

Analisis Pembakaran Briket Arang Tempurung Kelapa dan Kayu Kaliandra dengan Perekat Tapioka

Muhammad Abil¹, Nadya Yunisa Fahmi^{*2}, Maldi Saputra³, Joli Supardi⁴

^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Teuku Umar, Meulaboh

e-mail: *2nadyayunisa@utu.ac.id

Abstrak

Peningkatan kebutuhan energi berkelanjutan mendorong pengembangan bahan bakar alternatif berbasis biomassa. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik pembakaran briket dari arang tempurung kelapa dan kayu kaliandra dengan perekat tapioka menggunakan pendekatan optimasi multi-respon. Penelitian ini mengevaluasi korelasi komposisi bahan terhadap nilai kalor, laju pembakaran, dan indeks kerapuhan sebagai indikator utama kinerja briket. Metode yang digunakan meliputi pengujian eksperimental kemudian dilakukan uji signifikansi pengaruh komposisi menggunakan ANOVA. Selain itu, dilakukan optimasi multi-respon untuk menentukan komposisi optimum menggunakan Grey Relational Analysis (GRA). Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh variasi komposisi telah mencapai standar nilai kalor menurut SNI (>5000 kal/g). Komposisi B2 (50:50) menghasilkan nilai kalor tertinggi sebesar 6570,65 kal/g, sedangkan laju pembakaran dan indeks kerapuhan terendah masing-masing sebesar 0,1000 g/menit dan 0,1193% diperoleh pada komposisi B3 (40:60). Hasil analisis GRA menunjukkan bahwa komposisi B3 memiliki nilai Grey Relational Grade (GRG) tertinggi (0,778), sehingga ditetapkan sebagai komposisi optimum karena memiliki keseimbangan terbaik dari seluruh parameter yang diuji. Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa briket dari tempurung kelapa dan kayu kaliandra dapat menjadi solusi sebagai sumber bahan bakar alternatif yang efisien dan berkelanjutan.

Kata kunci— Briket biomassa, arang tempurung kelapa, kayu Calliandra, nilai kalor, GRA

Abstract

The growing demand for sustainable energy has encouraged the development of alternative fuels derived from biomass. This study aims to analyze the combustion characteristics of briquettes produced from coconut shell charcoal and Calliandra wood using tapioca as a binder, with a multi-response optimization approach. The research evaluates the correlation between material composition and key performance indicators, including calorific value, combustion rate, and shatter index. The methodology involves experimental testing followed by analysis of variance (ANOVA) to assess the significance of composition effects. Furthermore, multi-response optimization through Grey Relational Analysis (GRA) was carried out to identify the optimal composition. The results show that all composition variations meet the calorific value standard according to SNI (>5000 cal/g). Composition B2 (50:50) produces the highest calorific value of 6570.65 cal/g, while the lowest combustion rate and shatter index, 0.1000 g/min and 0.1193% respectively, are achieved by composition B3 (40:60). The GRA analysis indicates that composition B3 achieves the highest Grey Relational Grade (GRG = 0.778), making it the optimal composition due to its superior balanced performance across all evaluated parameters. These findings demonstrate that briquettes made from coconut shell and Calliandra wood offer strong potential as an efficient and sustainable alternative fuel source.

Keywords— Biomass briquettes, coconut shell charcoal, calliandra wood, calorific value, grey relational analysis

1. PENDAHULUAN

Pemintaan energi global meningkat setiap tahun seiring dengan pertumbuhan penduduk. Penggunaan bahan bakar fosil saat ini menyebabkan eksploitasi bahan bakar fosil yang signifikan seperti minyak dan batu bara. Kebutuhan konsumsi energi juga meningkat setiap tahun, sementara sumber daya alam yang menghasilkan energi jumlahnya semakin berkurang karena sumber energi ini tidak dapat diperbarui [1]. Sementara itu, Indonesia dikenal sebagai salah satu produsen komoditas pertanian terbesar di dunia. Industri pertanian menghasilkan sejumlah besar residu yang apabila tidak dikelola dengan baik dapat menyebabkan pencemaran lingkungan [2].

Biomassa, seperti limbah agroindustri, dapat dimanfaatkan untuk mengurangi pencemaran lingkungan [3]. Limbah biomassa juga dapat digunakan sebagai sumber bahan bakar dengan cara diubah menjadi arang dan diolah menjadi briket sebagai sumber energi alternatif. Briket terbukti dapat menghasilkan energi bersih, ramah lingkungan, dan memiliki nilai kalor yang tinggi [4], [5]. Pemanfaatan limbah biomassa sebagai briket sejalan dengan kebijakan pemerintah menuju transisi energi ke arah sumber energi terbarukan guna menekan ketergantungan terhadap energi konvensional berbahan bakar fosil serta menekan dampak lingkungan [6].

Limbah tempurung kelapa dihasilkan secara melimpah sepanjang tahun sebagai produk samping dari kegiatan agroindustri. Residu biomassa ini dapat diolah lebih lanjut menjadi briket arang tempurung kelapa dan menunjukkan potensi yang cukup besar sebagai bahan bakar padat terbarukan. Tempurung kelapa dicirikan oleh nilai kalor yang tinggi sebesar 7.283,5 kal/g, dan mengandung 27,39% lignin, serta 51,55% selulosa, sehingga cocok untuk aplikasi yang membutuhkan panas yang cepat dan stabil [7].

Kayu kaliandra (*Calliandra calothyrsus*) juga merupakan jenis biomassa yang berpotensi sebagai sumber energi. Komponen penyusunnya seperti selulosa dan lignin hadir cukup tinggi sehingga menghasilkan pembakaran yang relatif bersih [8]. Selain itu, kayu kaliandra juga memiliki kandungan zat ekstraktif yang berperan dalam meningkatkan nilai kalor hingga 7.200 kal/g, sehingga sangat potensial sebagai bahan baku briket arang [9]. Penelitian sebelumnya tentang briket berbahan kayu kaliandra umumnya berfokus pada parameter kinerja saja, tanpa mengintegrasikan seluruh parameter dalam satu kerangka optimasi multi-respon [8], [9].

Indikator kinerja pembakaran memainkan peran penting dalam menentukan kesesuaian bahan bakar biomassa untuk aplikasi energi terbarukan. Parameter seperti laju pembakaran dan nilai kalor berhubungan langsung dengan intensitas pelepasan panas. Sifat fisik, seperti struktur bahan bakar, secara signifikan mempengaruhi kinetika pembakaran dan karakteristik perpindahan panas [10]. Selama pembakaran briket, reaksi antara karbon dan oksigen terjadi pada permukaan partikel seperti yang dinyatakan pada Persamaan (1) sampai (4) di bawah ini [11].



Penelitian sebelumnya umumnya mengkaji karakteristik briket berbahan tempurung kelapa dan kayu kaliandra secara terpisah, sehingga belum memberikan gambaran komprehensif terkait potensi sinergi kedua material tersebut [12], [13]. Hingga saat ini, studi yang mengoptimasi kombinasi keduanya secara simultan menggunakan pendekatan multi-respon Grey Relational Analysis (GRA) masih sangat terbatas. Penelitian ini menawarkan kebaruan melalui integrasi tiga parameter kinerja utama, yaitu nilai kalor, laju pembakaran, dan indeks kerapuhan, ke dalam suatu kerangka optimasi terpadu untuk memperoleh komposisi briket yang optimal secara menyeluruh.

Penelitian ini bertujuan untuk menguji pembakaran briket yang dibuat dari arang tempurung kelapa dan kayu kaliandra dengan perekat tepung tapioka. Beberapa analisis diterapkan untuk menguji kinerja briket, yaitu nilai kalor, laju pembakaran, dan indeks kerapuhan. Setelah diuji, kualitas briket dianalisis untuk menentukan komposisi optimum.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan arang tempurung kelapa dan kayu kaliandra sebagai sumber biomassa yang sudah dijemur selama 3 hari (kadar air 5%). Tepung tapioka dipilih dalam penelitian ini sebagai perekat untuk bahan pengikat karena ketersediaannya melimpah, terjangkau, dan mudah didapatkan. Perekat disiapkan dengan mencampur air dengan perbandingan 1:1. Seluruh pengujian dilakukan pada kondisi suhu ruang. Setiap variasi komposisi direplikasi sebanyak tiga kali ($n = 3$) untuk memastikan validitas dan konsistensi data pengujian.

2.1 Persiapan Briket

Bahan baku arang tempurung kelapa dan kayu kaliandra digiling dan dilakukan pengayakan berukuran 30 mesh. Proses pengayakan bahan baku ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Bahan baku hasil pengayakan

Kedua bahan baku tersebut dicampur dengan larutan tepung tapioka sebagai perekat. Rasio campuran bahan baku dalam briket (arang tempurung kelapa : kayu kaliandra) disajikan pada Tabel 1, dengan rasio bahan baku dan perekat sebesar 2 : 1. Campuran adonan dicetak menggunakan besi hollow berukuran 25 x 25 mm dan tinggi 25 mm kemudian ditekan.

Tabel 1 Komposisi bahan baku (%w) dalam briket

Variasi	Komposisi (arang tempurung kelapa : kayu kaliandra)
B1	60 : 40
B2	50 : 50
B3	40 : 60

Terakhir, briket dikeringkan dengan metode pengeringan matahari. Sampel briket ditimbang setiap hari untuk menentukan berat kering konstan. Dibutuhkan 3–5 hari untuk mendapatkan sampel yang benar-benar kering. Setelah briket tersebut kering, kualitas briket diteliti melalui beberapa pengujian.

2. 2 Analisis

2. 2.1 Nilai Kalor

Analisis nilai kalor dilakukan menggunakan instrumen *Oxygen Bomb Calorimeter* dengan tipe DDS CAL3K-F. Instrumen dikalibrasi menggunakan asam benzoat untuk memastikan kehilangan panas selama pembakaran dan digunakan sebagai faktor koreksi. Sampel ditimbang masing-masing sebanyak 1 g, kemudian ditempatkan ke dalam cawan aluminium, dimasukkan ke dalam ruang instrumen DDS CAL3K-F, dan dipanaskan dari 50 hingga 280°C dengan laju pemanasan 20°C/menit. Nilai kalor briket ditentukan menggunakan persamaan (5).

$$\text{Nilai kalor} = \frac{Q}{mb} \quad (5)$$

di mana: Q = Nilai kalor yang dilepaskan (Kal),
mb = berat briket (g)

2. 2.2 Laju Pembakaran Briket

Laju pembakaran briket dinilai dari kecepatan konversi briket menjadi abu selama proses pembakaran. Durasi diukur dengan mencatat waktu dari saat briket mulai terbakar hingga benar-benar menjadi abu.

$$\text{Laju pembakaran} = \frac{m_0 - m_f}{t} \quad (6)$$

di mana: m_0 = massa briket sebelum pembakaran (gram)
 m_f = massa briket sesudah pembakaran (gram)
t = waktu pembakaran (detik)

2. 2.3 Indeks Kerapuhan Briket

Pengujian kerapuhan briket merupakan metode untuk menilai kualitas fisik briket menahan tekanan, benturan, atau gesekan. Pengujian dilakukan dengan cara menjatuhkan briket dari ketinggian 2 meter, lalu setiap sampel diamati untuk menentukan nilai indeks kerapuhannya. Nilai indeks kerapuhan briket ditentukan dengan persamaan (7).

$$\text{Indeks kerapuhan (\%)} = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (7)$$

di mana: m_0 = massa briket sebelum dijatuhkan (gram)
 m_1 = massa briket sesudah dijatuhkan (gram)

2. 2.4 Optimasi Multi-Respon Menggunakan Grey Relational Analysis (GRA)

Optimasi komposisi briket dilakukan menggunakan metode GRA untuk mengintegrasikan beberapa parameter respon yaitu nilai kalor, laju pembakaran, dan indeks kerapuhan. Metode ini digunakan dalam optimasi multi-respon karena mampu mengubah beberapa variabel menjadi satu nilai representatif [14]. Tahapan dalam analisis GRA menggunakan persamaan (8) sampai (12) mengacu pada prosedur standar yang dikembangkan oleh Deng (1989) sebagaimana diadaptasi oleh [14].

$$X'_i = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (8)$$

$$X'_i = \frac{X_{max} - X_i}{X_{max} - X_{min}} \quad (9)$$

$$\Delta_i = |X_0 - X'_i| \quad (10)$$

$$\xi_i = \frac{\Delta_{min} + \zeta \cdot \Delta_{max}}{\Delta_i + \zeta \cdot \Delta_{max}} \quad (11)$$

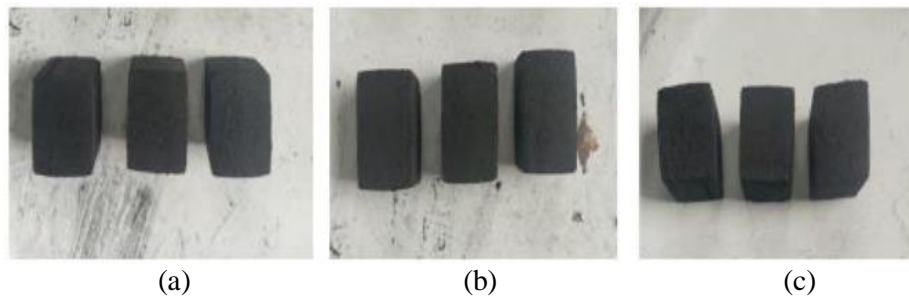
$$GRG = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_i \quad (12)$$

Tahap pertama dalam analisis GRA adalah normalisasi data untuk mengubah seluruh parameter ke dalam rentang nilai 0 – 1. Untuk parameter dengan karakteristik *higher is better* (nilai kalor), normalisasi dilakukan menggunakan persamaan (8). Sedangkan untuk parameter dengan karakteristik *lower is better* (laju pembakaran dan indeks kerapuhan), digunakan persamaan (9). Selisih antara nilai referensi dan nilai normalisasi dihitung menggunakan persamaan (10). Koefisien *Grey Relational Coefficient* (GRC) dihitung menggunakan persamaan (11), dengan $\zeta = 0,5$ sebagai koefisien pembeda [14]. Nilai GRG diperoleh dengan merata-ratakan nilai GRC dari seluruh parameter untuk setiap komposisi, menggunakan persamaan (12), dimana n merupakan jumlah parameter yang dianalisis. Komposisi optimum ditentukan berdasarkan nilai GRG tertinggi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Bentuk dan Karakteristik Briket

Briket yang dihasilkan dari campuran tempurung kelapa dan kayu kaliandra berbentuk kubus dengan ukuran yang seragam, berwarna hitam pekat dengan permukaan padat serta halus. Warna hitam menunjukkan proses karbonisasi berlangsung baik. Briket berdasarkan perbedaan komposisi ditunjukkan pada Gambar 2. Dari hasilnya, briket tidak mudah rapuh dan tidak memiliki retakan, menandakan perekat dan tekanan saat pencetakan cukup baik serta proses pengeringan berjalan baik. Karakteristik briket berdasarkan nilai kalor, laju pembakaran, dan indeks kerapuhan ditunjukkan pada Tabel 2.



Gambar 2 Hasil briket dengan berbagai komposisi (arang tempurung kelapa: kayu kaliandra):
 (a) 60:40, (b) 50:50, dan (c) 40:60

Tabel 2 Karakteristik briket dari arang tempurung kelapa dan kayu kaliandra dengan berbagai komposisi

Komposisi	Karakteristik briket		
	Nilai kalor (Kal/g)	Laju pembakaran (g/menit)	Indeks kerapuhan (%)
B1	6358,08	0,0966	0,4788
B2	6570,65	0,1054	0,3932
B3	6092,96	0,1000	0,1193

Keterangan: Komposisi arang tempurung kelapa dan kayu kaliandra 60:40 (B1); 50:50 (B2); 40:60 (B3)

Tabel 3 Ringkasan hasil ANOVA pengaruh komposisi terhadap karakteristik briket

Parameter	F-hitung	p-vaue	Keputusan
Nilai Kalor	12,47	0,008	Signifikan ($p < 0,05$)
Laju pembakaran	8,93	0,016	Signifikan ($p < 0,05$)
Indeks kerapuhan	15,62	0,004	Signifikan ($p < 0,05$)

Keterangan: Derajat bebas antar 2 kelompok = 2; dalam kelompok = 6; $\alpha = 0,05$

3.2 Analisis Nilai Kalor

Nilai kalor menjadi parameter utama yang menunjukkan kemampuan briket untuk menghasilkan energi panas. Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI), nilai kalor minimum briket yang layak digunakan sebagai bahan bakar adalah lebih dari 5000 kal/g. Berdasarkan Tabel 2, seluruh variasi komposisi telah memenuhi standar tersebut, dengan nilai kalor tertinggi diperoleh pada komposisi B2 sebesar 6570,65 kal/g, diikuti oleh B1 sebesar 6358,08 kal/g dan B3 sebesar 6092,96 kal/g. Tempurung kelapa diketahui memiliki kandungan lignin yang cukup tinggi, sehingga berkontribusi dalam peningkatan nilai kalor briket. Sebaliknya, penurunan nilai kalor pada komposisi B3 diduga disebabkan oleh peningkatan proporsi kayu kaliandra yang memiliki kandungan zat volatil lebih tinggi. Kandungan volatil ini cenderung mudah menguap selama proses karbonisasi sehingga mengurangi kandungan karbon tetap yang berperan dalam menghasilkan energi panas [15].

Secara statistik, pengaruh variasi komposisi berdampak signifikan terhadap nilai kalor ($F = 12,47$; $p = 0,008 < 0,05$), yang menunjukkan bahwa perubahan rasio bahan baku secara signifikan mempengaruhi potensi energi briket (Tabel 3). Hal ini menegaskan bahwa optimasi komposisi bahan merupakan faktor kunci dalam meningkatkan kualitas energi biomassa.

3.3 Analisis Laju Pembakaran

Laju pembakaran merupakan indikator yang menunjukkan seberapa cepat briket menjadi abu dalam proses pembakaran. Berdasarkan data pada Tabel 2, komposisi B3 memiliki laju pembakaran terendah yaitu 0,1000 g/menit, diikuti oleh B2 sebesar 0,1054 g/menit dan B1 sebesar 0,0966 g/menit. Nilai laju pembakaran yang lebih rendah mengindikasikan durasi pembakaran briket yang lebih lama dan lebih efisien dalam menghasilkan energi [8].

Kandungan selulosa dan hemiselulosa yang tinggi cenderung menghasilkan senyawa volatil yang mudah terbakar, sehingga mempercepat laju pembakaran. Sebaliknya, kandungan lignin yang tinggi akan memperlambat proses pembakaran karena sifatnya yang lebih tahan terhadap degradasi termal. Secara statistik, variasi komposisi juga menunjukkan pengaruh signifikan terhadap laju pembakaran ($F = 8,93$; $p = 0,016 < 0,05$), yang mengindikasikan bahwa perubahan komposisi bahan baku secara langsung mempengaruhi kinetika pembakaran briket.

3.4 Analisis Indeks Kerapuhan

Nilai kerapuhan yang lebih rendah menunjukkan bahwa briket memiliki sifat kekuatan struktural yang baik dan tidak mudah hancur. Berdasarkan Tabel 2, komposisi B3 memiliki nilai kerapuhan terendah sebesar 0,1193%, diikuti oleh B2 sebesar 0,3932% dan B1 sebesar 0,4788%. Perekat tapioka berperan dalam meningkatkan kohesi antar partikel melalui proses gelatinisasi pati, yang membentuk ikatan antar partikel biomassa [16]. Selain itu, kandungan lignin dalam biomassa juga memiliki fungsi sebagai bahan perekat alami yang dapat menambahkan kekuatan mekanik briket.

Pada komposisi B3 dengan proporsi kayu kaliandra lebih tinggi (60%), kandungan lignin yang lebih besar berperan ganda: sebagai pengikat alami antara partikel karbon dan sebagai pengisi rongga mikro dalam matriks briket. Mekanisme ini menyebabkan ikatan antarmolekul lebih rapat dan homogen dibandingkan komposisi B1 dan B2. Selain itu, partikel kayu kaliandra

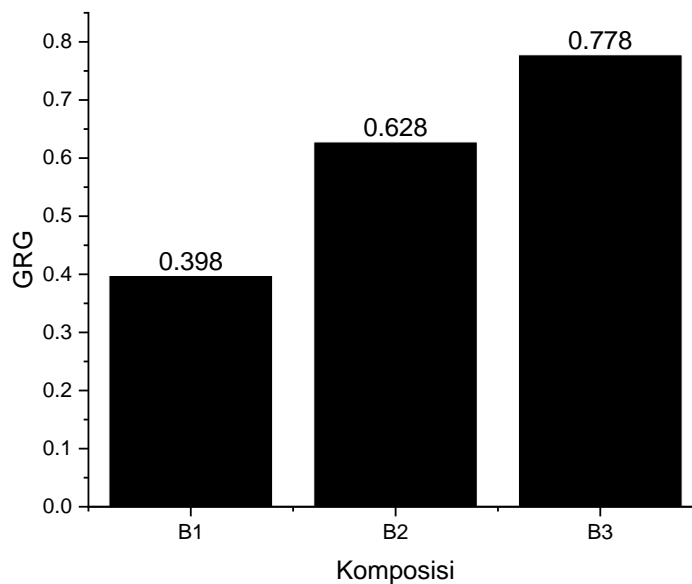
yang lebih lunak dibandingkan tempurung kelapa memungkinkan pemadatan yang lebih efisien saat pencetakan, sehingga menghasilkan densitas briket yang lebih tinggi dan kerapuhan yang lebih rendah. Fenomena ini selaras dengan temuan [16] yang menunjukkan bahwa peningkatan kandungan lignin berhubungan positif dengan kekuatan mekanik produk berbasis biomassa.

Hasil analisis statistik menunjukkan bahwa variasi komposisi memberikan pengaruh signifikan terhadap indeks kerapuhan ($F = 15,62$; $p = 0,004 < 0,05$). Dengan kata lain, optimasi komposisi bahan tidak hanya mempengaruhi sifat termal, tetapi juga sifat mekanik briket.

3.5 Analisis Grey Relational Grade

Berdasarkan Gambar 3, terlihat bahwa komposisi B3 memiliki nilai GRG tertinggi sebesar 0,778, yang menunjukkan performa paling seimbang dan paling mendekati kondisi ideal. Komposisi B2 berada pada posisi kedua ($GRG = 0,628$) dengan keunggulan pada nilai kalor, sedangkan B1 menunjukkan performa terendah ($GRG = 0,398$) pada hampir seluruh parameter.

Meskipun nilai kalor pada B3 lebih rendah dibandingkan B2, kombinasi laju pembakaran yang rendah dan indeks kerapuhan yang kecil memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan performa total. Hal ini menunjukkan bahwa optimasi biomassa tidak cukup hanya berdasarkan nilai kalor saja, melainkan harus mempertimbangkan stabilitas pembakaran dan kekuatan mekanik secara bersamaan.



Gambar 3 Grafik GRG pada variasi komposisi briket arang tempurung kelapa dan kayu kaliandra: B1 (60:40), B2 (50:50), dan B3 (40:60)

Dari perspektif implikasi praktis, komposisi B3 (40:60) berpotensi diterapkan sebagai bahan bakar alternatif rumah tangga dan industri kecil di daerah yang memiliki ketersediaan kayu kaliandra melimpah. Laju pembakaran yang relatif lebih lambat menunjukkan bahwa konsumsi briket per satuan waktu menjadi lebih efisien, sehingga berkontribusi pada peningkatan efisiensi ekonomi bagi pengguna. Selain itu, nilai kerapuhan yang rendah memberikan keuntungan dalam proses penanganan dan distribusi, karena mampu meminimalkan kehilangan material akibat kerusakan fisik.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, variasi komposisi arang tempurung kelapa dan kayu kaliandra memiliki pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik produk briket yang dihasilkan. Seluruh komposisi telah memenuhi standar nilai kalor SNI (>5000 kal/g), dengan nilai tertinggi diperoleh pada komposisi B2 (50:50), yaitu 6570,65 kal/g. Namun, komposisi B3 (40:60) menunjukkan performa terbaik dari segi laju pembakaran dan indeks kerapuhan. Berdasarkan analisis multi-respon menggunakan *Grey Relational Analysis*, komposisi B3 ditetapkan sebagai kondisi optimum (GRG = 0,778) karena memiliki keseimbangan terbaik dari seluruh parameter yang diuji. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan bahan bakar padat terbarukan berbasis limbah biomassa lokal, yang dapat mendukung program transisi energi nasional menuju sumber energi yang lebih bersih, efisien, dan berkelanjutan. Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan: variasi komposisi yang diuji hanya mencakup tiga kombinasi, sehingga belum dapat menentukan titik optimum yang kontinu; dan parameter pengujian belum mencakup kadar abu, kadar air, dan karbon tetap (*fixed carbon*) sesuai SNI secara lengkap.

5. SARAN

Penelitian lanjutan disarankan dapat mengembangkan variasi proporsi bahan baku briket yang lebih luas dengan interval yang lebih kecil untuk mendapatkan kurva respon yang lebih akurat. Parameter pengujian perlu diperluas untuk memperkuat analisis seperti kadar abu, kadar air, kadar zat volatil, serta karbon tetap (*fixed carbon*) sesuai standar SNI. Selain itu, perlu dikaji pengaruh faktor proses seperti tekanan pencetakan, ukuran partikel, dan suhu karbonisasi terhadap kualitas briket. Penggunaan perekat alternatif berbasis bahan alami lainnya juga dapat dipertimbangkan untuk meningkatkan sifat mekanik dan efisiensi pembakaran. Uji coba skala lapangan di tingkat rumah tangga perlu dilakukan untuk memvalidasi potensi aplikasi praktis briket komposisi optimum B3.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Holechek, J. L., Geli, H. M. E., Sawalhah, M. N. and Valdez, R., 2022, A Global Assessment: Can Renewable Energy Replace Fossil Fuels by 2050?, *Sustainability*, No.8, Vol. 14: 4792.
- [2] Arista, N. I. D. 2024, Karakteristik limbah pertanian dan dampaknya: Mengapa pengelolaan ramah lingkungan penting?, *Waste Handling and Environmental Monitoring*, No.2, Vol. 1, hal 67-76.
- [3] Demirbas, A. 2004, Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, No.2, Vol 30, 219–230.
- [4] Ajimotokan, H. A., Ehindero, A. O., Ajao, K. S., Adeleke, A.A., Ikubanni, P.P. and Shuaib-Babata, Y.L. 2019, Combustion characteristics of fuel briquettes made from charcoal particles and sawdust agglomerates. *Scientific African* 6, e00202.
- [5] Akam, N.G., Diboma, B.S., Mfomo, J.Z., Ndiwe, B., Bôt, B.V. and Biwolé, A. B. (2024). Physicochemical characterization of briquette fuel produced from cocoa pod husk case of Cameroon. *Energy Reports* 11, 1580– 1589.
- [6] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. 2023. *Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia 2023*. Jakarta: ESDM

-
- [7] Setyawan, B. 2019. Analisis Mutu Briket Arang Dari Limbah Biomassa Campuran 45 Kulit Kopi Dan Tempurung Kelapa Dengan Perekat Tepung Tapioka. *Edubiotik: Jurnal Pendidikan, Biologi Dan Terapan*, 4(02), 110–120.
- [8] Murda, R.A., Wahyuningrum, M., Zahra, R.A., and Maulana, S. 2025. Karakteristik Biobriket Arang Campuran Limbah Batang Singkong dan Kayu Kaliandra pada Berbagai Variasi Komposisi. *Jurnal Media Informatika [Jumin]*, No.3, Vol. 6, hal 2260–2267.
- [9] Hasan, A., Wulandari, F. T., & Ningsih, R. V. 2025. Pengaruh Jenis Perekat Terhadap 44 Karakteristik Briket Arang Kaliandra (*Calliandra Calothyrsus*). *Kappa Journal*, 7(2), 1–8.
- [10] Suryaningsih, S., Nurhilal, O., Yuliah, Y., and Mulyana C. 2017, Combustion quality analysis of briquettes from variety of agricultural waste as source of alternative fuels, *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 65(1):012012
- [11] Hakika, D.C., Jamilatun, S., Zahira, S., Setyarini, R., Rahayu, S., and Ardiansyah, R.S, 2023, Combustion Quality Analysis of Bio-Briquettes from Mixture of Coconut Shell Waste and Coal with Tapioca Flour Adhesive, *Indonesian Journal of Chemical Engineering*, No.1, Vol.1, hal 1–10.
- [12] Obi, O.F., Pecenka, R., and Clementking, A., 2022, A Review of Biomass Briquette Binders and Quality Parameters. *Energies*, 15(6), 2426.
- [13] Dinesha, P., Kumar, S., and Rosen, M.A., 2023, Biomass Briquettes as an Alternative Energy Source: A Comprehensive Review. *Energies*, 16(3), 1357.
- [14] Singh, M, and Bharti, P.S, 2022, Grey relational analysisbased optimization of process parameters for efficient performance of fused deposition modelling based 3D printer, *Journal of Engineering Research*, No.1, Vol.1, hal 1–15.
- [15] Hidayat, D, F., Maryani, Y, and Sari, E, 2025, Evaluasi Komprehensif Kualitas Briket dari Arang Tempurung Kelapa dan Campuran Serbuk Gergaji Sengon Terkarbonisasi/Tidak Terkarbonisasi, *Jurnal Riset Rumpun Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam*, No.3, Vol.4, hal 500–513.
- [16] Ribawa, D.W, Saleh, M., and Sarungallo, R. S, 2025, Formulasi Perekat Tapioka-Asam Sitrat dan Pengaruhnya terhadap Sifat Mekanik dan Fisik Papan Partikel Kayu Sengon, *Paulus Chem Engineering Journal*, No.1, Vo5.1, hal 1–7.
-