

## Transformasi Limbah Kayu Kaliandra Menjadi Pelet di Kabupaten Gresik Dengan Pendekatan Karakterisasi Fisik dan Kimia

Rilo Chandra Muhamadin<sup>\*1</sup>, Alviani Hesthi Permata Ningtyas<sup>2</sup>, Ilham Arifin Pahlawan<sup>3</sup>, Deni Fajar Fitriyana<sup>4</sup>, Moh. Jufriyanto<sup>5</sup>, Katon Muhammad<sup>6</sup>, Nur Ervil Setiawan<sup>7</sup>

<sup>1,2,3,7</sup>Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Gresik, Indonesia

<sup>4</sup>Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang, Indonesia

<sup>5</sup>Teknik Industri Universitas Muhammadiyah Gresik, Indonesia

<sup>6</sup>Teknik Industri Universitas Jenderal Soedirman, Indonesia

Email: <sup>1</sup>[rilochoandra@umg.ac.id](mailto:rilochoandra@umg.ac.id), <sup>2</sup>[alvianihesthi@umg.ac.id](mailto:alvianihesthi@umg.ac.id), <sup>3</sup>[ilhamarifin@umg.ac.id](mailto:ilhamarifin@umg.ac.id),  
<sup>4</sup>[deniifa89@mail.unnes.ac.id](mailto:deniifa89@mail.unnes.ac.id), <sup>5</sup>[jufriyanto@umg.ac.id](mailto:jufriyanto@umg.ac.id), <sup>6</sup>[katon.muhammad@gmail.com](mailto:katon.muhammad@gmail.com),  
<sup>7</sup>[nurervilsetiawan@gmail.com](mailto:nurervilsetiawan@gmail.com)

### Abstrak

Terbitnya peraturan pemerintah pada Peraturan Presiden (Perpres) Nomor 11 tahun 2023 mengharuskan pemerintah pusat dan daerah untuk mengembangkan dan menggunakan energi terbarukan seperti biomassa, biogas, serta konservasi energi di berbagai sektor. Upaya ini sejalan dengan target Indonesia untuk mencapai penggunaan energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025 dan merealisasikan program *net-zero emissions* pada tahun 2060. Penggunaan biomassa memiliki beberapa keuntungan seperti sifatnya yang dapat diperbarui, ramah lingkungan, dan mampu mengurangi emisi gas rumah kaca serta gas asam. Pelet merupakan salah satu biomassa hasil pengempaan yang memiliki tekanan lebih besar dibandingkan dengan briket. Pelet memiliki kadar air yang rendah sehingga dapat meningkatkan efektivitas pada saat proses pembakaran. Penelitian ini mengeksplorasi pembuatan pelet dari limbah industri kayu kaliandra di Kabupaten Gresik menggunakan mesin *ring die pellet mill*. Karakterisasi kualitas pelet dilakukan dengan pengujian kadar air, abu, zat terbang, karbon terikat dan nilai kalori. Hasil karakterisasi kualitas pelet yang telah dihasilkan telah memenuhi standar mutu kualitas pelet nasional dan internasional kecuali pada standar Rusia. Hasil penelitian ini menunjukkan pelet yang dihasilkan dapat memberikan kontribusi terhadap upaya pemerintah untuk mengembangkan dan menggunakan biomassa dengan mengoptimalkan limbah kayu kaliandra menjadi pelet. Kandungan kadar abu yang dihasilkan menunjukkan nilai 0,75%. Hasil pengujian ini tidak memenuhi standar yang telah ditetapkan negara Rusia yang menetapkan bahwa kadar abu yang boleh bernilai kurang dari 0,7%. Pelet yang terbuat dari kayu kaliandra memiliki potensi besar untuk mendukung program *net zero emission* yang tengah diupayakan pemerintah serta membuka peluang Indonesia untuk memperluas pasar energi hijau di tingkat internasional.

**Kata kunci:** biomassa, karakterisasi, kaliandra, pelet

### *Utilization of Calliandra Wood Industry Waste into Pellets in Gresik*

#### Abstract

*Reduced oil reserves, the elimination of subsidies caused oil prices to rise and the quality of the environment declined due to the excessive use of fossil fuels. The use of biomass has several advantages, including its renewable nature, healthy environment, and ability to reduce greenhouse gas and acid gas emissions. Pellets are the result of biomass compression that has a greater pressure when compared to briquettes (60 kg/m<sup>3</sup>, 1% ash content and less than 10% moisture content). Pellets have a low moisture content so that they can further increase the effectiveness of combustion. In this study, pellets were made from calliandra wood industry waste in Gresik Regency using a ring die pellet mill machine. Characterization through testing of moisture content, ash content, volatile matter, fixed carbon content and calorific value was carried out to determine the quality of the pellets produced. From the result test, pellets from calliandra wood have met the quality standards of pellets from several countries except for the standards set by Russia. The results of the ash content test of calliandra pellets showed a value of 0.75%. The results of this test do not have the standards set by Russia which stipulates that the ash content that may be worth less than 0.7%. Pellets with high quality and have ENplus quality standards have a high selling value for use abroad.*

**Keywords:** biomass, characterization, calliandra, pellet

## 1. PENDAHULUAN

Dalam rangka menjaga kelestarian alam perlu dilakukan mitigasi emisi karbon dioksida yang bertujuan untuk menekan emisi CO<sub>2</sub>, terutama yang dihasilkan dari aktivitas eksplorasi dan eksploitasi sumber energi di pembangkit listrik tenaga uap [1], [2]. Energi yang dihasilkan dari biomassa saat ini banyak diteliti dan dikembangkan karena dapat dimanfaatkan menjadi sumber energi alternatif dengan ketersediaan yang melimpah, mudah diakses, dan dapat diperbarui dengan cepat. Indonesia memiliki potensi energi biomassa hingga 50.000 megawatt yang berasal dari berbagai jenis limbah pertanian, seperti limbah kelapa sawit, penggilingan padi, industri *polywood*, pabrik gula, kakao, serta berbagai limbah pertanian lainnya [3], [4]. Menurut data Badan Pusat Statistika (BPS) Indonesia pada tahun 2022, Provinsi Jawa Timur menghasilkan 4.205.410 m<sup>3</sup> kayu dan termasuk dalam 5 besar provinsi yang memproduksi kayu di Indonesia. Beberapa industri kayu yang berada di Kabupaten Gresik menghasilkan limbah serbuk kayu yang dapat diolah menjadi energi biomassa. Penggunaan biomassa memiliki beberapa keuntungan, di antaranya sifatnya yang dapat diperbarui, ramah lingkungan, dan mampu mengurangi emisi gas rumah kaca serta gas asam. Namun, jika biomassa dibakar secara langsung, muncul masalah seperti nilai kalor yang rendah, densitas *bulk* yang rendah, dan emisi polutan yang tinggi [5]–[7]. Untuk mengatasi masalah ini dan mendapatkan hasil yang optimal, biomassa perlu diolah dengan mempertimbangkan berbagai faktor yang memengaruhi proses pembakaran. Karakteristik pembakaran biomassa sangat dipengaruhi oleh komposisi bahan baku yang digunakan [8]–[10].

Potensi biomassa juga dapat dinilai dari jumlah kalori yang dihasilkannya. Nilai kalori atau panas yang dihasilkan dari biomassa dapat dijadikan standar klasifikasi untuk menentukan jenis bahan baku yang akan diprioritaskan dalam penggunaannya. [2], [11]. Asumsi nilai kalor (*calorific value*) dan kandungan air (*moisture content*) bahan baku biomassa ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Asumsi nilai kalor dari beberapa sumber bahan baku [12].

Biomassa	Nilai Kalor (kkal/kg)	Kadar Air (%)
Cangkang Sawit	4300	15
Ampas Tebu	3000	30
Tempurung Kelapa	4400	15
Sekam Padi	2800	50
Tongkol Jagung	3227	20
Limbah Kayu Industri	2200	20
Sampah Kota	4600	15

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Wibowo (2022) membahas karakteristik pelet berbasis limbah kayu jati, namun belum mengkaji secara detail pelet dari kayu kaliandra dengan pendekatan karakterisasi seperti yang dilakukan dalam penelitian ini. Pada penelitian yang dilakukan oleh tersebut Wibowo menyatakan bahwa biomassa memiliki keunggulan sebagai potensi energi terbarukan, antara lain [13]:

- Tidak menimbulkan emisi sulfur sehingga mengurangi hujam asam
- Biomassa dapat mendaur ulang CO<sub>2</sub>, sehingga dapat dikategorikan sebagai “bebas emisi”
- Pembakaran biomassa menghasilkan abu dalam jumlah kecil daripada pembakaran batubara karena abu eks-batubara tersebut harus dibuang ke tempat lain.

Pelet yang berasal dari biomassa diubah dan dimanfaatkan sebagai bahan bakar energi melalui teknik densifikasi. Teknik ini bertujuan untuk meningkatkan kerapatan bahan sehingga lebih mudah disimpan dan diangkut. Proses konversi biomassa ini dapat meningkatkan nilai kalor per unit volume, menjadikannya lebih mudah disimpan dan diangkut, serta menghasilkan pelet dengan ukuran dan kualitas yang seragam. Faktor utama yang mempengaruhi kekuatan dan daya tahan pelet meliputi jenis bahan baku, kadar air, ukuran partikel, kondisi penekanan, penambahan perekat, alat densifikasi, dan perlakuan setelah produksi. Salah satu parameter penting untuk menentukan kualitas bahan bakar biomassa adalah nilai kalor yang dihasilkan selama pembakaran [14]–[16].

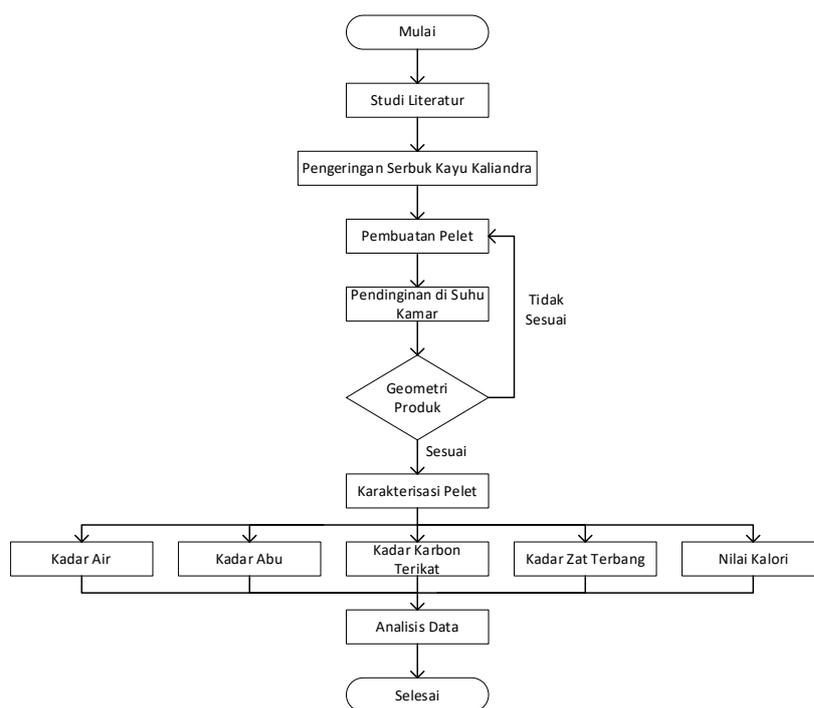
Penelitian yang telah dilakukan oleh Saptoadi menjelaskan bahwa proses pemampatan biomassa menjadi briket atau pelet dilakukan untuk [17]:

- Meningkatkan kerapatan energi bahan.
- Meningkatkan kapasitas panas (kemampuan untuk menghasilkan panas dalam waktu lebih lama dan mencapai suhu yang lebih tinggi).
- Mengurangi jumlah abu pada bahan bakar.

Pelet merupakan hasil pengempaan biomassa yang memiliki tekanan yang lebih besar jika dibandingkan dengan briket ( $60 \text{ kg/m}^3$ , kadar abu 1% dan kadar air kurang dari 10%). Pelet memiliki kadar air yang rendah sehingga dapat lebih meningkatkan efektivitas pembakaran [18]. Kualitas dari pelet yang dihasilkan dapat dilihat pada dua faktor, yaitu ketahanan mekanis dan moisture content. Semakin rendah nilai moisture content, maka semakin besar energi yang dihasilkan pada pembakar pelet. Ketahanan mekanis secara sederhana dapat dinyatakan dalam seberapa rapat pelet tersebut dan seberapa baik pelet terbentuk. Kelebihan pelet dengan densitas lebih tinggi yaitu, ketahanan pelet lebih tinggi dan kerja pelet lebih efisien pada proses pembakaran [10], [13], [19]. Karakterisasi pelet perlu dilakukan untuk mengetahui kualitas pelet yang dihasilkan. Karakterisasi kayu kaliandra menjadi pelet telah dilakukan beberapa peneliti. Wibawa (2021) melakukan penelitian pembuatan pelet dengan mencampurkan kayu kaliandra dengan limbah teh dengan beberapa variasi. Karakterisasi dilakukan untuk mengetahui variasi campuran terbaik dari pelet yang dihasilkan. Namun pada penelitian tersebut tidak membandingkan karakterisasi pelet yang dihasilkan dengan nilai standat mutu pelet. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk membandingkan hasil karakterisasi pelet kayu kaliandra dengan standar yang ditetapkan.

## 2. METODE PENELITIAN

Bahan yang digunakan untuk membuat pelet pada penelitian ini adalah kayu kaliandra yang didapatkan dari limbah industri perKayuan di Kabupaten Gresik. Peralatan yang digunakan adalah *moisture meter*, timbangan, *mesh* 100, dan mesin pencetak pelet. Pelet yang telah terbentuk kemudian dikarakterisasi mulai dari geometri produk yaitu diameter pelet dan pengujian kadar air, kadar abu, kadar zat terbang, kadar karbon terikat dan nilai kalori. Pengujian dilakukan di PT. Carsurin dan hasil pengujian kemudian dibandingkan dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) SNI 8021:2014 dan beberapa nilai standar lainnya.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian dimulai dengan mengayak limbah kayu kaliandra dengan mesh 100. Hal ini dilakukan untuk memilah partikel-partikel yang masih memiliki ukuran besar dan material selain kayu agar tidak merusak mesin pelet. Serbuk kayu yang lolos mesh 100 kemudian dikeringkan di bawah sinar matahari hingga mencapai kadar air kurang dari 15%. Proses ini dilakukan untuk mempermudah proses pencetakan dan menghasilkan pelet yang lebih padat dan tidak mudah hancur. Proses selanjutnya adalah memasukkan serbuk kayu kaliandra ke dalam mesin pelet tipe *ring die pellet mill* dengan kecepatan 1200 rpm.

Karakterisasi pada pelet dilakukan untuk mengetahui kualitas pelet yang dihasilkan. Pengujian geometri produk dilakukan untuk mengetahui diameter pelet yang dihasilkan berukuran 7,8 mm hingga 8 mm. Proses selanjutnya adalah pengujian kadar air, abu, zat terbang, karbon terikat, dan nilai kalori. Hasil karakterisasi

kemudian dianalisa dan dibandingkan dengan standar kualitas pelet yang berlaku di Indonesia dan luar negeri. Pelet yang memiliki kualitas tinggi menurut SNI adalah kadar air kurang dari 12%, kadar abu kurang dari 1,5%, kadar zat terbang kurang dari 80%, kadar karbon terikat lebih dari 14% dan nilai kalori yang dihasilkan lebih dari 4000 kkal/kg. Selain itu beberapa negara telah menetapkan standar mutu pelet yang diperbolehkan untuk digunakan dan diimpor kedalam negara masing-masing. Program ini telah berjalan sejak 2010 untuk menjamin pelet kayu berkualitas tinggi dan konsisten. Tabel 2 menjelaskan beberapa standar mutu pelet yang diakui di beberapa negara.

Tabel 2. Standar kualitas pelet di beberapa negara

Standar	Diameter (mm)	Kadar Abu (%)	Kadar Air (%)	Kadar Zat Terbang (%)	Kadar Karbon Terikat (%)	Nilai Kalor (kkal/kg)
Indonesia (SNI)	8	< 1,5	< 12	< 80	>14	>4000
Amerika Serikat (PFI)	6 - 8	< 1	< 8	70 - 80	15-20	>4500
Rusia (GOST R)	6 - 8	< 0,7	< 10	70 - 80	15 - 20	>4540
China (SAC)	6 - 10	< 1,5	< 10	70 - 80	15 - 20	>4660
Jerman (ENplus)	6 - 10	< 1,5	< 10	70 - 80	15 - 20	3940 - 4660

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pelet yang telah berhasil dicetak ditampilkan pada gambar 2. Pelet yang terbuat dari serbuk kayu kaliandra menghasilkan diameter yang seragam dan pangjang pelet yang tidak seragam. Hal ini dikarenakan ketika proses memasukkan serbuk kedalam mesin pelet tidak teratur. Serbuk yang dimasukkan tidak secara kontinyu mengakibatkan hasil pelet yang panjangnya tidak seragam. Pelet kemudian diuji kadar air, kadar abu, kadar karbon terikat, kadar zat terbang dan nilai kalori untuk mengetahui kualitas pelet yang dihasilkan. Hasil pengukuran dan pengujian pelet dapat dilihat pada tabel 3.



Gambar 2. Pelet dari serbuk kayu kaliandra

Tabel 3. Hasil pengujian pelet

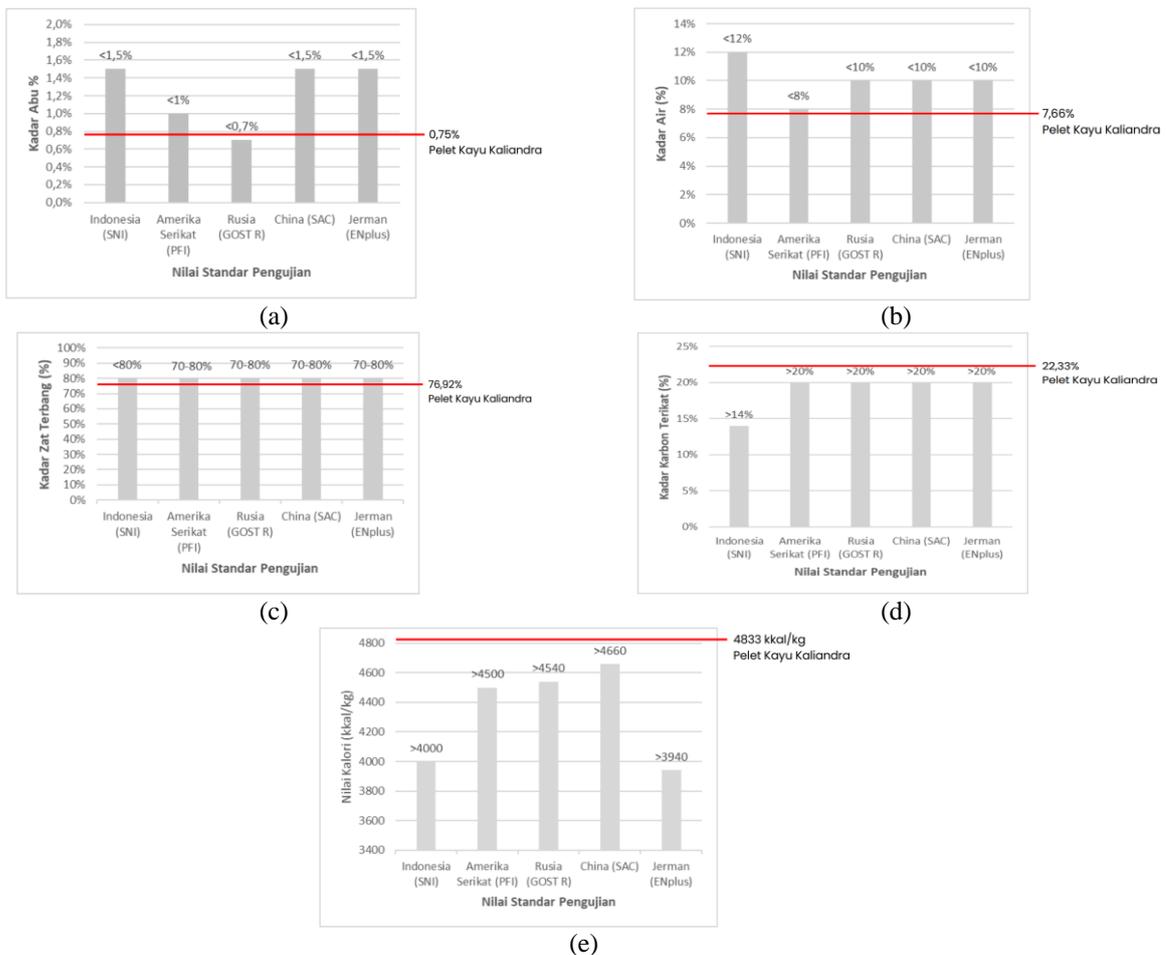
Pengujian	Nilai
Diameter	8 mm
Kadar Abu	0,75%
Kadar Air	7,66%
Kadar Zat Terbang	76,92%
Kadar Karbon Terikat	22,33%
Nilai Kalor	4.833 kkal/kg

Dari tabel 3 diketahui bahwa pelet yang dihasilkan memiliki diameter yang sama yaitu pada 8 mm. Pelet yang dihasilkan sudah sesuai dengan diameter cetakaan yang ada pada mesin pelet. Kadar abu yang dihasilkan dari pelet kayu kaliandra adalah 0,75%. Berdasarkan penelitian yang lainnya kadar abu yang dihasilkan dari pelet kayu kaliandra memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan pelet yang terbuat dari kayu jati, sengon, dan karet. Kandungan kadar abu pelet yang terbuat dari kayu jati 1,67%, kayu sengon 1,92%, dan kayu karet 1,60% [13], [20], [21]. Namun pada pelet yang terbuat dari kayu bangkirai dan kayu meranti merah memiliki kandungan kadar abu masing-masing adalah 0,5% dan 0,7% [22]. Abu yang terkandung dalam bahan bakar padat adalah mineral yang tidak dapat terbakar tertinggal setelah proses pembakaran dan reaksi-reaksi yang menyertai. Abu berpotensi menurunkan mutu bahan padat karena dapat menurunkan nilai kalori [8], [23].

Pengujian kadar air menunjukkan bahwa pelet kayu kaliandra yang dihasilkan memiliki kandungan 7,66%. Kadar air ini telah berkurang dibandingkan ketika serbuk kayu kaliandra sebelum dicetak menjadi pelet. Perbandingan kadar air pada pelet kayu jati dan kayu karet dari penelitian lain adalah 6,97% dan 7,28%. Nilai ini menunjukkan kadar air yang dimiliki kayu jati dan kayu karet lebih rendah dibandingkan dengan kayu kaliandra [13], [20]. Banyaknya kandungan air dapat mempengaruhi kadar abu yang terkandung dalam pelet [24]. Selain itu Liliانا menyatakan bahwa semakin rendahnya kadar air yang terkandung pada pelet akan memudahkan proses pembakaran dan meminimalisir asap yang dihasilkan [8].

Kadar zat terbang dapat digunakan sebagai parameter untuk menilai banyaknya asap yang dihasilkan selama proses pembakaran. Semakin tinggi kadar zat terbang dalam suatu bahan bakar, semakin banyak asap yang dihasilkan. Tingginya kadar zat terbang ini dipengaruhi oleh komponen kimia, seperti zat yang mudah menguap pada suhu tinggi saat pembakaran [25], [26]. Kadar zat terbang yang terdapat pada pelet menunjukkan nilai 76,92%. Karbon terikat adalah fraksi karbon (C) yang terdapat dalam bahan selain air, abu, dan zat terbang. Dengan demikian, jumlah karbon terikat dalam pelet dipengaruhi oleh kadar abu dan kadar zat terbang pada pelet tersebut. Pengukuran karbon terikat menunjukkan jumlah material padat yang bisa terbakar setelah komponen zat terbang dihilangkan dari bahan tersebut. Kandungan kadar karbon terikat yang semakin tinggi akan menghasilkan nilai kalori semakin tinggi, sehingga kualitas bahan bakar akan semakin baik [27], [28].

Nilai kalori adalah jumlah panas yang dihasilkan per satuan berat dari pembakaran sempurna suatu bahan yang mudah terbakar. Nilai kalori yang dihasilkan pelet dari limbah kayu kaliandra adalah 4.833 kkal/kg. Pembuatan pelet dari penelitian lainnya menghasilkan nilai kalori yang lebih rendah dibandingkan pelet kayu kaliandra. Pelet yang terbuat dari kayu jati, karet, sengon, bangkirai dan meranti merah memiliki nilai kalori masing-masing 4247 kkal/kg, 4141 kkal/kg, 4703 kkal/kg, 4427 kkal/kg, dan 4304 kkal/kg [13], [20]–[22]. Parameter utama untuk menentukan kualitas bahan bakar pelet adalah nilai kalorinya. Semakin tinggi nilai kalori, semakin baik kualitas bahan bakar tersebut. Nilai kalori memiliki korelasi positif dengan kadar karbon terikat dalam pelet [24], [29]–[31].



Gambar 3. Perbandingan hasil pengujian pelet kayu kaliandra (a) kadar abu, (b) kadar air, (c) kadar zat terbang, (d) kadar karbon terikat, dan (e) nilai kalori terhadap standar kualitas pelet.

Gambar 3 menunjukkan perbandingan hasil pengujian dengan standar SNI, PFI, GOST R, SAC, dan ENplus. Dari hasil perbandingan tersebut menunjukkan bahwa pelet yang dihasilkan sudah sesuai dengan standar mutu kualitas pelet yang disyaratkan kecuali pada standar yang ditetapkan oleh negara Rusia (GOST R). Perbandingan yang ditunjukkan pada gambar 3 menunjukkan bahwa kadar abu pada pelet kaliandra mencapai 0,75%, sedikit melebihi standar Rusia yang menetapkan batas maksimum <0,7%. Nilai kalori yang dihasilkan pelet merupakan parameter utama dalam menentukan kualitas pelet. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, kayu kaliandra terbukti memiliki kualitas lebih unggul dibandingkan kayu jati, karet, sengon, bangkirai, dan meranti merah. Selain itu, pelet kayu kaliandra telah memenuhi standar uji kualitas pelet yang berlaku, baik di Indonesia maupun di berbagai negara lain.

Program energi terbarukan nasional yang dicanangkan oleh Pemerintah dapat didukung melalui pemanfaatan pelet kayu kaliandra yang memiliki nilai kalori tinggi dan ramah lingkungan sebagai bahan bakar alternatif. Hal ini dapat mempercepat program *net zero emission* yang saat telah ini dilakukan [32]–[34]. Selain itu, potensi ekspor pelet berkualitas tinggi dari kayu kaliandra memberikan peluang bagi Indonesia untuk memperluas pasar energi hijau ke tingkat internasional, sekaligus meningkatkan perekonomian lokal dan nasional. Dapat disimpulkan bahwa limbah industri kayu kaliandra dapat dimanfaatkan menjadi pelet sebagai energi terbarukan yang dapat digunakan di Indonesia dan ekspor di berbagai negara [35].

#### 4. KESIMPULAN

Pengolahan limbah industri kayu kaliandra di Kabupaten Gresik menjadi pelet telah berhasil dilakukan dengan menghasilkan produk berkualitas tinggi. Hal ini dibuktikan melalui parameter utama pengujian, yaitu nilai kalori, yang mencapai 4.833 kkal/kg. Nilai ini menunjukkan bahwa pelet kayu Kaliandra memiliki keunggulan dibandingkan pelet dari kayu jati, karet, sengon, bangkirai, dan meranti merah berdasarkan penelitian sebelumnya. Pelet kayu kaliandra memiliki potensi besar untuk mendukung program *net zero emission* yang tengah diupayakan pemerintah serta membuka peluang Indonesia untuk memperluas pasar energi hijau di tingkat internasional. Selain itu, pelet ini telah memenuhi standar mutu SNI dan sebagian besar standar internasional, meskipun kadar abu masih perlu dikurangi. Penelitian lebih lanjut dapat difokuskan pada pengurangan kadar air pada proses pengeringan sebelum pembuatan pelet untuk menurunkan kadar abu pada pelet kayu kaliandra.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Yusmur, R. Ardiansyah, and S. Marlinda, "Biomass Sources for Sustainable Bioenergy Production in Indonesia," *BIODIVERS - BIOTROP Sci. Mag.*, vol. 1, no. 2, pp. 21–26, 2022, doi: 10.56060/bdv.2022.1.2.1977.
- [2] Hasanuddin dan Lahay, *Pembuatan Biopellet Ampas Kelapa Sebagai Energi Bahan Bakar Alternatif Pengganti Minyak Tanah Ramah Lingkungan*, vol. 53, no. 9. 2012. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [3] P. R. dan H. R., *Energi Hijau*. Jakarta: Penebar Swadaya, 2007.
- [4] T. M. dan Y. Z. Yamada K, M. Kanada, Q. Wang, K. Sakamoto, I. Uchiyama, "Utility of Coal-Biomass Briquette for Remediation of Indoor Air Pollution Caused by Coal Burning in Rural Area, in China," *Proc. Indoor Air*, vol. 3671, 2005.
- [5] R. Permatasari, Muthia Atikayanti, and Elisanti Sugitha Ginting, "Characteristic Tests of Bio-pellets Made of Calliandra Wood as a Renewable Alternative Fuel," *Int. J. Electr. Energy Power Syst. Eng.*, vol. 5, no. 2, pp. 45–49, 2022, doi: 10.31258/ijeepse.5.2.45-49.
- [6] A. V. Febriani *et al.*, "Review: Analisis Potensi dan Tantangan Biomassa Sebagai Bahan Bakar pada PLTU dan PLTBm," *Semin. Nas. Sanis dan Teknol. FT UMJ 2024*, no. April 2024, pp. 1–11, 2024.
- [7] N. B. Nugraha, B. E. Saputro, and P. T. Mesin, "Perolehan Massa Proses Torefaksi Gamal ( Gliricidia Sepium ) Dan Kaliandra (Calliandra Calotyrus )," *J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. M, no. 2, pp. 80–85, 2023.
- [8] N. Iskandar, S. Sulardjaka, M. Munadi, S. Nugroho, R. C. Muhamadin, and D. F. Fitriyana, "The effect of water content and binder made from cassava starch and densification pressure on the quality of rice husk bio-pellets," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1517, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1517/1/012019.
- [9] B. Dan and P. B. Di, *Identifikasi karakteristik...*, Hanani Fisafarani, FT UI, 2010. 2010.
- [10] Y. Sulistio *et al.*, "Effects of Torefaction with Counter-Flow Multi Baffle (COMB) Reactor and Electric Furnace on the Properties of Jabon (Anthocephalus cadamba) Pellets," *J. Sylva Lestari*, vol. 8, no. 1, p. 65, 2020, doi: 10.23960/jsl1865-76.

- [11] Sylviani and E. Y. Suryandari, "Potensi Pengembangan Industri Pelet Kayu sebagai Bahan Bakar Terbarukan Studi Kasus di Kabupaten Wonosobo (Potential Development of Wood Pellets As Renewable Fuel, Case Study of Wonosobo District)," *Penelit. Sos. Ekon. Kehutan.*, vol. 10, no. 4, pp. 235–246, 2013.
- [12] H. Dwi Rizqi *et al.*, "Kajian Potensi Bambu untuk Mendukung Penerapan Co-firing pada Pembangkit Listrik Jawa Bali," *Pengabd. Kpd. Masy.*, vol. 7, no. 1, pp. 2613–9960, 2023, [Online]. Available: <https://doi.org/10.12962/j26139960.v7i1.277>
- [13] S. Wibowo, "Pengaruh Penambahan Tepung Tapioka Pada Karakteristik Pelet Kayu dari Limbah Cabang Kayu Jati Perhutani Plus (JPP)," *J. Ilmu Kehutan.*, vol. 16, no. 1, pp. 50–63, 2022, doi: 10.22146/jik.v16i1.1807.
- [14] P. Mauritio, M. Riniarti, and W. Hidayat, "Pengaruh Variasi Suhu Torefaksi Terhadap Perubahan Warna dan Sifat Fisik Pelet Kaliandra (*Calliandra calothyrsus*)," *War. Rimba J. Ilm. Kehutan.*, vol. 10, no. 5, pp. 1–7, 2022.
- [15] N. Iskandar, S. Sulardjaka, M. Munadi, S. Nugroho, A. S. Nidhom, and D. F. Fitriyana, "The characteristic of bio-pellet made from teak wood waste due to the influence of variations in material composition and compaction pressure," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1517, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1517/1/012017.
- [16] Wahyu Abdul Rahman, I. F. Suri, Indra Gumay Febryano, B. Saputra, Duryat, and W. Hidayat, "Optimizing calliandra (*Calliandra calothyrsus*) biomass pellets: Impact of particle size and bark composition," *Glob. For. J.*, vol. 2, no. 02, pp. 133–146, 2024, doi: 10.32734/gfj.v2i02.15735.
- [17] H. Saptoadi, "The Best Biobriquette Dimension and its Particle Size," *2nd Jt. Int. Conf. "Sustainable Energy Environ. (SEE 2006)*, 2006.
- [18] A. S. Lubis, M. Romli, M. Yani, and G. Pari, "Mutu Biopellet Dari Bagas, Kulit Kacang Tanah Dan Pod Kakao," *J. Teknol. Ind. Pertan.*, vol. 26, no. 1, pp. 77–86, 2016.
- [19] T. Yulianto, I. G. Febryano, D. A. Iryani, A. Haryanto, U. Hasanudin, and W. Hidayat, "Changes in physical properties of oil palm empty fruit bunch pellets caused by torrefaction (in Bahasa Indonesia)," *J. Tek. Pertan. Lampung*, vol. 9, no. 2, pp. 104–111, 2020.
- [20] J. Prayitno, V. Violet, and K. Kurdiansyah, "KARAKTERISTIK PELET DARI KAYU KARET (*Havea brasiliensis*) TIDAK PRODUKTIF DI DESA DANAU SALAK KABUPATEN BANJAR KALIMANTAN SELATAN," *J. Sylva Sci.*, vol. 3, no. 6, p. 1112, 2022, doi: 10.20527/jss.v3i6.4729.
- [21] A. S. Afandi and G. A. Pohan, "Karakteristik Pembakaran Wood Pellet Kayu Sengon," *J. Tek. Mesin Inst. Teknol. Nas. Malang*, pp. 1–7, 2023.
- [22] L. Indrayanti, Afentina, Yanarita, and C. Pidjath, "KUALITAS PELET KAYU PADA BERBAGAI KOMPOSISI BAHAN DARI LIMBAH SERBUK KAYU BANGKIRAI DAN MERANTI MERAH," *Penambahan Natrium Benzoat Dan Kalium Sorbat Dan Kecepatan Pengadukan Sebagai Upaya Penghambatan Reaksi Inversi Pada Nira Tebu*, pp. 54–62, 2014.
- [23] H. Rezaei, F. Y. Panah, C. J. Lim, and S. Sokhansanj, "Pelletization of refuse-derived fuel with varying compositions of plastic, paper, organic and wood," *Sustain.*, vol. 12, no. 11, pp. 1–11, 2020, doi: 10.3390/su12114645.
- [24] N. Cahyani, A. D. Yuniarti, Suhasman, K. T. P. Pangestu, and G. Pari, "Characteristics of bio pellets from spent coffee grounds and pinewood charcoal based on composition and grinding method," *J. Korean Wood Sci. Technol.*, vol. 51, no. 1, pp. 23–37, 2023, doi: 10.5658/WOOD.2023.51.1.23.
- [25] B. Güler and F. Aydın Temel, "Investigation of value-added charcoal production from full-scale hydrothermal carbonization of hazelnut husk and wood waste," *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 14, no. 13, pp. 15119–15127, Jul. 2024, doi: 10.1007/S13399-023-04191-Z/METRICS.
- [26] T. Wibowo, D. Setyawati, Nurhaida, and F. Diba, "KUALITAS BIOPELET DARI LIMBAH BATANG KELAPA SAWIT DAN LIMBAH KAYU PENGGERGAJIAN," *J. Hutan Lestari*, vol. 4, no. 4, pp. 409–417, 2016.
- [27] S. U. Maulana, Ahdiar Fikri *et al.*, "POTENSI KALIANDRA (*Calliandra calothyrsus*) DAN GAMAL (*Gliricidia sp.*) DI DAERAH ISTIMEWA YOGYAKARTA UNTUK PENGEMBANGAN PELET KAYU," *Agrifor*, vol. XX, no. 1, pp. 71–80, 2021.
- [28] I. N. Sukarta and L. P. A. L. Oka, "Analisis Proksimat Pada Pelet Bahan Bakar Dari Kotoran Babi Yang Dikombinasikan Dengan Limbah Kayu," *JST (Jurnal Sains dan Teknol.*, vol. 6, no. 2, pp. 220–227,

- 
- 2017, doi: 10.23887/jstundiksha.v6i2.10613.
- [29] A. Ilari, E. F. Pedretti, C. De Francesco, and D. Duca, "Pellet production from residual biomass of greenery maintenance in a small-scale company to improve sustainability," *Resources*, vol. 10, no. 12, 2021, doi: 10.3390/resources10120122.
- [30] Picchio *et al.*, "Pellet production from woody and non-woody feedstocks : A review on biomass quality evaluation," *Energies*, pp. 1–20, 2020.
- [31] H. Yanti, Y. Mariani, F. Yusro, and Z. Haryono, "Pemanfaatan Kaliandra (*Calliandra calothyrsus*) Sebagai Bahan Baku Briket Arang," *J. Tengkawang*, vol. 13, no. 1, pp. 34–42, 2023.
- [32] D. N. Palupi, S. Sundari, M. I. Syahtaria, and L. Sianipar, "Analisis Dampak Lingkungan dan Keekonomian Pembangkit Listrik Tenaga Co-firing Biomassa dan Baru bara sebagai Upaya Bauran Energi Terbarukan," *El-Mal J. Kaji. Ekon. Bisnis Islam*, vol. 5, no. 3, pp. 1627–1635, 2024, doi: 10.47467/elmal.v5i3.781.
- [33] E. Prasetyo, P. Lestari, R. Hidayat, S. Nur Oktalina, A. Ngadianto, and P. Nugroho, "Penanaman Kaliandra Sebagai Kayu Energi dan Hijauan Makanan Ternak Pada Pertanaman Agroforestri Masyarakat Desa Gerbosari, Samigaluh Kulon Progo," *J. Pengabd. dan Pengemb. Masy.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–10, 2018.
- [34] W. Pradana and A. Bunyamin, "PEMANFAATAN KAYU KALIANDRA DAN LIMBAH TEH SEBAGAI BAHAN BAKU BIOBRIKET," *J. Teknol. Pertan. Andalas*, vol. 25, 2021.
- [35] A. F. Maulana *et al.*, "POTENSI KALIANDRA (*Calliandra calothyrsus*) DAN GAMAL (*Gliricidia sp.*) DI DAERAH ISTIMEWA YOGYAKARTA UNTUK PENGEMBANGAN PELET KAYU," *Agrifor*, vol. 20, no. 1, p. 71, 2021, doi: 10.31293/agrifor.v20i1.4924.