.34478.
- [18] O. F. Obi, R. Pecenka, and M. J. Clifford, “A Review of Biomass Briquette Binders and Quality Parameters,” *Energies*, vol. 15, no. 7, p. 2426, Mar. 2022, doi: 10.3390/en15072426.
- [19] S. Li, “Reviewing Air Pollutants Generated during the Pyrolysis of Solid Waste for Biofuel and Biochar Production: Toward Cleaner Production Practices,” *Sustainability*, vol. 16, no. 3, p. 1169, Jan. 2024, doi: 10.3390/su16031169.
- [20] D. Maxwell, B. A. Gudka, J. M. Jones, and A. Williams, “Emissions from the combustion of torrefied and raw biomass fuels in a domestic heating stove,” *Fuel Processing Technology*, vol. 199, p. 106266, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.fuproc.2019.106266.