

KONVERSI ENERGI BRIKET SAMPAH DAUN DAN RANTING POHON MENUJU *ECO-CAMPUS*

OTONG NURHILAL^{1,*}, VIERI ARIANTO², TASYA², WAHYU KRISTIAN SUGANDI³

¹Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Padjadjaran, Jl. Ir. Soekarno KM 21, Jatinangor 45363, Kabupaten Sumedang, Jawa Barat, INDONESIA

²Program Studi Sarjana Fisika, FMIPA, Universitas Padjadjaran, Jl. Ir. Soekarno KM 21, Jatinangor 45363, Kabupaten Sumedang, Jawa Barat, INDONESIA

³Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, FTIP, Universitas Padjadjaran
Jl. Ir. Soekarno KM 21, Jatinangor 45363, Kabupaten Sumedang, Jawa Barat, INDONESIA

Abstrak. *Eco-campus* (green campus) adalah program untuk menciptakan kondisi kampus yang ramah lingkungan melalui penghijauan di berbagai sudut kampus. Salah satu aktivitas program kampus hijau adalah memperbanyak penanaman pepohonan sehingga menciptakan kondisi yang sejuk, oksigen bersih yang melimpah dan keindahan. Namun, keberadaan pohon-pohon yang banyak akan menghasilkan sampah daun-daun dan ranting-ranting pohon yang sudah kering. Salah satu solusi yang dapat dilakukan adalah mengelola sampah tersebut dengan mengolah sampah organik menjadi produk baru yang berguna seperti eko-briket/biobriket. Tujuan dari penelitian ini adalah konversi limbah organik menjadi energi alternatif berupa briket. Proses utama pada pembuatan briket adalah torefaksi, kompresi briket dan pengujian proksimat serta laju pembakaran. Torefaksi dilakukan pada variasi suhu 200°C, 300°C, and 400°C selama 30, 60, 90, 120 menit. Briket dibuat dengan menggunakan variasi ukuran partikel 20 mesh, 40 mesh, 60 mesh dan variasi tekanan 300 kgf/cm², 400 kgf/cm², 500 kgf/cm². Hasil pengujian proksimat arang menunjukkan kadar abu, kadar air, zat volatil dan karbon terikat SNI 01-6235-2000. Hasil pengujian nilai kalor tertinggi sebesar 5650 kal/g pada suhu 400°C dengan waktu 90 menit. Hasil pengujian laju pembakaran briket diperoleh dengan ukuran partikel arang 60 mesh dengan tekanan 500 kgf/cm² menghasilkan briket dengan kerapatan tertinggi yaitu 0,88 g/cm³, laju pembakaran sebesar 0,71 g/menit dan waktu pembakaran selama 88,07 menit.

Kata kunci: *eco-campus*, torefaksi, briket, nilai kalor, laju pembakaran.

Abstract. *Eco-campus* (green campus) is a program to create environmentally friendly campus conditions through greening in various corners of the campus. One of the green campus program activities is to increase trees to create cool conditions, abundant clean oxygen, and beauty. However, the presence of many trees will produce waste from leaves and dry tree branches. One solution that can be done is to manage this waste by reprocessing organic waste into useful new products such as eco-briquettes/biobriquettes. This research aims to convert organic waste into alternative energy in the form of briquettes. The main processes in making briquettes are torrefaction, briquette compression, proximate testing, and burning rate. Torrefaction was carried out at varying temperatures of 200°C, 300°C, and 400°C for 30, 60, 90, and 120 minutes. Briquettes are made using particle size variations of 20 mesh, 40 mesh, 60 mesh, and pressure variations of 300 kgf/cm², 400 kgf/cm², 500 kgf/cm². The results of proximate charcoal testing show ash content, water content, volatile substances, and bound carbon SNI 01-6235-2000. The highest heating value test results were 5650 cal/g at a temperature of 400°C with a time of 90 minutes. The results of the briquette burning rate test were obtained with a charcoal particle size of 60 mesh with a pressure of 500 kgf/cm², producing briquettes with the highest density, namely 0.88 g/cm³, combustion rate of 0.71 g/minute and a burning time of 88, 07 minute.

Keywords: *eco-campus*, torrefaction, briquettes, calorific value, combustion rate.

* Email: otong.nurhilal@unpad.ac.id

1. Pendahuluan

Pemanasan global merupakan salah satu permasalahan yang menarik perhatian dunia. Pemanasan global adalah peningkatan suhu permukaan bumi yang disebabkan oleh terperangkapnya CO₂, CH₄, N₂O, dan Chlorofluorocarbon (CFC) di atmosfer. Keempat jenis gas tersebut mempunyai presentasi yang berbeda-beda pengaruhnya terhadap pemanasan global, dengan 50% presentasi terbesar berasal dari CO₂. [1]. Gas CO₂ dihasilkan dari proses pembakaran produk utama dan residu biomassa (limbah). Suhu pembakaran yang rendah dan kondisi kekurangan oksigen yang terkait dengan pembakaran limbah dapat mengakibatkan pembakaran tidak sempurna dan peningkatan emisi polutan. Polutan akan berdampak pada cacatnya tanaman dan hilangnya produktivitas secara besar-besaran. Dampak pencemaran udara regional terhadap spesies tanaman lokal merupakan salah satu masalah lingkungan hidup yang utama. Polutan udara mempunyai dampak jangka panjang terhadap tanaman yang mempengaruhi kandungan CO₂, intensitas cahaya, suhu dan pengendapan [2].

Salah satu yang menjadi permasalahan utama sebagai sumber polutan udara adalah pembakaran sampah yang berasal dari dedaunan kering ataupun ranting pohon. Kawasan Universitas Padjadjaran merupakan kawasan pendidikan yang memiliki luas lahan hijau sebesar 90,37%. Lahan hijau tersebut terbagi menjadi 35,08% vegetasi hutan 35,08% vegetasi hutan (625.009,83 m²); 41,77% vegetasi taman (744.308 m²); serta 10,96% area resapan air (195.356,39 m²). Salah satu aktivitas program kampus hijau adalah memperbanyak penanaman pepohonan sehingga menciptakan kondisi alam yang sejuk, oksigen bersih yang melimpah dan keindahan. Kampus sebagai tempat pendidikan tentunya memiliki peran yang sangat penting dalam mengatasi polutan dan pemanasan global disekitar kampus. Unpad menerapkan prinsip disain kampus hijau yang melaksanakan program eco-kampus (green campus) [3]. Untuk mencapai tujuan kampus hijau, kampus harus mengembangkan teknologi, investasi penelitian dan teknologi serta peningkatan infrastruktur universitas untuk mendukung kesehatan kelestarian lingkungan alam melalui penggunaan energi, air dan sumber daya lainnya secara efisien, mengurangi limbah, polusi dan degradasi lingkungan. [4]

Sumber polutan organik dari kampus yang memiliki lahan hijau luas seperti Unpad, adalah pembakaran sampah yang berasal dari daun-daun kering dan ranting pohon. Berdasarkan data lapangan dari kampus tertentu, sampah organik berupa daun-daun dan ranting-ranting pohon yang dikumpulkan oleh pusat Kebersihan, Keindahan dan Kenyamanan Lingkungan (K3L) dilingkungan kampus besar mencapai 1,2 ton/hari. Di kampus-kampus limbah dedaunan di dominasi oleh daun Ketapang, Mahoni, dan Kerai Payung [5]. Cara tradisional untuk mengelola jenis limbah ini meliputi pengomposan, pupuk, pembuatan pakan ternak, dan penimbunan. Pengomposan biasanya digunakan untuk perbaikan tanah dari unsur hara kaya akan limbah organik seperti sisa pertanian [6], hewan pupuk kandang [7].

Strategi pengolahan limbah modern yang berkelanjutan menekankan pada konversi limbah menjadi energi, bahan bakar, dan produk untuk memanfaatkan sumber daya biomassa secara sistematis, yang juga dianggap sebagai cara yang lebih bersih dalam mengolah biomassa dan limbah organik [8], dan membangun bioekonomi sirkular berbasis biomassa lignoselulosa [9]. Berdasarkan sifat bahan baku sampah organik yang berbeda, seperti kandungan air, kandungan organik yang mudah menguap, nilai kalor, kandungan abu, dll, maka jalur konversi yang berbeda seperti fisikokimia (misalnya pelet), biokimia (misalnya pencernaan anaerobik, bio-metanasasi), dan termokimia (misalnya pembakaran, rute pirolisis, konversi hidrotermal) dapat diadopsi untuk memanfaatkan dan mengelola limbah biomassa ini secara efektif. Salah satu solusi yang dapat

dilakukan adalah mengelola sampah tersebut dengan mengolah kembali sampah organik menjadi produk baru yang berguna seperti eko-briket/biobriket.

Briket merupakan energi alternatif yang dimanfaatkan sebagai sumber energi pengganti bahan bakar fosil. Pembuatan briket dilakukan dengan menggunakan biomassa sebagai bahan utama dan bahan perekat sebagai perekatnya. Banyak faktor yang mempengaruhi kualitas briket yang dihasilkan seperti berat jenis bahan baku, jumlah perekat, ukuran partikel serbuk arang dan tekanan pembriketan [10]. Tekanan pada proses pencetakan briket mempengaruhi hasil akhir briket karena semakin tinggi tekanan maka briket yang dihasilkan memiliki densitas yang tinggi tetapi jika tekanan terlalu tinggi maka berpotensi akan membuat briket pecah dan densitasnya juga semakin tinggi sehingga akan mempengaruhi laju pembakaran dan waktu pembakaran dari briket tersebut. Selain itu, ukuran partikel juga dapat mempengaruhi laju pembakaran dan densitas dari suatu briket.

Ukuran partikel yang kecil akan membuat densitas pada suatu briket semakin tinggi karena ruang antar partikel yang ada pada briket akan semakin rapat terisi sehingga laju pembakarannya lambat, begitupun sebaliknya dimana jika ukuran partikel yang besar maka densitas dari briket menjadi rendah [11,12]. Untuk mendapatkan briket yang optimal, diperlukan variasi ukuran partikel (mesh). Oleh sebab itu, pada penelitian ini akan dilakukan konversi energi berupa briket dengan bahan utama biomassa dari sampah daun dan ranting pohon kering yang ada di area kampus. Variasi suhu torefaksi, dan besar tekanan pada pencetakan briket dilakukan untuk mengetahui kondisi optimal dari proses pembuatan eko-briket tersebut.

2. Bahan dan Metode

Sampel daun-daun dan ranting pohon diambil dari TPA area kampus lalu dibersihkan dan selanjutnya dikeringkan dibawah sinar matahari selama tiga hari dan dicacah untuk memperkecil ukuran. Proses torefaksi dengan furnace dilakukan pada suhu 200°C, 300°C, dan 400°C dan variasi waktu selama 30, 60, 90, 120 menit. Arang yang dihasilkan dihaluskan dengan saringan ukuran partikel 20, 40 dan 60 mesh untuk mendapatkan briket dengan kerapatan yang beragam. Kualitas arang dilihat dari hasil pengujian yang meliputi kadar air, kadar abu, kadar volatile, kadar karbon terikat dan energi (nilai kalor).

Tahap pembuatan briket dilakukan dengan mencampurkan arang dan perekat dengan rasio arang biomassa 90% dan bahan perekat 10%. Bahan biomassa dan bahan perekat diaduk hingga tercampur merata. Bahan yang sudah dicampurkan dengan bahan perekat kemudian ditimbang dengan menggunakan timbangan digital agar tiap briket memiliki massa yang sama, dengan berat sebesar 50 gram. Kemudian adonan briket tersebut dimasukkan kedalam alat pencetak briket dan dicetak dengan menggunakan tiga variasi tekanan yaitu 300 kgf/cm², 400 kgf/cm², 500 kgf/cm². Briket biomassa yang sudah dicetak kemudian dikeringkan kembali dibawah matahari selama 2 hari. Tahap akhir adalah pengujian briket meliputi uji dimensi briket, laju pembakaran dan nilai kalor.

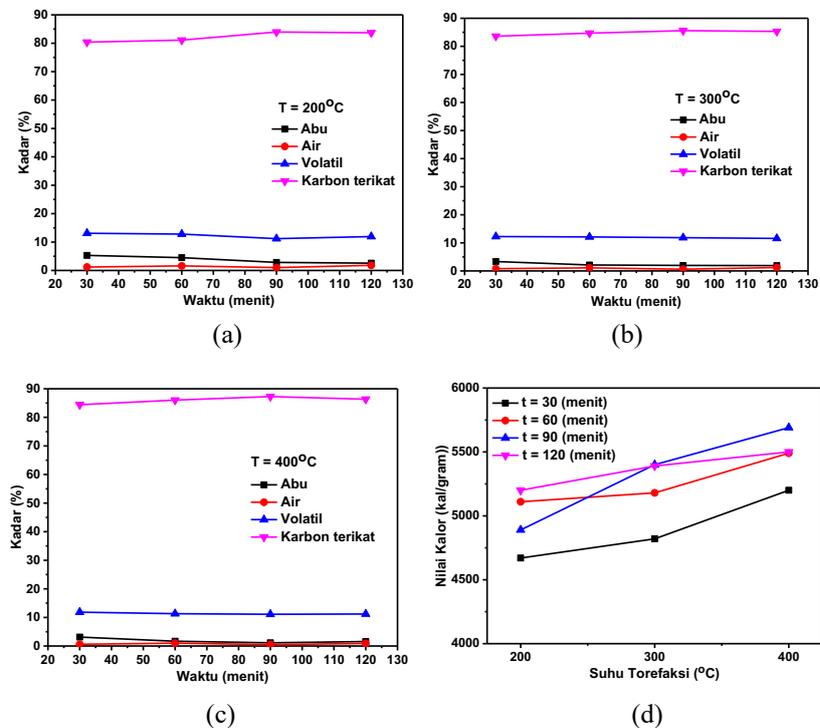
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Uji Proksimasi

Hasil uji proksimasi arang campuran daun dan ranting ditunjukkan pada Gambar 1. Berdasarkan Gambar 1 (a-c), kadar abu menurun dengan meningkatnya suhu dan waktu torefaksi. Nilai kadar

abu tertinggi sebesar 5,30% untuk suhu torefaksi 200 °C selama 30 menit. Nilai kadar abu berbeda-beda bergantung pada jenis biomassa. Kadar abu merupakan ukuran bahan biochar yang tidak mudah terbakar. Nilai kadar abu *bio-char* berkisar minimal 5,5% pada suhu 200°C dengan waktu tinggal (*residence time*) 60 menit [13]. Komposisi fraksi abu yang ada dalam biomassa merupakan faktor penting yang mempengaruhi degradasi termal biomassa selanjutnya melalui proses pirolisis [14]. Kadar abu yang tinggi biasanya menghasilkan emisi bahan partikulat yang lebih tinggi karena kondensasi logam alkali dan alkali tanah dengan titik leleh rendah di dalam gas buang seiring penurunan suhu [15]

Kadar air menurun dengan meningkatnya suhu dan waktu torefaksi meskipun terjadi fluktuasi pada suhu dan waktu torefaksi tertentu. Kadar air terkecil adalah 0,5% diperoleh pada suhu 400°C dan waktu 90 menit. Fluktuasi perubahan kadar air terjadi karena bahan baku arang memiliki tingkat kekeringan yang berbeda pada saat proses torefaksi.



Gambar 1. Uji proksimasi dan nilai kalor arang pada (a)-(c) variasi suhu dan (d) waktu torefaksi.

Zat volatil (bahan yang mudah menguap) mewakili komponen karbon, hidrogen dan oksigen yang ada dalam biomassa, yang bila dipanaskan akan diubah menjadi uap, biasanya merupakan campuran hidrokarbon rantai panjang dan pendek. Di hampir semua biomassa, jumlah bahan mudah menguap lebih tinggi dibandingkan batubara bitumen. Biomassa umumnya memiliki kandungan bahan mudah menguap sekitar 70-86% dari berat biomassa kering, dibandingkan dengan batubara yang hanya mengandung sekitar 35% bahan mudah menguap. Berdasarkan Gambar 1 (a,b dan c), zat volatile arang berkisar 11,10 % - 13,10 % bergantung pada suhu dan waktu torefaksi. Tinggi rendahnya zat terbang dapat berpengaruh terhadap mudah atau tidak terbakarnya arang [16].

Persentase karbon tetap biasanya ditentukan oleh perbedaan kuantitas lainnya, seperti kadar air, bahan mudah menguap dan kadar abu, dari total biomassa dalam persentase. Pada dasarnya, karbon tetap suatu bahan bakar adalah persentase karbon yang tersedia untuk pembakaran arang setelah semua bahan mudah menguap dihilangkan dari biomassa. Jumlah ini tidak sama dengan jumlah total karbon dalam bahan bakar (karbon akhir) karena terdapat sejumlah besar karbon yang dilepaskan dalam bentuk hidrokarbon dalam bahan mudah menguap. Karbon tetap memberikan indikasi signifikan mengenai fraksi arang yang tersisa setelah fase penguapan. Karbon ini akan bereaksi dengan oksigen menghasilkan panas. [17]. Berdasarkan Gambar 1 (a)-(c), kadar karbon tetap yang dihasilkan berkisar 79,40 - 87,27%. Kadar karbon tetap tertinggi diperoleh pada suhu 400 °C dengan waktu 90 menit sebesar 87,31%. Sedangkan untuk kadar karbon tetap terendah didapatkan di 200°C dengan waktu 30 menit dengan nilai 79,40%. Kadar karbon tetap yang tinggi dihasilkan dari dekomposisi lignoselulosa yang terkandung pada bahan.

3.2 Uji Nilai Kalor

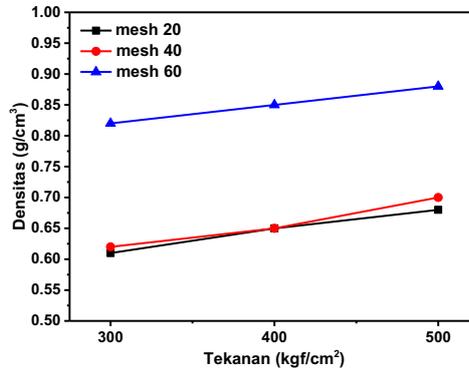
Nilai kalor adalah jumlah panas yang dilepaskan ketika satu satuan berat bahan bakar terbakar sempurna dan produk pembakaran didinginkan hingga 298K. Hasil uji nilai kalor arang campuran daun dan ranting ditampilkan pada Gambar 1 (d). Berdasarkan Gambar 1 (d), arang dengan suhu torefaksi 400°C dengan waktu 90 menit memiliki nilai kalor paling tinggi (5690 kal/g) dibandingkan dengan variasi suhu dan waktu yang lainnya. Kadar air dan abu yang rendah mempengaruhi perhitungan nilai kalor di suhu 400°C dan waktu 90 menit. Nilai kalor tinggi menunjukkan proses pembakaran terjadi pada sebagian besar bahan.

3.3 Pembuatan dan Pengukuran Dimensi Briket

Hasil pengukuran dimensi briket ditampilkan pada Tabel 1, yang menunjukkan peningkatan massa briket dengan meningkatnya tekanan pada proses pembuatan briket dan menurunnya ukuran partikel. Hal tersebut dikarenakan semakin halus ukuran partikel arang maka briket menjadi lebih padat dan ruang antar partikel pada briket semakin kecil. Begitupun dengan tekanan, semakin besar tekanan yang diberikan menghasilkan briket dengan massa yang lebih besar dengan tinggi briket yang lebih rendah. Adapun nilai densitas briket ditunjukkan pada Gambar 2. Densitas briket meningkat terhadap peningkatan tekanan pada proses pembuatan briket. Dari variasi tekanan dan ukuran partikel briket diperoleh densitas briket berkisar dari 0,61-0,88 g/cm³.

Tabel 1. Data Dimensi Briket

Kode sampel	Tekanan (kgf/cm ²)	Ukuran (mesh)	Massa (g)	Diameter (cm)	Tinggi (cm)
B32	300	20	63,6	4,25	7,4
B34		40	64,2		7,3
B36		60	68,4		5,9
B42	400	20	66,0	4,25	7,2
B44		40	64,7		7,0
B46		60	70,2		5,8
B53	500	20	66,2	4,25	6,9
B54		40	67,2		6,8
B56		60	72,1		5,8



Gambar 2. Densitas briket terhadap tekanan briket.

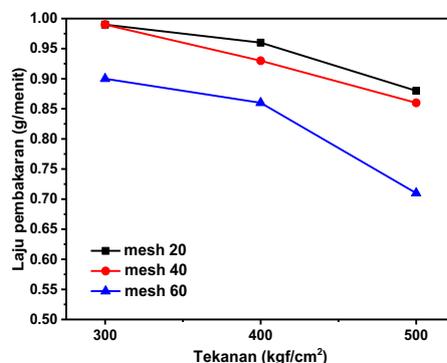
3.4 Uji Pembakaran Briket

Hasil uji pembakaran briket dapat dilihat pada Tabel 2. Waktu pembakaran briket meningkat terhadap densitas briket. Hal ini disebabkan karena keberadaan oksigen yang terbatas pada briket dengan densitas tinggi. Waktu pembakaran dihitung pada saat briket mulai terbakar sampai briket habis terbakar dan menjadi abu. Waktu pembakaran merupakan waktu yang dibutuhkan briket untuk melakukan pembakaran sampai briket habis terbakar. Waktu pembakaran terlama terjadi pada briket dengan ukuran partikel arang 60 mesh di tekanan 500 kgf/cm² yaitu 88,07 menit dan waktu pembakaran tercepat ada pada briket dengan ukuran partikel arang 20 mesh di tekanan 300 kgf/cm² yaitu 52,19 menit.

Tabel 2. Uji Pembakaran Briket Daun dan Ranting

Kode sampel	Tekanan (kgf/cm ²)	Ukuran partikel (mesh)	Waktu Pembakaran (menit)
B32	300	20	52,19
B34		40	55,83
B36		60	67,20
B42	400	20	59,00
B44		40	61,38
B46		60	71,15
B52	500	20	64,03
B54		40	68,60
B56		60	88,07

Hasil pengujian laju pembakaran briket ditunjukkan pada Gambar 3. Berdasarkan variasi tekanan dan ukuran partikel briket diperoleh laju pembakaran terbaik adalah 0,71 g/menit pada tekanan 500 kgf/cm² dengan ukuran partikel 60 mesh. Selain itu, densitas juga berpengaruh terhadap laju pembakaran. Semakin tinggi densitas yang dimiliki oleh suatu briket maka semakin rendah laju pembakarannya tetapi semakin tahan lama waktu pembakaran briket tersebut. Hal tersebut dikarenakan briket yang memiliki densitas yang tinggi akan membuat susunan partikel briket semakin rapat dan ruang antar partikel pada briket akan semakin kecil sehingga oksigen sulit untuk masuk dan hal ini dapat memperlambat proses pembakaran briket dan briket menjadi lebih sulit untuk terbakar habis.



Gambar 3. Laju pembakaran terhadap tekanan briket.

3.5 Uji Nilai Kalor Briket

Pengujian nilai kalor dilakukan untuk mengetahui pengaruh ukuran partikel dan tekanan terhadap nilai kalor. Tabel 3 menunjukkan perbandingan nilai kalor tiap ukuran partikel antara arang biomassa sebelum dijadikan briket dan yang sudah dijadikan briket. Nilai kalor arang biomassa tertinggi yaitu 5433 kal/g pada ukuran partikel 40 mesh dan nilai kalor briket tertinggi yaitu 5208 kal/g pada ukuran partikel 40 mesh sedangkan nilai kalor arang biomassa terendah yaitu 5351,5 kal/g pada ukuran partikel 60 mesh dan nilai kalor briket terendah yaitu 4926 kal/g pada ukuran partikel 20 mesh. Tabel 4 menunjukkan bahwa nilai kalor antara arang biomassa dan briket biomassa sedikit berbeda dikarenakan adanya pengaruh bahan perekat dan air yang ditambahkan pada proses pembriketan sehingga nilai kalor mengalami penurunan.

Tabel 3. Nilai Kalor Briket Daun dan Ranting

Ukuran partikel (mesh)	Nilai kalor arang (kal/g)	Nilai kalor briket (kal/g)
20	5376,5	4926
40	5433,0	5208
60	5351,5	5108

4. Kesimpulan

Sampah dari daun-daun dan ranting pohon berhasil dikonversi menjadi bahan bakar briket. Proses torefaksi telah menghasilkan arang dengan kualitas yang memenuhi standar SNI. Nilai kalor arang tertinggi dihasilkan pada suhu torefaksi 400°C selama 90 menit dengan nilai kalor 5690 kal/g. Nilai kalor arang biomassa tertinggi yaitu 5433 kal/g pada ukuran partikel 40 mesh dan nilai kalor briket tertinggi yaitu 5208 kal/g pada ukuran partikel 40 mesh. Laju pembakaran terbaik adalah 0,71 g/menit pada tekanan 500 kgf/cm² dengan ukuran partikel 60 mesh. Arang daun-daun dan ranting pohon telah berhasil di densifikasi menjadi briket atau eko-briket sebagai bahan bakar alternatif. Densitas, laju pemkajaran dan nilai kalor briket yang baik telah ditunjukkan dari hasil pengujian. Berdasarkan keberhasilan konversi energi ini proses pengolahan sampah daun-daun dan ranting pohon memberikan kontribusi terhadap terwujudnya eko-kampus (*green-campus*).

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis ucapkan terimakasih kepada Laboratorium Energi Departemen Fisika FMIPA dan Laboratorium Mekanik Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem FTIP Universitas Padjadjaran yang telah memberikan fasilitasnya selama proses penelitian.

Daftar Pustaka

- [1] Nedhisa, P. I., & Tjahjaningrum, I. T. (2020). "Estimasi Biomassa, Stok Karbon dan Sekuestrasi Karbon Mangrove pada *Rhizophora mucronata* di Wonorejo Surabaya dengan Persamaan Allometrik." *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 8(2), E61 E65.
- [2] Saadullah Khan Laghari, Mudassir Asrar Zaidi and Ghulam Razaq. (2015). "Impact Of Solid Waste Burning Air Pollution on Some Physio Anatomical Characteristics of Some Plants." *J. Bot.*, 47(1): 225-232.
- [3] Jessica Finlay, Jennifer Massey. (2012). "Eco-campus: applying the ecocity model to develop green university and college campuses." *International Journal of Sustainability in Higher Education* Vol. 13 No. 2, pp. 150-165.
- [4] Gislaine Ap. Moreira, Emilia Wanda Rutkoskwi. (2021). "Zero Waste Strategy for a Green Campus." *Journal of Sustainability Perspectives: Special Issue*, 367-373.
- [5] Maulana, A. (2023). Unpad Commits to Be a Sustainable Campus. *Unpad Commits to Be a Sustainable Campus*. <https://www.unpad.ac.id/en/2023/12/unpad-commits-to-be-a-sustainable-campus>.
- [6] Wenquan Ruan, Changbo Zhang, Yun Deng, Huanhuan Ma, Ian Beadham. (2022). "Enhancing rice straw compost with an amino acid-derived ionic liquid as additive." *Bioresource Technology* 345 (2022) 126387).
- [7] Yan Xu, Jing Li, Xubo Zhang, Lingqing Wang, Xiangbo Xu, Li Xu, Huarui Gong, Hanyou Xie, Fadong Li. (2019). "Data integration analysis: Heavy metal pollution in China's large-scale cattle rearing and reduction potential in manure utilization." *Journal of Cleaner Production* 232, 308e317.
- [8] R. A. Mancebo Boloy, Augusto da C. Reis, E. Medeiros Rios, J. de Araújo Santos Martins, Laene Oliveira Soares, Vanessa Aparecida de Sá Machado, Danielle Rodrigues de Moraes. (2021). "Waste-to-Energy Technologies Towards Circular Economy: a Systematic Literature Review and Bibliometric Analysis." *Water Air Soil Pollut* 232: 306
- [9] Cesar D. Pinales-Márquez Araceli Loredo-Treviño, Rosa M. Rodríguez-Jasso, Debora Nabarlatz, Rafael G. Araújo, Beatriz Gullón, Héctor A. (2021). "Circular bioeconomy and integrated biorefinery in the production of xylooligosaccharides from lignocellulosic biomass: A review." *Industrial Crops & Products* 162, 113274.
- [10] R. P. Dewi, T. J. Saputra, and S. J. Purnomo, "Analisis karakteristik briket arang serbuk gergaji dan tempurung kelapa," *J. Tek. Mesin Indones.*, vol. 17, no. 1, pp. 1–5, 2022.
- [11] Machsalmina, A. S. Ismy, and M. Razi, "pengaruh variasi tekanan terhadap karakteristik biobriket cangkang kelapa sawit dengan menggunakan mesin pencetak biobriket," *J. Mesin Sains Terap.*, vol. 6, no. 2, pp. 110–116, 2022.
- [12] E. I. Briyartendra and W. Widi, "Pengaruh Ukuran Partikel dan Tekanan Kompaksi Terhadap Karakteristik Briket Kayu jati," *J. Inov. Mesin*, vol. 4, no. 2, pp. 2–7, 2019.
- [13] J. M. Makavana, P. N. Sarsavadia and P. M. Chauhan. (2020). "Effect of Pyrolysis Temperature and Residence Time on Bio-char Obtained from Pyrolysis of Shredded Cotton Stalk." *International Research Journal of Pure & Applied Chemistry* 21(13): 10-28, Article no. IRJPAC.59927 ISSN: 2231-3443, NLM ID: 101647669
- [14] Lokeshwar Puri, Yulin Hu, Greg Naterer. (2024). "Critical review of the role of ash content and composition in biomass pyrolysis." *Front. Fuels*. 2:1378361. doi: 10.3389/ffuel.2024.1378361).

- [15] Peng xiang Sun, Chenglong Wang, Miao Zhang, Lin Cui, Yong Dong. (2023). "Ash problems and prevention measures in power plants burning high alkali fuel: Brief review and future perspectives." *Science of the Total Environment* 901, 165985.
- [16] Miao Miao, Boyu Deng, Hao Kong, Hairui Yang, Junfu Lyu, Xiaoguo Jiang, Man Zhang. (2021). "Effects of volatile matter and oxygen concentration on combustion characteristics of coal in an oxygen-enriched fluidized bed." *Energy* 220, 119778.
- [17] S. Thiru, Ramesh Kola, Manish Kumar Thimmaraju, C. Sowmya Dhanalakshmi, Vipin Sharma, P. Sakthi, Lakshmana Phaneendra Maguluri, L. Ranganathan 8 & J. Isaac Joshua Ramesh Lalvani. (2024). "An analytical characterization study on biofuel obtained from pyrolysis of *Madhuca longifolia* residues." *Scientific Reports*. 14:14745..