

Bioprocessing of Coconut Shell, Coffee Grounds, and Peat Fiber Wastes for Renewable Energy Production Rekayasa Bioproses Limbah Tempurung Kelapa, Ampas Kopi, dan Serat Gambut untuk Produksi Energi Terbarukan

Dhymas Sulistyono Putro^{1*}, Andhira Trianingtyas¹, Rizki Auliansyah Putra¹, Bunga Resa Hartati¹, Radhiatunnisa S. Samad¹, Ryco Prawira Purba²

¹Universitas Palangka Raya, Palangka Raya, Indonesia, ²Universitas Muhammadiyah Palangkaraya, Palangka Raya, Indonesia,
*surel: dhymassulistyono95@gmail.com

ABSTRACT

The increase in global energy demand and the accumulation of organic waste drive the need to utilize biomass as a renewable alternative energy. This study aims to evaluate the physicochemical characteristics, specifically moisture content and ash content, of biochar made from coconut shells, coffee grounds, and peat fiber based on the commercial briquette quality standard SNI 01-6235-2000. The methodological stages used include the carbonization (pyrolysis) process, particle size reduction, dough formulation using starch and lime binders, molding, and drying. The analysis results indicate that coffee grounds and coconut shells have the lowest average ash contents, successfully meeting the maximum SNI limit ($\leq 8\%$) and making them highly feasible to be substituted as energy briquettes. Conversely, peat fiber produces a high ash content residue, making it less efficient as a fuel, but highly prospective to be repurposed as biochar (soil conditioner) in the agricultural sector. All initial biomass samples recorded a high moisture content, necessitating the optimization of post-molding thermal drying to meet the standard.

Keywords:

Briquette,
Biochar,
Pyrolysis,
Biomass,
Physicochemical

Received: July 14th 2026
Reviewed: July 16th 2026
Published: July 24th 2026

ABSTRAK

Peningkatan kebutuhan energi dan akumulasi limbah organik mendorong perlunya pemanfaatan biomassa sebagai energi alternatif terbarukan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi karakteristik fisikokimia, khususnya kadar air dan kadar abu dari bioarang berbahan dasar tempurung kelapa, ampas kopi, dan serat gambut berdasarkan standar mutu briket komersial SNI 01-6235-2000. Tahapan metode yang digunakan meliputi proses karbonisasi (pirolisis), pengecilan ukuran partikel, formulasi adonan dengan perekat kanji dan kapur, pencetakan, serta pengeringan. Hasil analisis menunjukkan bahwa ampas kopi dan tempurung kelapa memiliki rata-rata kadar abu terendah, sehingga memenuhi standar batas maksimal SNI ($\leq 8\%$) dan sangat layak disubstitusikan sebagai briket energi. Sebaliknya, serat gambut menghasilkan residu kadar abu yang tinggi, sehingga kurang efisien sebagai bahan bakar, namun sangat prospektif dialihfungsikan sebagai biochar (kondisioner tanah) pada sektor pertanian. Seluruh sampel biomassa awal mencatatkan kadar air yang tinggi, maka menuntut optimalisasi pengeringan termal pasca-pencetakan agar memenuhi standar.

Kata Kunci:

Briket,
Bioarang,
Pirolisis,
Biomassa,
Fisikokimia

Diterima: 14 Juli 2026
Direview: 16 Juli 2026
Dipublikasi: 24 Juli 2026



PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan energi global yang diiringi oleh menipisnya cadangan bahan bakar fosil menuntut adanya transisi menuju sumber energi alternatif yang terbarukan dan ramah lingkungan. Di sisi lain, akumulasi limbah organik padat, baik dari sektor domestik, industri perkebunan, maupun kehutanan, masih menjadi tantangan serius dalam manajemen lingkungan [1]. Valorisasi limbah biomassa menjadi bioarang atau briket merupakan salah satu pendekatan rekayasa bioproses yang sangat prospektif. Pendekatan ini tidak hanya menawarkan solusi reduksi volume limbah (waste minimization), tetapi juga menghasilkan produk bernilai tambah yang dapat diaplikasikan di sektor energi maupun pertanian berkelanjutan [2]. Beberapa material organik yang ketersediaannya sangat melimpah di Indonesia adalah tempurung kelapa, ampas kopi, dan serat gambut. Secara teoretis, biomassa yang kaya akan selulosa, hemiselulosa, dan lignin berpotensi tinggi untuk dikonversi menjadi karbon aktif atau bioarang melalui proses pirolisis [3]. Namun demikian, kelayakan teknis dari masing-masing jenis limbah biomassa sangat bergantung pada karakteristik fisikokimia bawaannya, terutama menyangkut kadar air (moisture content) dan kadar abu (ash content). Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI 01-6235-2000) tentang Mutu Briket Arang Kayu, batas maksimal yang diizinkan untuk kadar air dan kadar abu masing-masing adalah 8%.

Tingginya kadar air pada biomassa merupakan kendala teknis utama dalam produksi briket energi. Sebagian besar bioarang memiliki sifat higroskopis bawaan akibat tingginya porositas dan luas permukaan spesifik material, yang menyebabkannya sangat mudah menyerap uap air dari lingkungan bersuhu lembab [4]. Jika briket memiliki kadar air di atas standar, efisiensi termal akan menurun drastis karena sebagian besar energi panas (nilai kalor) akan terkonsumsi lebih dahulu untuk fase penguapan air (laten panas) sebelum fase pembakaran sejati terjadi [5]. Selain parameter kelembaban, kadar abu yang merepresentasikan residu mineral inorganik (seperti silika, kalium, dan kalsium) pasca-pembakaran juga menjadi penentu arah fungsionalitas bioarang. Dalam konteks konversi energi termal, tingginya kadar abu sangat tidak diharapkan karena akan menurunkan nilai kalor, memicu kerak (slagging), dan menghasilkan residu pembakaran yang mengganggu operasional sistem [6]. Sebaliknya, dari perspektif rekayasa lingkungan dan agronomi, biomassa dengan kadar abu tinggi (kaya mineral dan bersifat basa) justru sangat bernilai jika direkayasa menjadi biochar (kondisioner/amelioran tanah). Aplikasi biochar jenis ini ke dalam tanah terbukti mampu menetralkan pH tanah masam serta secara signifikan meningkatkan Kapasitas Tukar Kation (KTK), yang berujung pada perbaikan struktur tanah dan retensi unsur hara [7] – [9]. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan mengkarakterisasi sifat fisikokimia dari limbah tempurung kelapa, ampas kopi, dan serat gambut. Analisis komparatif ini menjadi sangat krusial untuk memetakan spesifikasi dan fungsionalitas optimal dari masing-masing material; apakah lebih tepat disubstitusikan sebagai briket energi dengan nilai kalor tinggi, atau dialihfungsikan sebagai biochar amelioran untuk perbaikan kualitas tanah.

METODOLOGI

Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam tahapan preparasi, karbonisasi (pirolisis), pencetakan, hingga karakterisasi fisikokimia meliputi instrumen fabrikasi mekanik dan termal sebagai berikut:

- Reaktor Pirolisis Sederhana (Drum Pembakaran): Digunakan sebagai reaktor termal tertutup untuk memfasilitasi proses karbonisasi biomassa (tempurung kelapa dan serat gambut) dalam kondisi minim oksigen (anaerobic/partial oxidation).
- Oven Laboratorium: Berfungsi sebagai ruang pengeringan termal (thermal drying chamber) pasca-pencetakan untuk menurunkan kadar air briket secara presisi pada suhu dan waktu yang terkontrol.
- Kompor dan Wajan/Panci: Digunakan sebagai media pemanas terbuka untuk metode karbonisasi penyangraian (roasting), yang secara spesifik diaplikasikan pada preparasi biomassa ampas kopi guna menguapkan air secara cepat.

- Ayakan (Sieve) Ukuran 40–80 Mesh: Instrumen purifikasi fisik untuk menyeragamkan distribusi ukuran partikel (particle size distribution) bioarang pasca-penumbukan, guna memastikan ikatan antar-partikel yang homogen saat briket dicetak.
- Cetakan Silindris Manual (Pipa ½ inch, tinggi 5 cm): Matriks cetak untuk mengekstrusi dan memadatkan campuran bioarang menjadi bentuk silinder dengan densitas dan dimensi yang terstandarisasi.
- Timbangan Digital Analitik: Mengukur massa secara presisi, meliputi penimbangan bahan baku awal, perekat, berat basah briket pasca-cetak, berat kering konstan pasca-oven, hingga sisa abu (ash residue).
- Alat Penunjang Tambahan: Meliputi penumbuk/mortar sederhana (untuk reduksi ukuran partikel arang kasar), baskom pencampur (mixing vessel), pengaduk, aluminium foil (sebagai alas konduksi termal merata di dalam oven), dan wadah kedap udara (plastik ziplock) untuk mencegah higroskopisitas bahan.

Bahan yang digunakan diklasifikasikan menjadi biomassa prekursor (sumber karbon stasioner) dan matriks pengikat (binder) beserta aditifnya:

- Biomassa Prekursor:
Sebagai Sumber karbon stasioner yang akan dikonversi menjadi bioarang penyedia nilai kalor terdiri dari 3 jenis, yaitu limbah tempurung kelapa, limbah ampas kopi, dan serat gambut
- Tepung Kanji/Tapioka: Berfungsi sebagai zat pengikat organik (organic binder). Polimer amilopektin di dalam tepung kanji bertindak sebagai perekat adhesif yang menjembatani partikel-partikel bioarang agar menyatu menjadi matriks briket yang rigid, kompak, dan tahan terhadap benturan fisik (kuat tekan).
- Kapur (Kalsium Karbonat/CaO): Bertindak sebagai bahan aditif inorganik. Penambahan kapur berfungsi sebagai agen penyerap kelembaban (mengurangi kadar air), penstabil pH (bersifat basa), inhibitor pertumbuhan miselium jamur selama masa penyimpanan, serta membantu menekan emisi asap berlebih saat briket dibakar.
- Aquadest: Pelarut universal yang digunakan dalam fase pemanasan tepung kanji untuk fase gelatinisasi perekat, dipilih karena kemurniannya sehingga tidak menambahkan kontaminan inorganik pada briket

Prosedur Penelitian

Prosedur pembuatan briket dilaksanakan melalui tahapan sistematis sebagai berikut:

- Persiapan dan Pengeringan Bahan Baku: Seluruh sampel biomassa (tempurung kelapa, ampas kopi, dan serat gambut) dibersihkan dari kotoran pengotor lalu dijemur di bawah sinar matahari untuk meminimalkan kadar air awal.
- Proses Karbonisasi (Pirolisis): Bahan baku dimasukkan ke dalam drum pembakaran tertutup. Proses pembakaran dijalankan secara tidak sempurna hingga biomassa terkarbonisasi sepenuhnya menjadi arang hitam pekat dan mengeluarkan aroma gosong yang khas selama 7 menit.
- Pengecilan Ukuran (Reduksi Ukuran Partikel): Arang yang terbentuk ditumbuk hingga halus, kemudian diayak menggunakan saringan berukuran 40–80 mesh guna menjamin keseragaman pori dan ikatan antar-partikel saat dicetak.
- Pencampuran Adonan (Formulasi): Serbuk bioarang halus ditimbang seberat 100 gram untuk masing-masing variasi bahan baku. Serbuk arang dicampur dengan suspensi perekat yang terbuat dari 10 gram tepung tapioka dan 10 gram kapur yang telah dilarutkan dalam air

panas. Adonan diaduk secara manual di dalam baskom hingga membentuk massa pasta yang homogen dan kohesif.

- Pencetakan dan Pemadatan: Adonan dimasukkan ke dalam cetakan pipa PVC ½ inch dan diberi tekanan mekanis secara manual agar briket menjadi padat, seragam, dan tidak mudah hancur.
- Proses Pengeringan Akhir: Briket yang telah dicetak dikeluarkan dari pipa, dilapisi aluminium foil, lalu dikeringkan menggunakan oven pemanas laboratorium dalam durasi waktu selama 24 jam.
- Karakterisasi Mutu Produk: Pengujian parameter fisik briket dilakukan dengan mengukur berat basah, berat kering setelah pengeringan oven, perhitungan persentase kadar air dengan menggunakan persamaan (1) dan persentase kadar abu residu menggunakan persamaan (2), dimana kedua berdasarkan SNI 01-6235-2000.

$$\text{Kadar Air} = \frac{\text{Berat Basah} - \text{Berat Kering}}{\text{Berat Basah}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{Kadar Abu} = \frac{\text{Sisa Abu}}{\text{Berat Kering}} \times 100\% \quad (2)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penentuan kualitas bioarang atau briket, karakteristik fisikokimia bahan baku sangat menentukan kelayakan produk akhir sebagai sumber energi alternatif. Bioarang pada dasarnya adalah bahan padat berpori hasil pirolisis biomassa (pembakaran tanpa oksigen) yang mengubah limbah organik menjadi arang dengan kandungan karbon tinggi [10]. Berdasarkan pengujian yang dilakukan terhadap tiga sampel limbah (Ampas Kopi, Serat Gambut, dan Tempurung Kelapa), evaluasi kualitas bioarang merujuk pada Standar Nasional Indonesia (SNI 01-6235-2000) yang mengatur syarat mutu briket komersial. Berdasarkan pengujian laboratorium terhadap tiga jenis sampel limbah organik yaitu Ampas Kopi, Serat Gambut, dan Tempurung Kelapa diperoleh data karakteristik fisikokimia sebagaimana dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Kadar Air dan Kadar Abu

Bahan	Berat Basah (gram)	Berat Kering (gram)	Kadar Air (%)	Sisa Abu (gram)	Kadar Abu (%)
Ampas Kopi	13	9,319	28,315	0,215	2,3
	18	12,15	32,5	0,535	4,4
	14	9,365	33,107	0,43	4,5
	14	9,676	30,886	0,403	4,16
Rata-Rata	14,75	10,1275	31,202	0,39575	3,84
Serat Gambut	14	9,08	35,143	0,994	10,9
	19	11,04	41,895	1,861	16,8
	15	9,62	35,867	1,231	12,7
	17	12,245	27,971	1,911	15,6
Rata-Rata	16,25	10,49625	35,219	1,49925	14
Tempurung Kelapa	15	11,831	21,127	0,749	6,33
	19	13,177	30,647	0,777	5,89
	17	11,077	34,841	0,668	6
	17	14,409	15,241	0,746	5,17
Rata-Rata	17	12,6235	25,464	0,735	5,8475

Kadar Air (Moisture Content)

Kadar air dalam biomassa sangat memengaruhi nilai kalor total (High Heating Value / HHV) dan efisiensi proses pembakaran. Semakin tinggi kadar air, semakin banyak energi termal yang terbuang hanya untuk menguapkan air selama proses konversi energi [11], [12]. Serat Gambut menunjukkan kadar air rata-rata tertinggi sebesar 35,219%. Tingginya nilai ini linier dengan sifat alami gambut yang memiliki porositas tinggi dan kapasitas retensi air (water holding capacity) yang masif di alam [13]. Ampas Kopi memiliki kadar air rata-rata sebesar 31,202%. Hal ini disebabkan oleh sifat ampas kopi sebagai limbah domestik/industri minuman yang mengalami kontak langsung dengan air panas selama proses ekstraksi. Tempurung Kelapa mencatatkan kadar air rata-rata terendah, yaitu 25,464%. Struktur lignoselulosa tempurung kelapa yang padat, rigid, dan hidrofobik secara alami membatasi penetrasi air ke dalam matriks seluler [14].

Berdasarkan SNI 01-6235-2000, kadar air maksimal yang diizinkan untuk produk briket bioarang adalah 8%. Pada Tabel 1 seluruh sampel biomassa masih memiliki kadar air yang sangat tinggi: Tempurung Kelapa (25,464%), Ampas Kopi (31,202%), dan Serat Gambut tertinggi pada angka 35,219%. Tingginya kadar air ini berhubungan erat dengan sifat fisik bioarang yang memiliki porositas sangat tinggi dan luasan permukaan spesifik yang besar [15] – [17]. Khususnya pada serat gambut, nilai higroskopisitas yang tinggi menyebabkannya sangat mudah menyerap kelembapan dari udara maupun lingkungan sekitarnya. Guna memenuhi standar mutu briket sebagai bahan bakar, bahan-bahan ini wajib melalui tahap purifikasi dan pengeringan (menggunakan oven laboratorium) agar kadar airnya turun memenuhi SNI dan briket dapat menyala dengan stabil.

Kadar Abu (Ash Content)

Kadar abu merepresentasikan residu anorganik (seperti silika, kalium, kalsium, dan magnesium) yang tersisa setelah proses pembakaran sempurna komponen organik. Dalam sistem termal berskala industri, kadar abu yang tinggi berpotensi menyebabkan pembentukan kerak (slagging), korosi pada dinding reaktor, dan menurunkan efisiensi pembakaran [18]. Serat Gambut menghasilkan kadar abu yang sangat tinggi, dengan rata-rata 14%. Fenomena ini terjadi karena serat gambut terakumulasi di lingkungan lahan basah yang kaya akan sedimentasi mineral bumi dan silika dari tanah [19]. Tingginya kadar abu ini menjadi tantangan besar jika serat gambut diaplikasikan langsung sebagai bahan bakar padat. Tempurung Kelapa memiliki kadar abu yang relatif rendah dan stabil di angka 5,85%. Rendahnya kadar residu anorganik ini menegaskan mengapa tempurung kelapa menjadi bahan baku superior untuk pembuatan arang aktif berkualitas tinggi yang membutuhkan kemurnian karbon tinggi [20]. Ampas Kopi menunjukkan performa terbaik dalam parameter ini dengan kadar abu terendah, yaitu 3,84%. Kandungan senyawa organik yang mendominasi ampas kopi (seperti lipid, protein, dan karbohidrat) terbakar sempurna menjadi gas CO₂ dan H₂O, menyisakan sangat sedikit komponen mineral stasioner [21].

SNI 01-6235-2000 menetapkan ambang batas maksimal kadar abu sebesar 8%, mengingat kadar abu yang terlalu dominan dapat menurunkan nilai kalori energi dari bahan bakar. Berdasarkan hasil, Ampas Kopi menghasilkan kadar abu terendah (3,84%) diikuti oleh Tempurung Kelapa (5,85%). Kedua bahan ini berstatus memenuhi syarat standar mutu SNI untuk parameter abu, menjadikannya biomassa ideal yang menghasilkan residu minim dan panas stabil. Sebaliknya, Serat Gambut memiliki kadar abu yang melampaui batas standar, yakni 14,00%. Tingginya kadar mineral pada serat gambut menyebabkannya kurang optimal jika ditujukan murni sebagai bahan bakar briket karena dapat menurunkan efisiensi nilai kalorinya. Namun demikian, biomassa berabu tinggi seperti serat gambut sangat prospektif dialihkan fungsinya menjadi kondisioner tanah (soil amendment) di sektor pertanian. Kandungan abunya yang bersifat basa (pH 8-10 akibat senyawa karbonat dan oksida logam) sangat berfungsi sebagai amelioran untuk menetralkan tanah masam dan menambah unsur hara [22].

KESIMPULAN

Tempurung Kelapa dan Ampas Kopi terbukti sebagai substituen terbaik untuk produksi briket bioarang. Keduanya memiliki kadar abu di bawah ambang batas maksimal SNI 01-6235-2000 (maks. 8%), yang berindikasi pada kemampuan menghasilkan energi panas (nilai kalor) yang optimal

dengan residu minimal. Semua bahan dasar masih memiliki kendala pada kadar air yang terlalu tinggi dikarenakan sifat higroskopis bawaan bahan berpori. Oleh karena itu, diperlukan optimalisasi teknologi pengeringan termal sebelum tahap pencetakan agar kadar air dapat ditekan di bawah 8%. Serat Gambut tidak memenuhi standar mutu sebagai briket energi karena tingginya kadar abu. Akan tetapi, secara fungsionalitas rekayasa bioproses, material ini lebih layak dikonversi menjadi biochar (amelioran/kondisioner tanah) karena tingginya mineral sisa pembakaran dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) dan menetralkan keasaman tanah pertanian.

REFERENSI

- [1] N. I. D. Arista, "Karakteristik limbah pertanian dan dampaknya: Mengapa pengelolaan ramah lingkungan penting?," *WHEM: Waste Handling and Environmental Monitoring*, vol. 1, no. 2, pp. 67-76, 2024. Link: <https://doi.org/10.61511/whem.v1i2.2024.1204>
- [2] V. S. Sikarwar, M. Zhao, P. Clough, J. Yao, X. Zhong, M. Z. Memon, N. Shah, E. J. Anthony and P. S. Fennell, "An overview of advances in biomass gasification," *Energy & Environmental Science*, vol. 9, no. 10, pp. 2939-2977, 2016. Link: <https://doi.org/10.1039/c6ee00935b>
- [3] D. F. Pisceselia, R. E. D. Putri and R. Gayatri, "Biomass-Derived Activated Carbon: Synthesis, Influencing Factors, and Applications in Environmental Remediation – A Review," *Chemical Engineering Journal Storage (CEJS)*, vol. 6, no. 2, pp. 306-325, 2026. Link: <https://doi.org/10.29103/cejs.v6i02.26954>
- [4] A. Tomczyk, Z. Sokołowska and P. Boguta, "Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects," *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, vol. 19, pp. 191-215, 2020. Link: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11157-020-09523-3>
- [5] I. Ardiansyah, A. Y. Putra and Y. Sari, "Analisis Nilai Kalor Berbagai Jenis Briket Biomassa Secara Kalorimeter," *Journal Research and Education Chemistry*, vol. 4, no. 2, pp. 120-133, 2022. Link: [https://doi.org/10.25299/jrec.2022.vol4\(2\).10735](https://doi.org/10.25299/jrec.2022.vol4(2).10735)
- [6] Y. Ruslinda, F. Husna and A. Nabila, "Karakteristik Briket dari Komposit Smapah Buah, Sampah Plastik High Density Polyethylene (HDPE) dan Tempurung Kelapa sebagai Bahan Bakar Alternati di Rumah Tangga," *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, vol. 14, no. 1, pp. 5-14, 2017. Link: <https://doi.org/10.14710/presipitasi.v14i1.5-14>
- [7] G. Murtaza, M. Usman, J. Iqbal, S. Hyder, F. Solangi, R. Iqbal, M. K. Okla, A. A. Al-Ghamdi, H. H. Elsalahy, W. Tariq and O. A. A. I. Al-Elwany, "Liming potential and characteristics of biochar produced from woody and non-woody biomass at different pyrolysis temperatures," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 11469, 2024. Link: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-61974-8>
- [8] E. Kabir, K. Kim and E. E. Kwon, "Biochar as a tool for the improvement of soil and environment," *Frontiers in Environmental Science*, vol. 11, 2023. Link: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1324533>
- [9] Iwan, "Pemanfaatan Biochar Dari Limbah Pertanian Sebagai Pembenh Tanah Untuk Meningkatkan Kapasitas Tukar Kation," *Jurnal Ilmu Agroteknologi Indonesia*, vol. 2, no. 1, pp. 27-32, 2026. Link: <https://doi.org/10.70134/jigrona.v2i1.1066>
- [10] R. E. D. Putri, D. I. Lestari, D. A. Sari, Z. P. Putri and S. Maliki, "Potential of Biomass Raw Material for Biochar Production: A Review," *Chemical Engineering Journal Storage (CEJS)*, vol. 5, no. 4, pp. 528-553, 2025. Link: <https://doi.org/10.29103/cejs.v5i04.23084>
- [11] R. W. Putri, Rahmatullah, S. Susanti, M. A. Habsyari, S. T. Aliyah and M. Wijayanti, "Karakterisasi Perbandingan Bahan Baku Sekam Padi dan Campuran Sekam Padi-Ampas Tebu terhadap Kualitas Briket," *Jurnal Teknologi Lingkungan*, vol. 25, no. 2, pp. 160-167, 2024. Link: <https://doi.org/10.55981/jtl.2024.2018>

- [12] M. Sigiyo, I. J. Alexander, J. Marbun and S. Silitonga, "Analisis Nilai Kalor, kadar Abu, dan Kadar Air Biobriket Kulit Pisang," *Jurnal ilmu Pendidikan*, vol. 12, no. 3, pp. 172-182, 2024. Link: <https://doi.org/10.31957/jipi.v12i3.3992>
- [13] A. D. Oktania, A. Kurnain and F. Razie, "Karakteristik Kimia Tanah Gambut pada Tiga Tipe Penggunaan Lahan," *Acta Solum*, vol. 2, no. 2, pp. 101-106, 2024. Link: <https://doi.org/10.20527/actasolum.v2i2.2440>
- [14] F. Bao, Z. Dong, R. Zhang, F. Qi, X. Dai and X. Qiu, "Preparation and properties of high-performance polyimide copolymer fibers containing rigid pyrimidine and benzoxazole moieties with hydrogen bonding," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 12, pp. 1143-1156, 2021. Link: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.056>
- [15] J. Kujawska, E. Wojtas and B. Charnas, "Biochar Derived from Sewage Sludge: The Impact of Pyrolysis Temperature on Chemical Properties and Agronomic Potential," *Sustainability*, vol. 16, no. 18, pp. 1-18, 2024. Link: <https://doi.org/10.3390/su16188225>
- [16] Y. Ju, K. Yu, G. Wang, W. Li, K. Zhang, S. Li, L. Guo, Y. Sun, H. Feng, P. Qiao and R. Ali, "Coupling response of the Meso–Cenozoic differential evolution of the North China Craton to lithospheric structural transformation," *Earth-Science Reviews*, vol. 223, 2021. Link: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103859>
- [17] S. S. Sahoo, V. K. Vijay, R. Chandra and H. Kumar, "Production and characterization of biochar produced from slow pyrolysis of pigeon pea stalk and bamboo," *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 3, 2021. Link: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100101>
- [18] Yuniarti, E. Megawati, A. Dewi, D. Ariyani, M. R. Vegetama and A. Sahara, "Pengaruh Suhu Terhadap Karakteristik Arang Hasil Pirolisis Kulit Kolang-Kaling (*Arenga pinnata*)," *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 8, no. 4, pp. 1020-1030, 2022. Link: <https://doi.org/10.33795/distilat.v8i4.410%20>
- [19] Y. Wang, Y. Xie, L. Qi, Y. He and H. Bo, "Synergies evaluation and influencing factors analysis of the water–energy–food nexus from symbiosis perspective: A case study in the Beijing–Tianjin–Hebei region," *Science of The Total Environment*, vol. 818, 2022. Link: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151731>
- [20] S. Hou, H. Zhang, P. Wang, M. Zhang and P. Yang, "Multiwall carbon nanotube decorated hemin/Mn-MOF towards BPA degradation through PMS activation," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 10, no. 5, 2022. Link: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108426>
- [21] R. Petlickaite, A. Jasinskas, K. Romaneckas, K. Venslauskas and M. Prapaliauskas, "Technological and Environmental Assessment of Multi-Crop Biomass Ash Application in Agriculture," *Agriculture*, vol. 16, no. 5, pp. 1-18, 2026. Link: <https://doi.org/10.3390/agriculture16050549>
- [22] P. Baraniecki, F. Latterini, W. Stefanoni, J. Frankowski, K. Wielgusz and L. Pari, "Assessment of the Working Performance of an Innovative Prototype to Harvest Hemp Seed in Two Different Conditions of Terrain Slope," *Agronomy*, vol. 12, no. 1, pp. 1-11, 2022. Link: <https://doi.org/10.3390/agronomy12010185>