

Karakteristik Biopellet Karbonisasi Biomassa Berbasis Daun Jati Dan Jagung Menggunakan Perekat Tanah Liat

(Characterization of Carbonized Biopellets from Teak Leaves and Corn Residues with Clay Binder)

Ropiudin^{1*)}, Toibah¹⁾, Dian Windy Dwiasi²⁾, Kavadya Syska³⁾

¹⁾Program Studi Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Jenderal Soedirman

²⁾Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jenderal Soedirman

³⁾Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Nahdlatul Ulama Al Ghazali Cilacap

^{*)}email korespondensi: ropiudin@unsoed.ac.id

ABSTRACT

Biomass carbonization plays a vital role in the production of biopellets as a sustainable and environmentally friendly energy source. This study aimed to evaluate the physicochemical characteristics of carbonized biopellets, including density, moisture content, ash content, volatile matter, combustion rate, and mechanical durability. The biopellets were produced from a mixture of teak leaves, corn cobs, and corn stalks, with clay as a binder, and subjected to carbonization under different formulations to assess their influence on final product quality. The experimental design employed a Completely Randomized Design (CRD) with nine treatment combinations and three replications, resulting in a total of 27 experimental units. The treatments consisted of variations in raw material composition (K1, K2, K3) and clay binder proportions (P1, P2, P3). Analyses included physical, chemical, thermal, and durability assessments. Data were analyzed using Analysis of Variance (ANOVA) followed by Duncan's Multiple Range Test (DMRT) at a 5% significance level. Results indicated that the carbonized biopellets had density values ranging from 0.49 to 0.56 g/cm³, moisture content from 5.34% to 6.82%, ash content from 20.38% to 34.24%, volatile matter from 66.82% to 79.88%, combustion rate from 0.03 to 0.05 g/min, and mechanical durability ranging from 43.72% to 55.03%. The composition of raw materials significantly influenced most parameters, except combustion rate and durability. Meanwhile, binder proportion had a highly significant effect on all parameters except for durability, which showed a significant effect. Based on the results, the carbonized biopellets met the SNI 8021-2014 standard requirements for moisture and volatile matter, while density and ash content were outside the specified limits.

Keywords: *Biopellet, Carbonization, Corn Biomass, Teak Leaves, Clay Soil*

PENDAHULUAN

Permasalahan lingkungan dan fenomena perubahan iklim yang sedang melanda secara global merupakan tantangan global yang mendesak. Pelepasan gas rumah kaca dari pembakaran sumber energi fosil, meliputi batu bara, minyak bumi, dan gas alam, berperan sebagai faktor penyumbang terbesar dalam peningkatan suhu global (Syska & Ropiudin, 2023a). Efek pemanasan global ini mencakup peningkatan suhu rata-rata planet, perubahan pola cuaca ekstrem, naiknya permukaan laut, dan ancaman serius terhadap ekosistem (Jha &

Dev, 2024). Oleh karena itu, kita tidak bisa lagi mengabaikan dampak negatif dari ketergantungan pada sumber energi konvensional. Pencarian energi terbarukan yang mendukung keberlanjutan dan kelestarian lingkungan menjadi prioritas utama bagi komunitas global. Salah satu pendekatan yang menjanjikan yaitu memanfaatkan biomassa sebagai bahan baku untuk produksi bahan bakar dan energi (Syska & Ropiudin, 2020). Sebagai energi terbarukan, biomassa menawarkan keunggulan dalam hal jejak karbon yang lebih kecil dibandingkan sumber

energi fosil (Ropiudin *et al.*, 2023). Dengan mengkonversi biomassa menjadi bahan bakar, seperti bioetanol, biodiesel, atau briket karbon, kita dapat menekan emisi gas rumah kaca serta menurunkan tingkat ketergantungan terhadap sumber energi fosil, dan mengembangkan solusi yang lebih berkelanjutan untuk kebutuhan energi kita (Syska & Ropiudin, 2023b).

Dalam beberapa tahun terakhir, perhatian terhadap biomassa sebagai sumber energi terbarukan dan bahan bakar alternatif terus mengalami peningkatan secara signifikan (Ropiudin & Syska, 2023). Biomassa dapat berasal dari berbagai sumber, termasuk limbah pertanian, kayu, tanaman energi, dan limbah organik lainnya. Limbah pertanian seperti jerami, serbuk gergaji, dan tanaman sisa panen dapat diubah menjadi briket karbon atau biopellet yang memiliki nilai kalor tinggi (Sanchez *et al.*, 2022). Selain mengurangi dampak lingkungan, penggunaan biomassa juga dapat mendukung keberlanjutan ekonomi di daerah pedesaan, dengan menciptakan lapangan kerja lokal dan meningkatkan pendapatan petani (Ropiudin & Syska, 2022). Namun, penggunaan biomassa sebagai bahan bakar dan energi juga menimbulkan sejumlah tantangan teknis, ekonomis, dan lingkungan yang perlu diatasi. Oleh karena itu, penelitian dan inovasi terus dilakukan untuk mengembangkan teknologi yang lebih efisien dalam konversi biomassa menjadi energi dan bahan bakar, serta untuk memahami dampak ekologis dan sosial dari penggunaan biomassa dalam skala besar. Upaya ini bertujuan untuk memastikan bahwa pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi alternatif benar-benar berkontribusi pada mitigasi perubahan iklim dan pembangunan berkelanjutan di masa depan.

Proses karbonisasi merupakan metode krusial dalam mengubah biomassa menjadi biopellet yang efisien dan berdaya. Proses ini melibatkan serangkaian reaksi kimia kompleks yang terjadi ketika biomassa dipanaskan pada suhu tinggi dalam lingkungan yang bebas oksigen (Kowalski *et al.*, 2024). Selama proses ini, biomassa terdekomposisi secara termal, menghasilkan gas, uap air, dan sisa karbon padat. Karbon yang dihasilkan dalam bentuk

biopellet memiliki nilai kalor yang tinggi, yang menjadikannya bahan bakar yang potensial (Suhasman *et al.*, 2024). Pentingnya proses karbonisasi yaitu menghilangkan sebagian besar komponen volatil dalam biomassa, sehingga meningkatkan energi yang terkandung dalam biopellet dan mengurangi risiko emisi gas beracun selama pembakaran. Selain itu, biopellet yang dihasilkan dari karbonisasi juga cenderung lebih tahan lama dan memiliki stabilitas yang lebih baik dibandingkan dengan biomassa mentah (He *et al.*, 2024). Namun demikian, untuk memastikan bahwa biopellet memiliki kekuatan yang cukup dan tidak mudah hancur, penggunaan perekat sering kali diperlukan.

Penggunaan perekat dalam produksi biopellet merupakan langkah penting untuk meningkatkan kekuatan dan stabilitas fisik dari produk akhir (Harlina *et al.*, 2021). Tanah liat merupakan salah satu perekat alami yang sering digunakan dalam produksi biopellet. Tanah liat memiliki sifat adhesif yang memungkinkannya untuk mengikat partikel-partikel biomassa bersama-sama, membentuk biopellet yang lebih padat dan tahan lama (Mortadha *et al.*, 2025). Menurut Butler *et al.*, (2023), penggunaan tanah liat sebagai perekat memiliki beberapa keuntungan, antara lain ketersediaan yang melimpah, biaya yang relatif rendah, serta kemampuannya untuk mengurangi kerapuhan dan keausan pada biopellet. Namun demikian, menurut Cui *et al.* (2021), penggunaan perekat dalam produksi biopellet juga memerlukan penelitian yang cermat untuk menentukan komposisi yang optimal agar mencapai hasil yang diinginkan. Selain itu, pemilihan perekat juga harus memperhitungkan dampak lingkungan yang dihasilkan, termasuk jejak karbon dan potensi dampak lainnya (Bumanis *et al.*, 2022). Dengan memahami peran penting proses karbonisasi dan penggunaan perekat dalam produksi biopellet, kita dapat mengembangkan teknologi yang lebih efisien dan berkelanjutan dalam menghasilkan bahan bakar dan energi dari biomassa, sekaligus berkontribusi pada upaya mitigasi global.

Tanah liat telah menjadi pilihan yang menarik sebagai perekat dalam produksi biopellet dari biomassa daun jati dan jagung.

Keunggulan tanah liat sebagai perekat yaitu ketersediaannya yang melimpah di berbagai daerah, biaya yang terjangkau, dan kemampuannya untuk mengikat partikel-partikel biomassa dengan kuat (Alsaqoor *et al.*, 2022). Sifat alami tanah liat yang mengandung mineral seperti silika, alumina, dan oksida besi memberikan daya rekat yang baik terhadap berbagai jenis biomassa (Duan *et al.*, 2024). Selain itu, ketika digunakan sebagai perekat, tanah liat dapat membantu membentuk biopellet yang kompak dan kokoh, sehingga meningkatkan stabilitas fisiknya (Butler *et al.*, 2023). Kemampuan tanah liat untuk menahan kelembaban juga dapat mengurangi risiko pembusukan biopellet selama penyimpanan. Keuntungan-keuntungan ini membuat tanah liat menjadi pilihan yang menarik dalam produksi biopellet berbasis biomassa daun jati dan jagung.

Meskipun tanah liat menawarkan banyak keunggulan sebagai perekat dalam produksi biopellet, penting untuk mencatat bahwa penelitian yang rinci masih diperlukan untuk lebih memahami karakteristik biopellet yang dihasilkan dari karbonisasi biomassa daun jati dan jagung dengan perekat tanah liat. Setiap jenis biomassa memiliki komposisi kimia dan sifat fisik yang berbeda, yang dapat berdampak pada kualitas akhir biopellet. Oleh karena itu, penelitian eksperimental yang mendalam harus dilakukan untuk mengevaluasi kekuatan mekanik, nilai kalor, kestabilan termal, dan kemampuan pembakaran dari biopellet yang menggunakan tanah liat sebagai perekat. Hasil dari penelitian ini akan memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang efektivitas penggunaan tanah liat dalam biomassa daun jati dan jagung, serta memberikan informasi yang diperlukan bagi industri dan penelitian lebih lanjut dalam upaya memanfaatkan sumber energi alternatif ini secara berkelanjutan. Dengan demikian, pemahaman yang lebih mendalam tentang karakteristik biopellet akan memungkinkan pengembangan teknologi yang lebih efisien dan berkelanjutan dalam produksi bahan bakar dan energi dari biomassa, yang memiliki dampak positif pada penanggulangan dampak perubahan iklim serta pengelolaan berkelanjutan terhadap sumber daya alam.

Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini yaitu: Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji karakteristik fisik dan kimia biopellet hasil karbonisasi yang dibuat dari limbah daun jati, tongkol jagung, dan batang jagung dengan tambahan perekat tanah liat, meliputi kerapatan, kadar air, kadar abu, zat terbang, laju pembakaran, serta daya tahannya.

METODOLOGI PENELITIAN

Alat dan Bahan

Beberapa alat yang digunakan dalam rangkaian penelitian ini adalah: panci, termometer, penghalus batu, ayakan 60 mesh, wadah baskom, alat pencetak biopellet, timbangan analitik, timbangan digital, oven, loyang, tanur, jangka sorong, stopwatch, cawan, dan desikator. Bahan pada penelitian ini yaitu limbah daun jati, tongkol jagung, batang jagung, tanah liat, dan air.

Rancangan Percobaan

Jenis penelitian ini merupakan eksperimen yang menggunakan pendekatan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan desain faktorial dua faktor. Faktor pertama yaitu komposisi perekat tanah liat yang terdiri dari 3 taraf (10%, 20%, dan 30%) dan faktor kedua yaitu membandingkan bahan pembuat biopellet (daun jati, tongkol jagung, dan batang jagung). Kedua faktor tersebut diperoleh 9 kombinasi perlakuan dan percobaan yang dilakukan sebanyak 27 unit, dimana masing-masing perlakuan dilakukan pengulangan hingga 3 kali.

Perbandingan komposisi bahan baku berupa tongkol jagung (TJ), batang jagung (BJ), daun jati (DJ), serta perekat tanah liat dengan proporsi masing-masing 10% (P1), 20% (P2), dan 30% (P3) dari total berat bahan disajikan pada Tabel 1.

- Kombinasi A (%) = bahan dengan perbandingan TJ:BJ:DJ = 50:20:30 (K1)
- Kombinasi B (%) = bahan dengan perbandingan TJ:BJ:DJ = 60:15:25 (K2)
- Kombinasi C (%) = bahan dengan perbandingan TJ:BJ:DJ = 70:10:20 (K3)

Tabel 1. Kombinasi perlakuan percobaan

Perbandingan Bahan (%)	Perekat Tanah Liat (%)		
	P1 (10)	P2 (20)	P3 (30)
K1 (50:20:30)	K1P1	K1P2	K1P3
K2 (60:15:25)	K2P1	K2P2	K2P3
K3 (70:10:20)	K3P1	K3P2	K3P3

Data hasil penelitian dianalisis secara statistik menggunakan uji analisis ragam (ANOVA) untuk mengevaluasi pengaruh perlakuan terhadap parameter yang diamati. Apabila hasil uji F menunjukkan pengaruh yang signifikan, maka dilanjutkan dengan uji lanjutan menggunakan metode Duncan's Multiple Range Test (DMRT) pada taraf signifikansi 5% ($\alpha = 0,05$) guna mengidentifikasi perbedaan nyata antar perlakuan.

Prosedur Penelitian

1. Tahap persiapan

Tahap persiapan yang dilakukan dalam pelaksanaan penelitian tentang biopelet karbonisasi ini yaitu:

- Mempersiapkan alat dan bahan.
- Bahan baku berupa daun jati, tongkol jagung, batang jagung, dan tanah liat dikeringkan secara alami di bawah sinar matahari selama dua hari guna menurunkan kadar air hingga mencapai sekitar 15%.
- Bahan baku seperti daun jati, tongkol jagung, dan batang jagung yang sudah kering dilanjutkan dengan proses pembakaran bahan baku dengan menggunakan metode karbonisasi sehingga menjadi arang. Proses karbonisasi dilakukan dengan menggunakan alat yang sederhana yaitu panci. Kurang lebih membutuhkan waktu 1 jam untuk tongkol jagung dan batang jagung untuk proses karbonisasi. Sedangkan proses karbonisasi untuk daun jati membutuhkan waktu sekitar 10–20 menit.
- Arang yang terbentuk dari daun jati, tongkol jagung, dan batang jagung dihaluskan dengan menggunakan penghalus batu.
- Arang yang sudah halus dan tanah liat kering diayak dengan ayakan 60 *mesh*.

2. Tahap percobaan

Tahap percobaan dilakukan proses percobaan dalam melakukan pembuatan biopelet dari dan daun jati, tongkol jagung, dan batang jagung dengan menggunakan perekat tanah liat. Langkah yang dilakukan sebagai berikut:

- Tepung arang hasil karbonisasi daun jati, tongkol jagung, dan batang jagung yang telah diayak hingga berukuran seragam dicampurkan dengan tanah liat sebagai bahan perekat sesuai dengan komposisi pada rancangan percobaan. Pada campuran 50 g bahan baku, penambahan perekat tanah liat dilakukan masing-masing sebesar 5 g (10%), 10 g (20%), dan 15 g (30%) dari total berat bahan.
- Air ditambahkan sehingga membentuk adonan dengan perbandingan 1:2. Apabila sebanyak 50 g campuran bahan baku maka sebanyak 100 ml air yang digunakan. Adonan yang telah tercampur secara homogen selanjutnya dimasukkan ke dalam cetakan logam silinder dengan diameter 1 cm dan panjang antara 3,5 hingga 4 cm.
- Adonan ditekan dengan pencetak biopelet dengan beban penekanan sebesar 20 kg.
- Hasil padatan adonan atau biopelet yang telah jadi dikeluarkan. Selanjutnya sebelum dilakukan uji karakteristik, biopelet dioven dengan suhu 105 °C selama 2 jam.

3. Tahap analisis

Tahapan analisis dalam penelitian ini meliputi pengujian terhadap parameter kerapatan, kadar air, kadar abu, kadar zat terbang, nilai kalor, daya tahan, dan laju pembakaran, yang seluruhnya mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI 8021:2014). Penilaian mutu biopelet dilakukan berdasarkan kesesuaiannya dengan kriteria standar mutu yang tercantum dalam SNI 8021:2014 mengenai persyaratan pelet kayu.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Karakteristik Biopelet Karbonisasi

Pengujian dalam penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kualitas biopelet melalui analisis fisik dan kimia, yang mencakup parameter kerapatan, kadar air, kadar abu,

kandungan zat terbang, laju pembakaran, serta daya tahan. Hasil analisis varians (ANOVA) terhadap pengaruh faktor komposisi bahan baku (K) dan persentase penggunaan perekat (P) terhadap karakteristik fisik dan kimia biopelet hasil karbonisasi dari daun jati, tongkol jagung, dan batang jagung dengan tanah liat sebagai perekat disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil uji Anova biopelet karbonisasi daun jati, tongkol jagung, dan batang jagung dengan perekat tanah liat terhadap sifat fisika dan kimia biopelet

No	Variabel yang diuji	K	P	KP
1	Kerapatan	**	**	**
2	Kadar air	**	**	TN
3	Kadar abu	**	**	**
4	Kadar zat terbang	**	**	**
5	Laju pembakaran	TN	**	*
6	Daya tahan	TN	*	TN

Keterangan: TN = berpengaruh tidak nyata; * = berpengaruh nyata; ** = berpengaruh sangat nyata

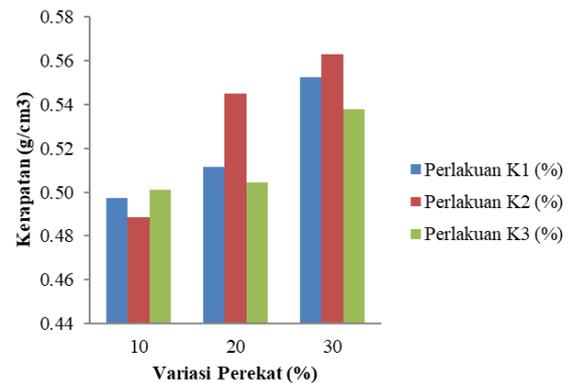
Tabel 2 menunjukkan bahwa faktor dari komposisi bahan baku (K) berpengaruh nyata terhadap nilai kerapatan, kadar air, kadar abu, dan kadar zat terbang, sedangkan berpengaruh tidak nyata terhadap nilai laju pembakaran dan daya tahan dari biopelet karbonisasi. Faktor presentase perekat (P) berpengaruh nyata terhadap nilai kerapatan, kadar air, kadar abu, kadar zat terbang, dan laju pembakaran, sedangkan berpengaruh nyata terhadap nilai daya tahan biopelet karbonisasi. Interaksi antara komposisi bahan baku dan persentase perekat (KP) berpengaruh nyata terhadap nilai kerapatan, kadar abu, dan kadar zat terbang, sedangkan untuk nilai kadar air dan daya tahan berpengaruh tidak nyata dan berpengaruh nyata terhadap nilai laju pembakaran biopelet karbonisasi. Hasil pembuatan biopelet karbonisasi daun jati, tongkol jagung, dan batang jagung dengan perekat tanah liat disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Biopelet hasil karbonisasi diproduksi dari campuran bahan baku berupa daun jati, tongkol jagung, dan batang jagung dengan penambahan perekat berbasis tanah liat.

Kerapatan

Kerapatan biopelet merupakan salah satu parameter penting yang memengaruhi kualitas biopelet; semakin tinggi nilai kerapatan, umumnya akan diikuti oleh peningkatan nilai kalor yang dihasilkan (Iskandar *et al.*, 2020). Ada banyak hal yang mempengaruhi nilai kerapatan dari biopelet yaitu keseragaman ukuran partikel arang, jenis biomassa yang digunakan, dan besarnya tekanan pada biopelet.



Gambar 2. Hubungan antara persentase perekat dan komposisi bahan baku terhadap kerapatan biopelet karbonisasi

Kombinasi perlakuan K2P3, yang terdiri atas 60% tongkol jagung, 15% batang jagung, dan 25% daun jati dengan penambahan 30% perekat tanah liat, menunjukkan nilai kerapatan tertinggi dengan rata-rata sebesar 0,56 g/cm³. Sebaliknya, perlakuan K2P1 menghasilkan nilai kerapatan terendah, yaitu

0,49 g/cm³. Seluruh kombinasi perlakuan belum memenuhi persyaratan minimal kerapatan biopelet sebagaimana ditetapkan dalam SNI 8021:2014, yakni sebesar $\geq 0,8$ g/cm³.

Gambar 2 menunjukkan bahwa peningkatan persentase perekat cenderung meningkatkan nilai kerapatan biopelet karbonisasi, terlepas dari variasi komposisi bahan baku. Pola ini dipengaruhi oleh kombinasi karakteristik masing-masing bahan baku serta jumlah perekat tanah liat yang digunakan. Nuryawan et al. (2021) menyatakan bahwa bahan baku dengan berat jenis yang lebih tinggi cenderung menghasilkan biopelet dengan kerapatan yang lebih besar. Sementara itu, Qanitha et al. (2023) mengemukakan bahwa biopelet dengan kerapatan tinggi umumnya memiliki ketahanan mekanis yang lebih baik, namun dapat mengurangi kemudahan dalam proses pembakaran karena berkurangnya porositas akibat ikatan antar partikel yang lebih rapat. Interaksi antara faktor komposisi bahan baku (K) dan persentase perekat (P) terhadap nilai kerapatan biopelet karbonisasi secara rinci disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Interaksi antara komposisi bahan baku dan persentase perekat (KP) memberikan pengaruh terhadap tingkat kerapatan biopelet hasil karbonisasi

Perlakuan	Hasil Uji DMRT
K1P1	0,50 ^{ab}
K1P2	0,51 ^b
K1P3	0,55 ^{cd}
K2P1	0,49 ^a
K2P2	0,54 ^{cd}
K2P3	0,56 ^d
K3P1	0,50 ^{ab}
K3P2	0,50 ^{ab}
K3P3	0,54 ^c

Keterangan: Notasi huruf yang sama menunjukkan bahwa perbedaan antar nilai tidak signifikan berdasarkan uji DMRT pada taraf 5%.

Tabel 3 menunjukkan bahwa interaksi antara komposisi bahan baku dan persentase perekat (KP) tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai kerapatan biopelet hasil karbonisasi. Namun demikian, perlakuan K2P3 menghasilkan nilai kerapatan tertinggi

sebesar 0,56 g/cm³ berdasarkan uji lanjut DMRT pada taraf signifikansi 5%.

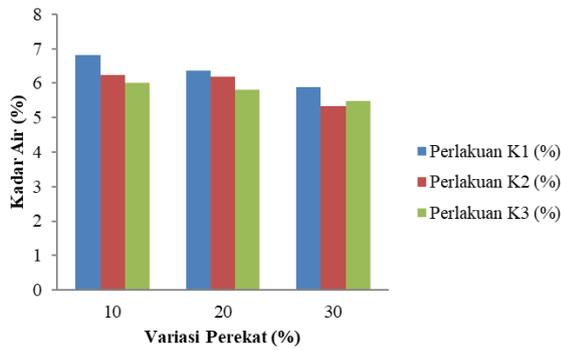
Kadar Air

Kadar air merupakan salah satu parameter penting dalam menilai mutu biopelet, karena kandungan air yang tinggi dapat menurunkan nilai kalor yang dihasilkan selama proses pembakaran (Tumuluru & Fillerup, 2020). Apabila kadar air yang terkandung dalam biopelet cukup tinggi maka akan menyebabkan menurunnya daya pembakaran biopelet sehingga akan lebih sulit terbakar. Nilai rata-rata kadar air biopelet karbonisasi ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai rata-rata kadar air biopelet karbonisasi

No	Kombinasi Perlakuan	Rata-rata (%)
1	K1P1	6,82
2	K1P2	6,36
3	K1P3	5,88
4	K2P1	6,25
5	K2P2	6,18
6	K2P3	5,34
7	K3P1	6,01
8	K3P2	5,80
9	K3P3	5,47
Rata-rata total		6,01

Berdasarkan Tabel 4, kombinasi perlakuan K2P3, yaitu campuran bahan baku yang terdiri atas 60% tongkol jagung, 15% batang jagung, 25% daun jati, serta penggunaan perekat tanah liat sebesar 30%, menunjukkan kadar air terendah dengan rata-rata 5,34%. Sebaliknya, perlakuan K1P1 yang terdiri dari 50% tongkol jagung, 20% batang jagung, 30% daun jati, dan 10% perekat memiliki kadar air tertinggi sebesar 6,82%. Seluruh kombinasi perlakuan masih berada dalam rentang yang memenuhi standar SNI 8021:2014, yang menetapkan batas maksimum kadar air sebesar 12%. Rentang kadar air yang dihasilkan berada antara 5,34% hingga 6,82%. Hubungan antara variasi komposisi bahan baku dan persentase perekat terhadap kadar air biopelet karbonisasi ditampilkan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Pengaruh kombinasi antara persentase perekat dan formulasi bahan baku terhadap kadar air biopelet hasil karbonisasi.

Gambar 3 menunjukkan hasil bahwa biopelet dengan variasi komposisi campuran bahan baku dan perekat memiliki kecenderungan menurun untuk nilai kadar air. Kondisi ini terjadi karena peningkatan atau penurunan persentase perekat yang digunakan secara langsung memengaruhi jumlah air yang terperangkap dalam biopelet. Karena untuk jumlah air setiap perlakuan yang dilakukan sama yaitu satu banding dua untuk 100% komposisi bahan baku. Kemampuan perekat tanah liat yang lebih baik dalam menyerap air daripada arang daun jati, tongkol jagung, dan batang jagung juga menyebabkan rendahnya nilai kadar air pada persentase perekat yang tinggi.

Kadar air yang tinggi pada komposisi bahan baku dipengaruhi oleh penggunaan arang batang jagung yang banyak karena kemampuan batang jagung kurang baik dalam hal mengikat air. Arang yang berasal dari batang jagung memiliki struktur pori yang lebih besar dibandingkan dengan arang dari tongkol jagung dan daun jati. Perbedaan ukuran pori ini berkontribusi terhadap pembentukan biopelet dengan porositas yang lebih tinggi, sehingga biopelet menjadi lebih rentan menyerap uap air dari udara sekitar dan berdampak pada meningkatnya kadar air yang terkandung di dalamnya.

Tabel 5 menampilkan hasil uji DMRT pada perlakuan persentase perekat 10% (P1), 20% (P2), dan 30% (P3) berbeda nyata. Hasil untuk kadar air terendah yaitu perlakuan P3 sebesar 5,56%, sedangkan perlakuan P1 memberikan kadar air tertinggi yaitu 6,36%.

Tabel 5. Dampak variasi persentase perekat terhadap kandungan air pada biopelet hasil karbonisasi

Perlakuan	Hasil Uji DMRT
P1	6,36 ^c
P2	6,12 ^b
P3	5,56 ^a

Keterangan: Notasi huruf yang sama menunjukkan bahwa perbedaan antar nilai tidak signifikan berdasarkan uji DMRT pada taraf 5%.

Kadar Abu

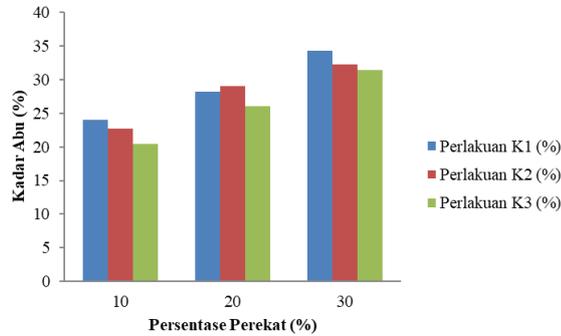
Nilai kadar abu berpengaruh terhadap nilai kalor dari biopelet yang dihasilkan. Menurut (Iryani *et al.*, 2020) menyatakan bahwa meningkatnya kadar abu yang dihasilkan oleh biopelet setelah proses pembakaran cenderung menyebabkan penurunan nilai kalor yang dihasilkan. Rata-rata kandungan abu pada biopelet hasil karbonisasi disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Rata-rata kandungan abu pada biopelet hasil karbonisasi

No	Kombinasi Perlakuan	Rata-rata (%)
1	K1P1	24,00
2	K1P2	28,20
3	K1P3	34,24
4	K2P1	22,68
5	K2P2	29,01
6	K2P3	32,28
7	K3P1	20,38
8	K3P2	26,01
9	K3P3	31,35
Rata-rata total		27,57

Berdasarkan Tabel 6, kombinasi perlakuan K3P1 yang terdiri dari 70% tongkol jagung, 10% batang jagung, 20% daun jati, dan 30% perekat tanah liat menunjukkan performa terbaik dengan kadar abu terendah, yakni sebesar 20,38%. Kombinasi perlakuan K1P3 yang terdiri dari 50% tongkol jagung, 20% batang jagung, 30% daun jati, serta penambahan 30% perekat tanah liat menunjukkan kadar abu tertinggi dengan nilai mencapai 34,24%. Seluruh kombinasi perlakuan tidak memenuhi ketentuan yang tercantum dalam SNI 8021:2014, di mana

batas maksimum kadar abu yang diperbolehkan adalah sebesar 1,5%. Visualisasi hubungan antara persentase perekat dan komposisi bahan baku terhadap kadar abu biopellet hasil karbonisasi dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Korelasi antara variasi persentase perekat dan komposisi bahan baku terhadap kadar abu pada biopellet hasil karbonisasi

Gambar 4 menampilkan hasil bahwa biopellet dengan variasi komposisi campuran bahan baku dan perekat memiliki kecenderungan naik untuk nilai kadar abu biopellet karbonisasi setiap penambahan persentase perekat tanah liat. Peningkatan kadar abu dipengaruhi oleh variasi jenis serta mutu bahan baku dan perekat yang digunakan dalam proses pembuatan biopellet. Semakin banyak jumlah persentase perekat tanah liat yang digunakan maka akan meningkatkan nilai kadar abu biopellet karbonisasi. Menurut (Herjunata *et al.*, 2020) pemanfaatan perekat tanah liat berpotensi meninggalkan residu dalam jumlah besar setelah proses pembakaran, karena tanah liat tergolong sebagai senyawa anorganik.

Oleh karena itu, proses pembakaran biopellet hasil karbonisasi cenderung menghasilkan kadar abu yang tinggi sebagai residu pembakaran. Kadar abu yang tinggi turut memengaruhi efisiensi panas selama pembakaran, karena akumulasi abu yang tidak terbakar dapat menghambat transfer panas dan menurunkan suhu pembakaran.

Hasil interaksi antara komposisi bahan baku dan persentase perekat berdasarkan uji DMRT pada taraf signifikansi 5% ditampilkan pada Tabel 7. Tabel tersebut menunjukkan bahwa seluruh kombinasi perlakuan interaksi

antara komposisi bahan dan persentase perekat memberikan perbedaan yang signifikan terhadap nilai kadar abu biopellet karbonisasi. Perlakuan K3P1, yang terdiri dari 70% tongkol jagung, 10% batang jagung, dan 20% daun jati dengan penambahan 10% perekat tanah liat, menghasilkan kadar abu terendah sebesar 20,38%, sehingga dianggap sebagai perlakuan terbaik dalam konteks ini. Sebaliknya, perlakuan K1P3 dengan komposisi 50% tongkol jagung, 20% batang jagung, dan 30% daun jati serta 30% perekat menunjukkan kadar abu tertinggi, yaitu sebesar 34,24%.

Tabel 7. Pengaruh interaksi komposisi bahan dan persentase perekat (KP) terhadap kadar abu biopellet karbonisasi

Perlakuan	Hasil Uji DMRT
K1P1	24,00 ^c
K1P2	28,20 ^e
K1P3	34,24 ⁱ
K2P1	22,68 ^b
K2P2	29,01 ^f
K2P3	32,28 ^h
K3P1	20,38 ^a
K3P2	26,01 ^d
K3P3	31,35 ^g

Keterangan: Notasi huruf yang sama menunjukkan bahwa perbedaan antar nilai tidak signifikan berdasarkan uji DMRT pada taraf 5%.

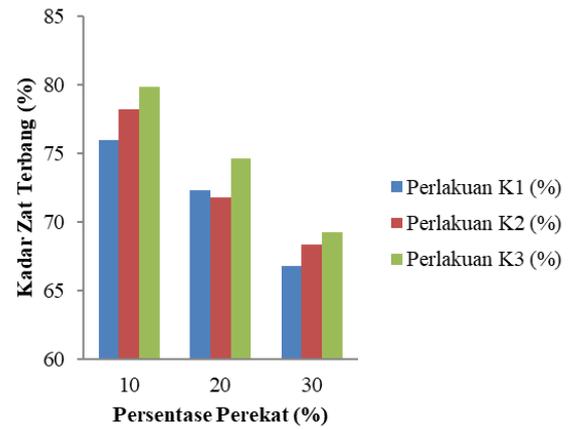
Kadar Zat Terbang

Kandungan zat terbang yang tinggi dalam biopellet karbonisasi dapat menghasilkan emisi asap yang berlebih saat proses pembakaran, yang berpotensi memberikan dampak negatif terhadap kesehatan manusia maupun lingkungan. Menurut (Ngene *et al.*, 2024) menyatakan bahwa penambahan tanah liat pada pembuatan biobriket atau biopellet dapat mengurangi kandungan emisi, sehingga hasil akhir dari kadar zat terbang akan berkurang. Proses karbonisasi pada bahan baku turut berperan dalam menurunkan kadar zat terbang pada biopellet. Rata-rata kandungan zat terbang dari biopellet hasil karbonisasi yang menggunakan kombinasi bahan baku daun jati, tongkol jagung, dan batang jagung dengan penambahan perekat tanah liat disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Rata-rata kandungan volatil dari biopelet hasil proses karbonisasi

No	Kombinasi Perlakuan	Rata-rata (%)
1	K1P1	76,00
2	K1P2	72,32
3	K1P3	66,82
4	K2P1	78,19
5	K2P2	71,83
6	K2P3	68,40
7	K3P1	79,88
8	K3P2	74,64
9	K3P3	69,26
Rata-rata		73,04

Tabel 8 menampilkan data bahwa kombinasi perlakuan K1P3 (50% tongkol jagung, 20% batang jagung, 30% daun jati dengan perekat tanah liat 30% memberikan nilai rata-rata untuk kadar zat terbang yang paling rendah yaitu sebesar 66,82%. Sedangkan untuk kombinasi perlakuan K3P1 (70% tongkol jagung, 10% batang jagung, 20% daun jati dengan perekat 10%) memberikan hasil nilai rata-rata untuk kadar zat terbang tertinggi yaitu sebesar 79,88%. Berdasarkan data rata-rata untuk nilai kadar zat terbang yang telah disajikan pada Tabel 8 menunjukkan bahwa semua kombinasi perlakuan telah memenuhi standar yang telah ditetapkan oleh SNI 8021:2014 dengan nilai ketetapan yaitu maksimum sebesar 80% untuk nilai kadar zat terbang, nilai rata-rata zat terbang untuk semua perlakuan yaitu berkisar angka 66,82% hingga 79,88%. Grafik hubungan antara persentase perekat dan komposisi bahan baku terhadap kadar zat terbang biopelet karbonisasi disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hubungan antara persentase perekat dan komposisi bahan baku terhadap kadar zat terbang biopelet karbonisasi

Diagram batang yang disajikan pada Gambar 5 menampilkan hasil nilai kadar zat terbang yang semakin rendah nilainya seiring dengan bertambah nilai persentase perekat yang digunakan. Sesuai yang dikatakan (Yanti *et al.*, 2022) menyebutkan bahwa kadar zat terbang dipengaruhi oleh konsentrasi perekat yang digunakan. Tingginya kandungan zat terbang pada biopelet karbonisasi dapat menyebabkan terbentuknya asap selama proses pembakaran berlangsung, sebaliknya apabila nilai kadar zat terbang semakin rendah maka asap yang ditimbulkan dalam proses pembakaran semakin sedikit. Zat terbang yang tinggi maka biopelet akan lebih mudah dalam proses pembakaran.

Tabel 9 menyajikan hasil uji DMRT pada taraf signifikansi 5% terhadap interaksi antara komposisi bahan baku dan persentase perekat (KP) terhadap nilai kadar zat terbang. Tabel 9. Pengaruh interaksi antara variasi komposisi bahan baku dan proporsi perekat terhadap kadar zat terbang pada biopelet hasil karbonisasi

Perlakuan	Hasil Uji DMRT
K1P1	76,00 ^g
K1P2	72,32 ^e
K1P3	66,82 ^a
K2P1	78,19 ^h
K2P2	71,83 ^d
K2P3	68,40 ^b
K3P1	79,88 ⁱ
K3P2	74,64 ^f
K3P3	69,26 ^c

Keterangan: Notasi huruf yang sama menunjukkan bahwa perbedaan antar nilai tidak signifikan berdasarkan uji DMRT pada taraf 5%.

Hasil analisis DMRT pada taraf signifikansi 5% yang disajikan dalam Tabel 9 menunjukkan bahwa seluruh kombinasi perlakuan antara komposisi bahan baku (K) dan persentase perekat (P) memberikan pengaruh yang nyata terhadap kadar zat terbang biopelet hasil karbonisasi. Perlakuan K1P3, yang terdiri atas 50% tongkol jagung, 20% batang jagung, dan 30% daun jati dengan penambahan 30% perekat tanah liat, menghasilkan kadar zat terbang terendah, yaitu sebesar 66,82%, dan dapat dikategorikan sebagai perlakuan terbaik dalam menurunkan kadar zat terbang. Sebaliknya, perlakuan K3P1 dengan komposisi 70% tongkol jagung, 10% batang jagung, dan 20% daun jati serta penggunaan 10% perekat tanah liat menunjukkan nilai kadar zat terbang tertinggi, yaitu sebesar 79,88%.

Laju Pembakaran

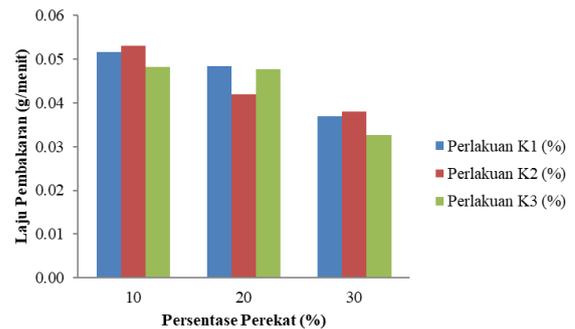
Menurut (Ristianingsih *et al.*, 2015) menyatakan bahwa tingginya kecepatan laju pembakaran berkontribusi terhadap percepatan penurunan massa biopelet selama proses pembakaran berlangsung. Nilai laju pembakaran yang besar menyebabkan nyala biopelet karbonisasi semakin singkat. Laju pembakaran diperoleh dengan membandingkan massa biopelet yang terbakar dengan waktu pembakaran biopelet sampai menjadi abu. Nilai rata-rata laju pembakaran biopelet karbonisasi yang dihasilkan dari kombinasi bahan baku daun jati, tongkol jagung, dan batang jagung dengan penambahan perekat tanah liat disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10. Nilai rata-rata laju pembakaran biopelet karbonisasi

No	Kombinasi Perlakuan	Rata-rata (g/menit)
1	K1P1	0,52E-1
2	K1P2	0,48E-1
3	K1P3	0,37E-1
4	K2P1	0,53E-1
5	K2P2	0,42E-1

6	K2P3	0,38E-1
7	K3P1	0,48E-1
8	K3P2	0,48E-1
9	K3P3	0,33E-1

Tabel 10 memperlihatkan bahwa perlakuan K3P3, yang terdiri atas komposisi bahan baku 70% tongkol jagung, 10% batang jagung, dan 20% daun jati dengan penambahan perekat tanah liat sebesar 30%, menghasilkan laju pembakaran biopelet karbonisasi terendah yaitu sebesar 0,33E-1 g/menit. Sebaliknya, perlakuan K2P1, dengan komposisi bahan baku 60% tongkol jagung, 15% batang jagung, dan 25% daun jati serta penggunaan perekat sebesar 10%, menunjukkan nilai laju pembakaran tertinggi yakni sebesar 0,53E-1 g/menit. Visualisasi hubungan antara variasi persentase perekat dan komposisi bahan baku terhadap laju pembakaran biopelet karbonisasi dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Hubungan antara persentase perekat dan komposisi bahan baku terhadap laju pembakaran biopelet karbonisasi

Gambar 6 mengilustrasikan bahwa peningkatan persentase perekat yang digunakan cenderung menurunkan laju pembakaran biopelet karbonisasi. Hal ini berkaitan dengan nilai kadar air biopelet karbonisasi yang berbanding terbalik dengan nilai laju pembakaran. Persentase perekat yang rendah menyebabkan rongga udara pada biopelet semakin tinggi, sehingga mempercepat laju pembakaran biopelet. Persentase perekat yang tinggi menyebabkan rongga udara biopelet semakin kecil dan memperlambat laju pembakaran biopelet.

Semakin sedikit jumlah perekat yang digunakan maka akan terasa lebih panas dan

pembakaran lebih merata jika dibandingkan dengan perekat dengan jumlah yang tinggi pada saat proses pembakaran biopelet karbonisasi. Warna dari sisa pembakaran biopelet karbonisasi akan semakin pekat dengan bertambahnya jumlah persentase perekat, mulai dari warna abu-abu hingga kuning gelap. Fenomena tersebut disebabkan oleh meningkatnya kandungan senyawa anorganik yang tidak mudah terbakar seiring dengan peningkatan persentase perekat.

Pengaruh interaksi antara komposisi bahan baku dan persentase perekat (KP) terhadap laju pembakaran biopelet karbonisasi berdasarkan hasil uji DMRT pada taraf signifikansi 5% ditampilkan pada Tabel 11.

Tabel 11. Pengaruh interaktif antara variasi komposisi bahan baku dan persentase perekat terhadap laju pembakaran biopelet hasil karbonisasi

Perlakuan	Hasil Uji DMRT
K1P1	0,52E-1 ^c
K1P2	0,48E-1 ^c
K1P3	0,37E-1 ^{ab}
K2P1	0,53E-1 ^c
K2P2	0,42E-1 ^b
K2P3	0,38E-1 ^{ab}
K3P1	0,48E-1 ^c
K3P2	0,48E-1 ^c
K3P3	0,33E-1 ^a

Keterangan: Notasi huruf yang sama menunjukkan bahwa perbedaan antar nilai tidak signifikan berdasarkan uji DMRT pada taraf 5%.

Tabel 11 menyajikan hasil uji DMRT pada taraf signifikansi 5% terhadap interaksi antara komposisi bahan baku dan persentase perekat (KP) terhadap laju pembakaran biopelet karbonisasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh kombinasi perlakuan tidak memberikan perbedaan yang signifikan terhadap nilai laju pembakaran. Nilai laju pembakaran terendah diperoleh pada perlakuan K3P3, yakni kombinasi bahan baku terdiri dari 70% tongkol jagung, 10% batang jagung, dan 20% daun jati dengan penambahan perekat tanah liat sebesar 30%, yaitu sebesar 0,33E-1 g/menit. Sebaliknya, nilai laju pembakaran tertinggi diperoleh pada perlakuan K2P1 dengan komposisi bahan baku 60% tongkol jagung, 15% batang jagung, dan

25% daun jati serta perekat sebesar 10%, yaitu sebesar 0,53E-1 g/menit.

Daya Tahan

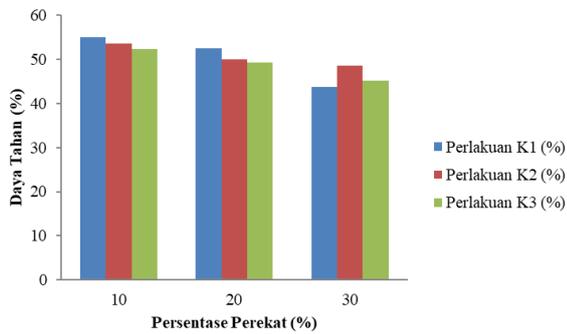
Pengujian daya tahan dilakukan untuk mengevaluasi ketahanan mekanis biopelet karbonisasi terhadap benturan. Uji ini bertujuan untuk menilai sejauh mana kekuatan fisik biopelet dalam menahan gaya benturan akibat dijatuhkan dari ketinggian tertentu, serta untuk mengukur persentase partikel yang mengalami kerusakan atau terlepas sebagai akibat dari perlakuan tersebut (Sarker *et al.*, 2023). Banyaknya jumlah partikel yang lepas dari biopelet karbonisasi akibat benturan, artinya hasil dari biopelet karbonisasi yang sudah dibuat tidak tahan terhadap benturan. Rata-rata nilai ketahanan mekanis biopelet karbonisasi yang diformulasikan dari kombinasi bahan baku daun jati, tongkol jagung, dan batang jagung dengan penambahan perekat tanah liat disajikan pada Tabel 12.

Tabel 12. Rata-rata ketahanan mekanis biopelet hasil proses karbonisasi

No	Kombinasi Perlakuan	Rata-rata (%)
1	K1P1	55,03
2	K1P2	52,48
3	K1P3	43,72
4	K2P1	53,50
5	K2P2	50,02
6	K2P3	48,58
7	K3P1	52,23
8	K3P2	49,18
9	K3P3	45,18
Rata-rata total		49,99%

Tabel 12 menyajikan hasil pengujian ketahanan mekanis biopelet karbonisasi berdasarkan kombinasi perlakuan bahan baku dan persentase perekat. Perlakuan K1P3, yang terdiri dari 50% tongkol jagung, 20% batang jagung, dan 30% daun jati dengan tambahan 30% perekat tanah liat, menunjukkan nilai ketahanan paling rendah sebesar 43,72%. Sebaliknya, perlakuan K1P1 dengan komposisi bahan baku yang sama namun hanya menggunakan 10% perekat tanah liat menghasilkan nilai ketahanan tertinggi sebesar

55,03%. Hubungan antara persentase perekat dan komposisi bahan baku terhadap nilai ketahanan biopelet karbonisasi dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Korelasi antara persentase perekat dan komposisi bahan baku terhadap ketahanan mekanis biopelet hasil karbonisasi

Gambar 7 menunjukkan bahwa semakin banyak persentase perekat maka tingkat ketahanan biopelet karbonisasi semakin meningkat karena jumlah partikel yang lepas atau hilang semakin kecil. Semakin tinggi tingkat kerapatan biopelet karbonisasi maka nilai daya tahan atau bagian yang hilang semakin rendah. Hal ini sesuai dengan yang disampaikan oleh (Zamiri *et al.*, 2024) bahwa kerapatan yang rendah menyebabkan banyaknya pori-pori pada biopelet sehingga saat mengalami uji ketahanan maka biopelet yang dijatuhkan akan patah.

Tabel 13 menyajikan hasil analisis uji DMRT pada taraf signifikansi 5% yang menunjukkan pengaruh faktor persentase perekat (P) terhadap nilai ketahanan mekanis biopelet karbonisasi.

Tabel 13. Pengaruh persentase perekat (P) terhadap nilai daya tahan biopelet karbonisasi

Perlakuan	Hasil Uji DMRT
P1	53,59 ^b
P2	50,56 ^{ab}
P3	45,83 ^a

Keterangan: Notasi huruf yang sama menunjukkan bahwa perbedaan antar nilai tidak signifikan berdasarkan uji DMRT pada taraf 5%.

Hasil dari uji DMRT taraf 5% yang disajikan pada Tabel 13 memberikan hasil bahwa perlakuan persentase perekat 10% (P1) dan perekat 20% (P2) berbeda tidak nyata

terhadap nilai daya tahan biopelet karbonisasi. Perlakuan P3 dimana persentase perekat sebanyak 30% merupakan pilihan terbaik untuk daya tahan karena memiliki nilai daya tahan paling rendah diantara perlakuan lainnya yaitu sebesar 45,83%.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut: (1) Karakteristik biopelet karbonisasi yang dibuat dari kombinasi bahan baku daun jati, tongkol jagung, dan batang jagung dengan penambahan perekat tanah liat menunjukkan rentang nilai sebagai berikut: kerapatan sebesar 0,49–0,56 g/cm³, kadar air 5,34–6,82%, kadar abu 20,38–34,24%, kadar zat terbang 66,82–79,88%, laju pembakaran 0,03–0,05 g/menit, dan daya tahan mekanik 43,72–55,03%. (2) Komposisi bahan baku memberikan pengaruh yang sangat nyata terhadap parameter kerapatan, kadar air, kadar abu, dan kadar zat terbang, namun tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap laju pembakaran dan daya tahan mekanis biopelet karbonisasi. Sementara itu, variasi persentase perekat memberikan pengaruh yang sangat nyata terhadap hampir seluruh parameter, kecuali pada parameter daya tahan yang hanya menunjukkan pengaruh nyata. (3) Produk biopelet karbonisasi yang dihasilkan telah memenuhi standar mutu SNI 8021-2014 pada parameter kadar air dan kadar zat terbang. Namun, parameter kerapatan dan kadar abu belum sesuai dengan standar yang ditetapkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alsaqoor, S., Borowski, G., Alahmer, A., & Beithou, N. (2022). Using of adhesives and binders for agglomeration of particle waste resources. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, 16(3), 124-135.
- Bumanis, G., Korjakins, A., & Bajare, D. (2022). Environmental benefit of alternative binders in construction industry: life cycle assessment. *Environments*, 9(1), 6.
- Butler, J. W., Skrivan, W., & Lotfi, S. (2023). Identification of optimal binders for

- torrefied biomass pellets. *Energies*, 16(8), 3390.
- Cui, X., Yang, J., & Wang, Z. (2021). A multi-parameter optimization of the bio-pellet manufacturing process: Effect of different parameters and different feedstocks on pellet characteristics. *Biomass and Bioenergy*, 155, 106299.
- Duan, F., Yang, F., Mu, B., Zhu, Y., & Wang, A. (2024). Production of functional materials from clay minerals and plants for natural resource utilization and sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 143586.
- Harlina, A.C., Ropiudin, & Ritonga, A.M. (2021). Pengaruh Kadar Perekat Molase dan Lama Pengeringan terhadap Proses Pembuatan Biobriket dari Tempurung Kelapa dan Sekam Padi. *Journal of Agricultural and Biosystem Engineering Research*, 2(2): 19-27.
- He, H., Wang, Y., Sun, Y., Sun, W., & Wu, K. (2024). From raw material powder to solid fuel pellet: A state-of-the-art review of biomass densification. *Biomass and Bioenergy*, 186, 107271.
- Herjunata, R., Noviadini, S.R., Kholisoh, S.D. (2020). Pengaruh Variasi Perekat pada Briket Berbahan Limbah Tempurung Kelapa. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan"*, 1415 Juli, Yogyakarta. P. 1.
- Iryani, D. A., Rakaseri, I., Azhar, A., Haryanto, A., Hidayat, W., & Hasanudin, U. (2023, May). Thermogravimetric assessment for combustion characteristic of torrefied pellet biomass from agricultural solid waste. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1187, No. 1, p. 012019). IOP Publishing.
- Iskandar, N., Sulardjaka, S., Munadi, M., Nugroho, S., Muhamadin, R. C., & Fitriyana, D. F. (2020, April). The effect of water content and binder made from cassava starch and densification pressure on the quality of rice husk bio-pellets. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1517, No. 1, p. 012019). IOP Publishing.
- Jha, M. K., & Dev, M. (2024). Impacts of Climate Change. In *Smart Internet of Things for Environment and Healthcare* (pp. 139-159). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Kowalski, Z., Makara, A., Kulczycka, J., Generowicz, A., Kwaśnicki, P., Ciula, J., & Gronba-Chyła, A. (2024). Conversion of sewage sludge into biofuels via different pathways and their use in agriculture: a comprehensive review. *Energies*, 17(6), 1383.
- Mortadha, H., Kerrouchi, H. B., Al-Othman, A., & Tawalbeh, M. (2025). A Comprehensive Review of Biomass Pellets and Their Role in Sustainable Energy: Production, Properties, Environment, Economics, and Logistics. *Waste and Biomass Valorization*, 1-33.
- Ngene, G. I., Bouesso, B., González, M., & Nzihou, A. (2024). A review on biochar briquetting: Common practices and recommendations to enhance mechanical properties and environmental performances. *Journal of Cleaner Production*, 143193.
- Nuryawan, A., Syahputra, R. S., Azhar, I., & Risnasari, I. (2021, November). Basic properties of the mangrove tree branches as a raw material of wood pellets and briquettes. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 891, No. 1, p. 012005). IOP Publishing.
- Qanitah, Akbar, Y. D.F., Ulma, Z., & Hananto, Y. (2023). Peningkatan Kualitas Briket Ampas Kopi Menggunakan Perekat Kulit Jeruk Melalui Metode Torefaksi Terbaik. *Journal of Engineering Science and Technology (JESTY)*, 1(1): 32-43.
- Ristianingsih, Y., Ulfa, A., & Syafitri, R. (2015). Pengaruh Suhu dan Konsentrasi Perekat terhadap Karakteristik Briket Bioarang Berbahan Baku Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Proses Pirolisis. *Konversi*, 4(2): 45-51.
- Ropiudin & Syska, K. (2022). Quality Analysis of Biobrikette from Carbonized Coconut Shell and Cassava Peel with Cassava Flour Adhesive. *Journal of Agricultural and Biosystem Engineering Research*, 3(1): 19-38.

- Ropiudin & Syska, K. (2023). Karakterisasi Kualitas Biobriket Campuran Tempurung Kelapa dan Sekam Padi dengan Variasi Perekat dan Ukuran Serbuk. *Journal of Agricultural and Biosystem Engineering Research*, 3(2): 13-26.
- Ropiudin, Dwiasi, D.W., Sudarmaji, A., & Syska, K. (2023). Pelatihan Pembuatan Biobriket sebagai Sumber Energi Pengolahan Gula Kelapa Kristal pada UMKM Gula Kelapa Kristal Desa Sunyalangu Kabupaten Banyumas Nanggroe: Jurnal Pengabdian Cendikia, 2(7):10-19.
- Sanchez, P. D. C., Aspe, M. M. T., & Sindol, K. N. (2022). An overview on the production of bio-briquettes from agricultural wastes: methods, processes, and quality. *Journal of Agricultural and Food Engineering*, 1, 0036.
- Sarker, T. R., Nanda, S., Meda, V., & Dalai, A. K. (2023). Densification of waste biomass for manufacturing solid biofuel pellets: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(1), 231-264.
- Suhasman, S., Detti, Y. A., Putra, P. K. T., Ikhlās, K., Arisandi, H. E. R. U., Rachmadona, N. O. V. A., Saptadi, D., & Gustan, P. (2024). Biopellets from Four Shrub Species for Co-firing in East Indonesia. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 52(6), 539-554.
- Syska, K., & Ropiudin, R. (2023a). Study of "Green Manufacturing" on Rural Crystal Coconut Sugar SMEs. *Jurnal Keteknikaan Pertanian Tropis dan Biosistem*, 11(1), 13–27.
- Syska, K., & Ropiudin, R. (2023b). Drying Characteristics and Hedonic Quality of Crystal Coconut Sugar using Rotating Rack Type Dryer with Energy Source from Thermal Waste and Biomass. *Jurnal Agritechno*, 16(1), 19–28.
- Syska, K., & Ropiudin. (2020). Perpindahan Panas pada Pengering Tipe Drum Berputar pada Kondisi Tanpa Beban. *Agroteknika*, 3(1): 1-15.
- Tumuluru, J. S., & Fillerup, E. (2020). Briquetting characteristics of woody and herbaceous biomass blends: Impact on physical properties, chemical composition, and calorific value. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 14(5), 1105-1124.
- Yanti, R.N., Ratnaningsih, A.T., & Ikhsani, H. (2022). Pembuatan Bio-Briket dari Produk Pirolisis Biochar Cangkang Kelapa Sawit sebagai Sumber Energi Alternatif. *Jurnal Ilmiah Pertanian*, 19(1): 11-18.