

Pengaruh Suhu dan Waktu Pirolisis terhadap Karakteristik Arang dari Tempurung Kelapa

Effect of Pyrolysis Temperature and Time on Characteristics of Coconut Shell Charcoal

Rosdanelli Hasibuan*, Hans Martua Pardede

Departemen Teknik Kimia, Universitas Sumatera Utara, Jl. Almamater Kampus USU, Medan, 20155, Indonesia

*Email: rosdanelli@usu.ac.id

Article history:

Diterima : 15 Maret 2022
Direvisi : 2 Juli 2022
Disetujui : 14 November 2022
Mulai online : 24 Maret 2023

E-ISSN: 2337-4888

How to cite:

Rosdanelli Hasibuan, Hans Martua Pardede. (2023). Pengaruh Suhu dan Waktu Pirolisis terhadap Karakteristik Arang dari Tempurung Kelapa. Jurnal Teknik Kimia USU, 12(1), 46-53.

ABSTRAK

Meningkatnya produksi buah kelapa mengakibatkan tempurung yang dihasilkan juga semakin meningkat. Tempurung kelapa memiliki kandungan lignin sebesar 33,30% sehingga memiliki potensi untuk dikonversi menjadi arang melalui proses pirolisis. Pirolisis adalah proses dekomposisi termal yang terjadi tanpa udara atau dengan sedikit udara untuk mengubah biomassa menjadi arang. Arang tempurung kelapa dapat dimanfaatkan untuk *co-firing* batu bara dalam mengembangkan energi baru terbarukan. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan suhu dan waktu pirolisis terbaik dalam pembuatan arang tempurung kelapa berkalori tinggi yang sesuai dengan SNI 06-4369-1996. Kondisi operasi pirolisis tempurung kelapa pada suhu 350 °C, 450 °C dan 550 °C serta waktu pirolisis 2 jam, 3 jam dan 4 jam. Hasil penelitian diperoleh arang dengan nilai kalori tertinggi yaitu 7.750,96 kal/g, dengan *yield* 30,10 %, kadar air 2,75 %; kadar abu 2,70 % dan kadar zat terbang 9,50 % yang dihasilkan pada suhu 450 °C dan waktu pirolisis 3 jam.

Kata kunci: arang, biomassa, lignin, pirolisis, tempurung kelapa

ABSTRACT

The increased production of coconut has increased by the shell produced, even though this coconut shell has lignin content of 33.30% so it has the potential to be converted into charcoal through the pyrolysis process. Pyrolysis is a thermal decomposition process that occurs without air or with little air to convert biomass into charcoal. Coconut shell charcoal can be used for coal *co-firing* in developing new and renewable energy. This study aimed to obtain the best pyrolysis temperature and time in the manufacture of high-calorific value coconut shell charcoal in accordance with SNI 06-4369-1996. Coconut shell pyrolysis was carried out at temperatures of 350 °C, 450 °C and 550 °C and pyrolysis times of 2 hours, 3 hours and 4 hours. The results showed that charcoal with the highest calorific value was produced at a temperature of 450 °C and a pyrolysis time of 3 hours. The resulting charcoal had calorific value of 7,750.96 cal/g, yield of 30.10%, and contained 2.75% water, 2.70% ash and 9.50% volatile matter.

Keyword: charcoal, biomass, lignin, pyrolysis, coconut shell



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International.
<https://doi.org/10.32734/jtk.v12i1.8534>

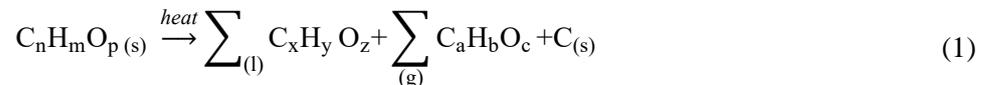
1. Pendahuluan

Batu bara merupakan salah satu energi fosil yang banyak dipakai menjadi sumber energi listrik pada beberapa sektor industri dan pembangunan. Perkembangan kebutuhan akan batu bara semakin meningkat sesuai dengan perkembangan pembangunan Indonesia. Di bidang industri, batu bara digunakan sebagai sumber energi terutama sebagai bahan bakar pembangkit listrik. Penggunaan batu bara sebagai pembangkit energi memiliki suatu kendala, yaitu timbulnya emisi gas rumah kaca (GRK) sebagai penyebab utama pemanasan

global yang sedang marak diperdebatkan [1]. Di sisi lain karena batu bara adalah energi fosil yang tidak bisa diperbaharui maka kekhawatiran akan pasokan ini diperkirakan tidak akan bertahan lebih lama [2]. Untuk mengatasi masalah tersebut maka pemerintah Indonesia mengeluarkan Peraturan Presiden Republik Indonesia No. 5 tahun 2006 tentang kebijakan energi nasional untuk mengembangkan sumber-sumber energi alternatif (terbarukan) [3].

Energi terbarukan adalah energi yang sumbernya tersedia di alam dalam jumlah besar karena merupakan bagian dari proses alam atau sumbernya dapat diproduksi dalam waktu yang relatif singkat [4]. Salah satu energi alternatif adalah dengan menggunakan energi biomassa. Energi biomassa adalah sumber energi yang berasal dari sumber daya alam yang dapat diperbarui sehingga memungkinkan digunakan sebagai bahan bakar alternatif [5]. Salah satunya bersumber dari tempurung kelapa. Indonesia memiliki potensi besar produksi kelapa. Tanaman kelapa tersebar luas baik di pekarangan ataupun perkebunan hampir di seluruh wilayah Indonesia. Indonesia memiliki perkebunan kelapa seluas 3.417.951 hektar [6]. Produksi kelapa rata-rata yaitu 3 juta ton per tahun dan limbah tempurung kelapa yang dihasilkan sekitar 360 ribu ton per tahun [7]. Limbah tempurung memiliki potensi sebagai energi alternatif biomassa.

Pirolisis adalah teknik konversi mengubah biomassa menjadi arang [8]. Berbagai teknologi konversi biomassa di antaranya pirolisis adalah teknik yang relatif sederhana di mana bahan organik dipanaskan tanpa oksigen [9]. Pada proses pirolisis, molekul besar hidrokarbon biomassa dipecah menjadi molekul yang lebih kecil. Pirolisis secara langsung mengubah rantai lignoselulosa panjang menjadi senyawa padat gelap yang kaya karbon, yang disebut arang (*biochar*) serta fraksi minyak yang dilembabkan, yaitu cairan hitam dengan viskositas tinggi [2]. Proses pirolisis dapat diwakili oleh reaksi umumnya pada persamaan 1.



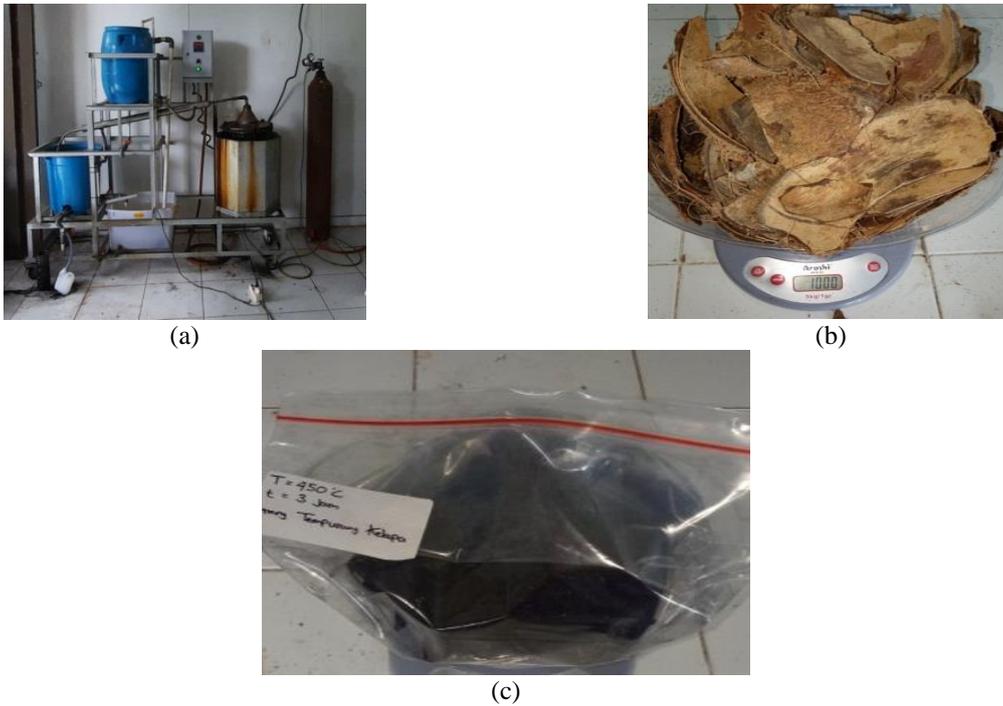
Pirolisis dapat diklasifikasikan menjadi tiga subkategori utama yaitu: pirolisis lambat, menengah dan cepat, tergantung pada laju pemanasan dan waktu tinggal [10]. *Co-firing* (Pembakaran bersama), juga dikenal sebagai *co-combustion*, adalah proses pembakaran dua jenis bahan bakar berbeda dalam perangkat pembakaran ketel pembangkit uap. Dalam pengertian sederhana, pembakaran *co-firing* dari batu bara dengan biomassa dapat dipandang sebagai bagian dari sistem yang melengkapi perangkat boiler berbahan bakar batu bara [1]. *Co-firing* dapat dijadikan solusi untuk meningkatkan penggunaan biomassa dalam pembangkit listrik dan mengurangi emisi Gas Rumah Kaca (GRK) [11]. Batu bara umumnya mempunyai nilai kalor yang lebih tinggi dari material biomassa. Arang memiliki kepadatan energi yang mirip dengan batu bara, oleh sebab itu agar *co-firing* biomassa dan batu bara dapat maksimal maka biomassa dikonversi terlebih dahulu menjadi arang [12].

Arang adalah bahan padat berpori karbon dengan tingkat aromatisasi tinggi yang dihasilkan oleh dekomposisi termal biomassa dari limbah tanaman di bawah kondisi bebas oksigen atau oksigen terbatas [8]. Nilai kalor arang berada pada kisaran 25 MJ/kg-32 MJ/kg basis kering, yang jauh lebih tinggi daripada biomassa induk atau produk cairnya dan pembakaran arang dianggap lebih ramah lingkungan daripada batu bara [13]. Pembakaran arang menawarkan potensi untuk mengurangi emisi CO₂ dari pembangkit listrik yang menggunakan batu bara, dengan mengimbangi emisi dari bahan bakar fosil. Untuk memaksimalkan potensi penyeimbangan dari pembakaran, perlu untuk memanfaatkan biomassa dalam *boiler* efisiensi tinggi, yang berarti penggunaan arang dengan batu bara secara bersamaan pada mesin *boiler* [14].

Arang dapat digunakan lebih lanjut dalam proses pembakaran bersamaan dengan batu bara (*co-firing*) pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) untuk menghasilkan energi listrik. *Co-firing* batu bara-biomassa juga menjadi salah satu cara untuk mengurangi emisi gas rumah kaca. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan suhu dan waktu pirolisis terbaik dalam pembuatan arang yang berasal dari tempurung kelapa berkalori tinggi yang sesuai dengan SNI 06-4369-1996.

2. Metode

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Proses Industri Kimia, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara. Bahan atau sampel yang digunakan dalam penelitian ini adalah tempurung kelapa. Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah unit alat pirolisis, timbangan *digital*, palu, cawan porselen, oven, *furnace*, desikator dan *Automatic Calorimeter* – K88890.



Gambar 1. (a) Alat Pirolisis, (b) sampel tempurung kelapa, (c) sampel arang

Penelitian dilakukan dengan variasi suhu 350 °C, 450 °C dan 550 °C dan variasi waktu 2 jam, 3 jam, dan 4 jam. Tempurung kelapa dipisahkan dan dibersihkan dari pengotor secara manual, kemudian ditimbang sebanyak 2 kg dan dipirolisis pada suhu 350 °C dengan variasi waktu 2 jam, 3 jam, dan 4 jam. Arang hasil pirolisis ditimbang untuk perhitungan *yield* dan dianalisa, yaitu analisa kadar air, kadar abu, kadar zat terbang (*volatile matter*) dan nilai kalori arang. Hasil analisa dibandingkan dengan Standar arang menurut SNI 06-4369-1996 [15].

3. Hasil

Karakterisasi arang tempurung kelapa bertujuan untuk mengetahui sifat-sifat dasar dan kualitas mutu arang hasil pirolisis tempurung kelapa yang layak digunakan sebagai bahan bakar meliputi *yield* arang, kadar air arang, kadar zat menguap, kadar abu dan nilai kalori arang. Hasil karakteristik arang tempurung kelapa tersaji pada tabel 1.

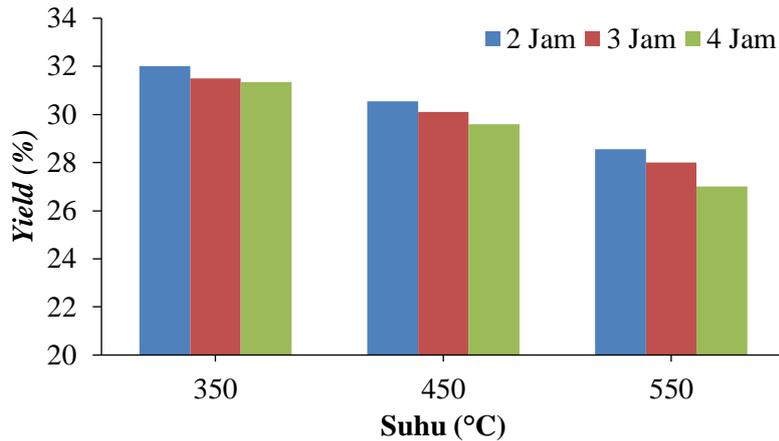
Tabel 1. Hasil Karakteristik Arang Tempurung Kelapa pada Berbagai Kondisi Operasi

Waktu (Jam)	Suhu (°C)	Yield (%)	Kadar Air (%)	Kadar Abu (%)	Kadar Zat Terbang (%)	Nilai Kalori/yield (kal/g)
2	350	32,00	3,42	2,50	24,50	6629,79
	450	30,55	2,90	2,57	10,90	7650,34
	550	28,55	3,50	3,09	9,14	7666,60
3	350	31,50	3,20	2,63	19,57	7161,81
	450	30,10	2,75	2,70	9,50	7750,97
	550	28,00	4,26	3,80	8,92	7643,17
4	350	31,35	2,95	2,75	18,36	7244,75
	450	29,6	3,41	3,00	9,18	7666,84
	550	27,00	4,51	4,50	8,14	7597,52

Yield Arang Pada Variasi Suhu dan Waktu Pirolisis

Gambar 2 menunjukkan bahwa *yield* arang mengalami penurunan seiring bertambahnya suhu dan waktu pirolisis. Penurunan *yield* arang disebabkan oleh dekomposisi primer yang lebih besar [16], dengan terurainya komposisi bahan menjadi gas *condensable* dan gas *non-condensable* [13]. Waktu pirolisis yang meningkat menunjukkan meningkatkan suhu arang dan melemahkan ketahanan perpindahan panas antar partikel [17],

sehingga menurunkan massa arang. Hasil penelitian ini *yield* tertinggi diperoleh pada suhu operasi 350 °C dengan waktu pirolisis 2 jam yaitu sebesar 32% dengan massa arang 640 g dan *yield* terendah sebesar 27% dengan suhu 550 °C dan waktu pirolisis 4 jam dengan massa arang 540 g.



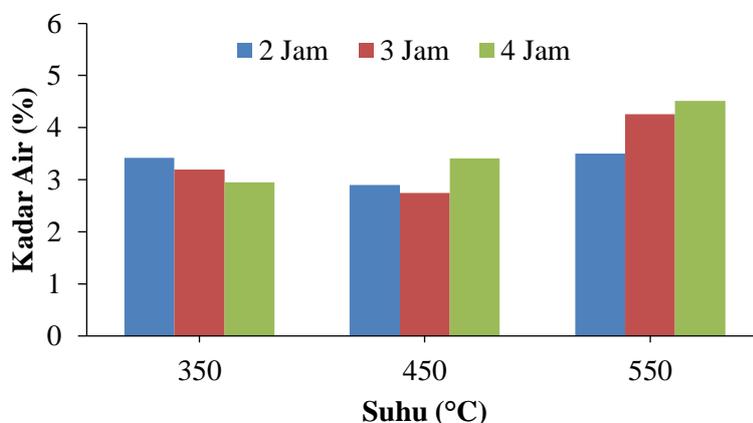
Gambar 2. Pengaruh variasi suhu dan waktu pirolisis terhadap *yield* arang

Karakteristik Kadar Air Arang Pada Variasi Suhu dan Waktu Pirolisis

Gambar 3 menunjukkan bahwa pada suhu 350 °C dan 450 °C dengan pirolisis 2 jam, 3 jam dan 4 jam kadar air arang menurun. Sementara pada suhu 550 °C kadar air mengalami peningkatan. Hal ini kemungkinan disebabkan analisa kadar air dilakukan secara bersamaan, sehingga pada saat arang yang terlebih dahulu dihasilkan yakni pada suhu 450 °C dengan waktu 4 jam dan 550 °C menyerap uap air sekitarnya karena arang yang dihasilkan pada kondisi tersebut memiliki sifat higroskopis yang tinggi. Alasan lain terjadi adalah karena semakin lama waktu operasi, maka pori-pori dari arang akan semakin terbuka, dan akan berpengaruh pada sifat higroskopis arang [18].

Secara teori pengaruh waktu pirolisis terhadap kadar air menyebutkan bahwa semakin lama waktu, maka kadar air semakin sedikit. Kadar air arang berpengaruh terhadap nilai kalori arang. Semakin kecil kadar air maka semakin bagus nilai kalornya. Selain itu dari data kadar air arang, kita dapat mengetahui sifat higroskopis arang tersebut [19].

Berdasarkan hasil yang diperoleh, maka arang pada suhu pirolisis 450 °C dengan waktu 4 jam dan suhu 550 °C lebih baik digunakan sebagai arang aktif karena memiliki sifat higroskopis yang tinggi. Walaupun kadar air yang diperoleh meningkat di beberapa titik, namun kadar air rata-rata arang tempurung kelapa yang diperoleh telah sesuai dengan SNI 06-4369-1996 yaitu $\leq 6\%$ [15].



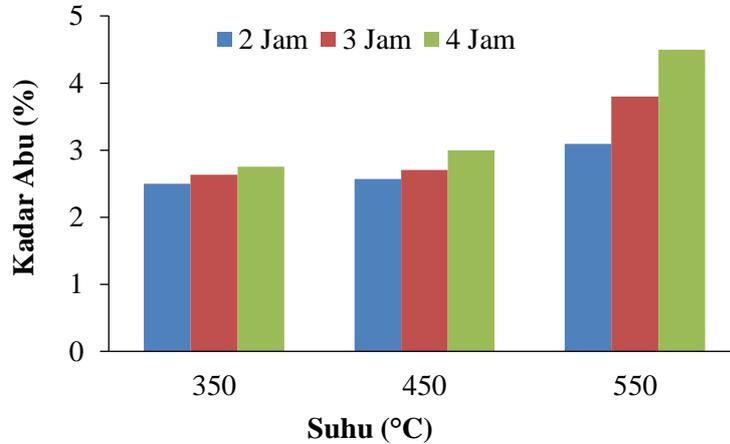
Gambar 3. Kadar air arang tempurung kelapa pada variasi suhu dan waktu pirolisis

Karakteristik Kadar Abu Arang Pada Variasi Suhu dan Waktu Pirolisis

Gambar 4 menunjukkan suhu pirolisis terhadap kadar abu arang. Berdasarkan Gambar 4 dapat dilihat bahwa seiring dengan naiknya suhu maka kadar abu arang mengalami kenaikan. Seiring bertambahnya suhu dan waktu pirolisis maka terjadi pengurangan kandungan unsur lain selama pirolisis. Unsur seperti C, H, N, O, dan S teruapkan selama pemanasan sementara garam anorganik (mineral) tidak sepenuhnya diuapkan,

sehingga konsentrasi residu mineral dan bahan organik meningkat. Oleh sebab itu maka kadar abu akan semakin meningkat seiring menurunnya unsur unsur yang hilang [20]. Kadar abu yang tinggi dapat menurunkan nilai kalori arang [21]. Abu adalah oksida-oksida logam yang berada dalam arang yang terdiri dari mineral yang tidak dapat menguap pada proses karbonisasi. Kandungan abu sangat berpengaruh pada kualitas arang yang dihasilkan [22].

Pada penelitian ini walaupun arang yang diperoleh memiliki kadar abu yang terus meningkat, namun kadar abu dari arang tempurung kelapa masih sesuai dengan SNI 06-4369-1996, yaitu $\leq 5\%$ [15]. Arang dengan kadar abu paling rendah pada kondisi operasi 350 °C dengan waktu operasi 2 jam dan kadar abu arang tertinggi diperoleh pada kondisi operasi 550 °C dengan waktu operasi 4 jam.

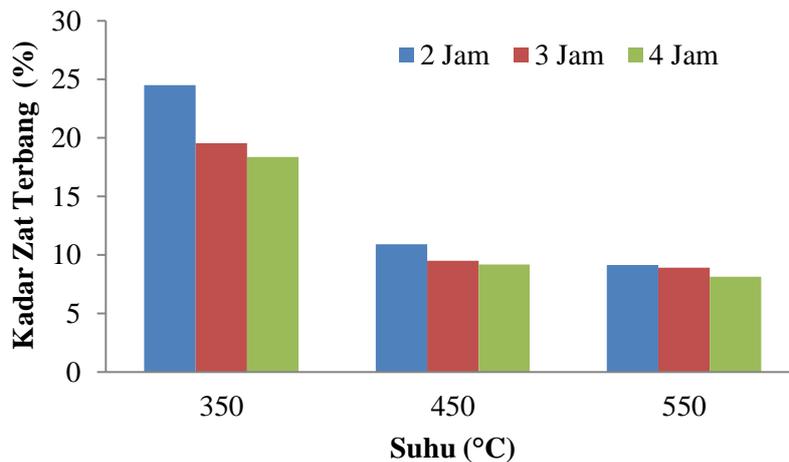


Gambar 4. Kadar abu arang tempurung kelapa pada variasi suhu dan waktu pirolisis

Karakteristik Kadar Zat Terbang (*Volatille matter*) Pada Variasi Suhu dan Waktu Pirolisis

Gambar 5 menunjukkan bahwa dengan meningkatnya suhu maka kadar zat terbang akan semakin menurun. Namun dari hasil penelitian ini pada suhu 350 °C dengan waktu pirolisis 2 jam tidak memenuhi SNI 06-4369-1996 [15] karena zat terbang arang tersebut > 20%. Hal ini kemungkinan disebabkan waktu pirolisis yang singkat sehingga kadar zat terbang masih banyak terkandung dalam arang. Hal ini sesuai dengan teori bahwa semakin besar suhu dan waktu pengarangan maka semakin banyak zat menguap yang terbang, sehingga pada saat pengujian akan didapat kadar zat menguap yang rendah [23]. Sementara itu arang hasil pirolisis pada suhu 350 °C dengan waktu pirolisis 3 jam dan 4 jam, serta pada suhu 450 dan 550 °C dengan waktu pirolisis 2 jam, 3 jam dan 4 jam memenuhi standar kadar zat terbang yang ditetapkan oleh SNI 06-4369-1996 [15].

Kadar zat terbang dapat dijadikan sebagai parameter untuk mengukur banyaknya asap yang dihasilkan pada saat pembakaran. Semakin tinggi jumlah kadar zat terbang dari suatu bahan bakar maka jumlah asap yang dihasilkan semakin tinggi [24]. Maka hal tersebut akan menyebabkan semakin mudah arang untuk terbakar dan menyala, sehingga laju pembakaran semakin cepat [25]. Bila laju pembakaran semakin cepat artinya akan boros penggunaan bahan bakar tersebut.



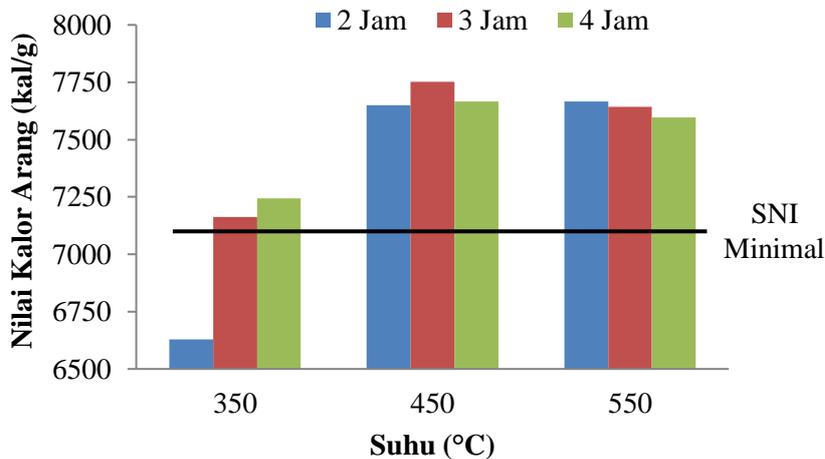
Gambar 5. Kadar Zat Terbang Arang Tempurung Kelapa pada variasi Suhu dan Waktu Pirolisis

Karakteristik Nilai Kalori Arang pada variasi Suhu dan Waktu Pirolisis

Gambar 6 menunjukkan pengaruh suhu pirolisis terhadap nilai kalori arang pada waktu yang divariasikan, yaitu nilai kalori arang terus mengalami peningkatan sampai maksimum pada suhu 450 °C dengan waktu 3 jam. Namun, pada suhu 450 °C dan waktu 4 jam, nilai kalori arang terus mengalami penurunan sampai suhu 550 °C. Walaupun mengalami penurunan nilai kalori, tapi arang tersebut masih memenuhi syarat Standar Nasional Indonesia (SNI) karena memiliki nilai kalori lebih dari 7.000 kal/g. Penurunan nilai kalori arang ini memiliki hubungan dengan hasil uji sebelumnya yaitu kadar air arang dan kadar abu arang. Naiknya nilai kadar air akan menurunkan kadar karbon dan nilai kalori arang. Penyebab lain nya bisa dikarenakan tingginya suhu pirolisis dan lamanya waktu pirolisis, sehingga menyebabkan rusaknya pelat-pelat karbon [22]. Jika karbon rusak maka nilai kalor juga akan semakin menurun karena kadar karbon berbanding lurus dengan nilai kalor yang dihasilkan [26]. Dinding karbon yang rusak tadi juga berubah menjadi abu, sehingga nilai kalornya juga akan menurun [27].

Pada penelitian ini parameter yang digunakan sebagai penentuan hasil pirolisis adalah *yield* dan nilai arang tempurung kelapa secara langsung. Hal ini dapat dijadikan sebagai hal utama berdasarkan kemudahan perolehan data. Umumnya, sebagai pertimbangan untuk membuat arang dengan hasil yang baik dengan kadar karbon yang tinggi (nilai kalori tinggi) dengan zat mudah menguap rendah diharapkan bahan baku arang memiliki kadar selulosa yang rendah karena selulosa cenderung membentuk produk lain baik yang terkondensasi atau tidak. Degradasi komponen bahan baku biomassa yang terjadi yaitu, hemiselulosa terdegradasi pada suhu sekitar 300 °C, selulosa pada suhu 350 °C sedangkan lignin terdegradasi bertahap pada suhu sekitar 250 °C – 500 °C sehingga semua komponen pembentuk biomassa memberikan kontribusi terhadap pembentukan produk pirolisis [28].

Hemiselulosa terdegradasi pada awal pirolisis, ini terjadi karena strukturnya yang amorf dan mudah terhidrolisis diikuti selulosa dengan memiliki rantai polimer yang panjang dengan adanya ikatan hidrogen sehingga struktur selulosa lebih teratur dan membentuk daerah kristalin. Lignin terdegradasi di akhir pirolisis dikarenakan lignin merupakan komponen kimia yang sangat kuat dengan tingkat aromatik dan disusun dari unit fenil propana bercabang dengan kandungan karbon yang cukup tinggi [28].



Gambar 6. Nilai kalori arang tempurung kelapa pada variasi suhu dan waktu pirolisis

Arang tempurung kelapa dengan nilai kalori tertinggi didapat pada suhu pirolisis 450 °C dengan waktu pirolisis selama 3 jam. Arang yang memiliki nilai kalori tinggi memiliki potensi yang baik untuk digunakan sebagai bahan bakar. Perbandingan terhadap Kriteria Batu bara yang digunakan dalam PLTU tersaji pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan kriteria batu bara dalam PLTU dan arang tempurung kelapa hasil penelitian

Unsur	Satuan	Nilai	
		Batu bara [19]	Arang
Nilai Kalori	kal/g	5.242	7.750,97
Total Moisture	%	Maksimal 23,6	2,75
Volatille Matter	%	Maksimal 30,3	9,50
Ash Content	%	Maksimal 7,8	2,70

Maka diharapkan arang tempurung kelapa dapat digunakan sebagai bahan bakar *co-firing* batu bara. Hal ini dapat dijadikan salah satu solusi penggunaan Energi Baru Terbarukan (EBT).

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dihasilkan arang berkalori tinggi dari pirolisis tempurung kelapa dengan nilai kalori 7.750,96 kal/g. Kondisi operasi terbaik pembuatan arang tempurung kelapa yaitu pada suhu 450 °C dengan waktu 3 jam. *Yield* tertinggi diperoleh sebesar 32% pada kondisi suhu pirolisis 350 °C dengan waktu operasi 2 jam dan terendah sebesar 27% pada suhu pirolisis 550 °C dengan waktu operasi 4 jam. Kadar air arang diuji dengan SNI 06-4369-1996, diperoleh kadar air terendah pada suhu 450 °C dengan waktu pirolisis 3 jam yaitu sebesar 2,75% dan tertinggi pada suhu 550 °C dengan waktu pirolisis 4 jam yaitu sebesar 4,51 % dan memenuhi standar SNI 06-4369-1996. Kadar abu arang diuji dengan SNI 06-4369-1996, diperoleh kadar abu terendah sebesar 2,5% pada suhu 350 °C dengan waktu operasi 2 jam serta tertinggi sebesar 4,5% pada suhu 550 °C dengan waktu operasi 4 jam dan memenuhi standar SNI 06-4369-1996. Kadar zat terbang (*volatile matter*) diuji dengan SNI 06-4369-1996, diperoleh kadar zat terbang terendah sebesar 8,14 % pada suhu 550 °C dengan waktu operasi 4 jam dan memenuhi standar SNI 06-4369-1996. Kadar zat terbang tertinggi sebesar 24,50 % pada suhu pirolisis 350 °C dengan waktu operasi 2 jam dan tidak memenuhi standar SNI 06-4369-1996. Hasil penelitian ini diharapkan dapat mengurangi penggunaan batu bara dalam proses *co-firing* dengan arang tempurung kelapa.

5. Konflik Kepentingan

Semua penulis tidak memiliki konflik kepentingan (*conflict of interest*) pada publikasi artikel ini.

Daftar Pustaka

- [1] S. Suganal and G. K. Hudaya, "Bahan bakar *co-firing* dari batu bara dan biomassa tertorefaksi dalam bentuk briket (skala laboratorium)," *J. Teknol. Miner. dan Batu bara*, vol. 15, no. 1, pp. 31–48, 2019.
- [2] F. Khademi and I. Yildiz, "Energy and Solid Wastes," *Compr. Energy Syst.*, vol. 1–5, pp. 980–1020, 2018.
- [3] Anonim, "Kebijakan Energi Nasional." Presiden Republik Indonesia, Jakarta, pp. 1–8, 2006.
- [4] Sudarlin, "Eksplorasi Energi Pengembangan Energi Terbarukan," in *Omah Ilmu*, 1st ed., Omah Ilmu, 2016, p. 1.
- [5] Sudding and Jamaluddin, "The processing of coconut shell based on pyrolysis technology to produce renewable energy sources," *Int. Conf. Math. Sci. Technol. Educ. their Appl.*, no. October 2016, pp. 498–510, 2016.
- [6] Anonim, *Statistik Perkebunan Indonesia Kelapa*, 2018th–2020th ed. Jakarta: Direktorat Jendral Perkebunan, 2019.
- [7] A. Irawan, S. Latifah Upe, and I. P. Meity Dwi, "Effect of torrefaction process on the coconut shell energy content for solid fuel," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1826, no. March 2017, 2017.
- [8] A. G. Daful and M. R Chandraratne, *Biochar Production From Biomass Waste-Derived Material*. Elsevier Ltd., 2020.
- [9] F. Ronsse, S. van Hecke, D. Dickinson, and W. Prins, "Production and characterization of slow pyrolysis biochar: Influence of feedstock type and pyrolysis conditions," *GCB Bioenergy*, vol. 5, no. 2, pp. 104–115, 2013.
- [10] R. P. Kumar, B. Bharathiraja, R. Katak, and V. S. Moholkar, *Biomass Valorization to Bioenergy*. Singapore: Springer Nature, 2020.
- [11] P. Lempp, "Biomass *co-firing* in coal power plants," *IEA-ETSAP IRENA, Technol. Br. E*, vol. 21, p. 2013, 2013.
- [12] J. R. Arcate, "Biomass charcoal *co-firing* with coal," *Proc. ASME Turbo Expo*, vol. 3, 1998, doi: 10.1115/98-GT-226.
- [13] P. Basu, *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: Practical design and theory*. Academic press, 2018.
- [14] M. J. Gronnow *et al.*, "Torrefaction/biochar production by microwave and conventional slow pyrolysis - comparison of energy properties," *GCB Bioenergy*, vol. 5, no. 2, pp. 144–152, 2013.
- [15] SNI 06-4369-1996, "Bubuk arang tempurung kelapa," Jakarta, 1996.
- [16] A. Singh, A. K. Biswas, R. Singhai, B. L. Lakaria, and A. K. Dubey, "Effect of pyrolysis temperature and retention time on mustard straw derived biochar for soil amendment," *J. Basic. Appl. Sci. Res*, vol. 5, no. 9, pp. 31–37, 2015.
- [17] S. Sadaka, M. A. Sharara, A. Ashworth, P. Keyser, F. Allen, and A. Wright, "Characterization of biochar

- from switchgrass carbonization,” *Energies*, vol. 7, no. 2, pp. 548–567, 2014.
- [18] K. D. L. F. Lestari, R. D. Ratnani, Suwardiyono, and N. Kholis, “Pengaruh waktu dan suhu pembuatan karbon aktif dari tempurung kelapa sebagai upaya pemanfaatan limbah dengan suhu tinggi secara pirolisis,” *J. Inov. Tek. Kim.*, vol. 2, no. 1, pp. 32–38, 2017.
- [19] D. Lestari, M. A. Asy’ari, and R. Hidayatullah, “Geokimia batu bara untuk beberapa industri,” *J. POROS Tek.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–54, 2016.
- [20] N. Claoston, A. W. Samsuri, M. H. Ahmad Husni, and M. S. Mohd Amran, “Effects of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of empty fruit bunch and rice husk biochars,” *Waste Manag. Res.*, vol. 32, no. 4, pp. 331–339, 2014.
- [21] S. Wardani, Pranoto, and D. A. Himawanto, “Kinetic parameters and calorific value of biochar from mahogany (*Swietenia macrophylla* King) wood pyrolysis with heating rate and final temperature variations,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 2049, 2018.
- [22] S. Siahaan, M. Hutapea, and R. Hasibuan, “Penentuan kondisi optimum suhu dan waktu karbonisasi pada pembuatan arang dari sekam padi,” *J. Tek. Kim. USU*, vol. 2, no. 1, pp. 26–30, 2013.
- [23] Rahmadani, F. Hamzah, and F. H. Hamzah, “Pembuatan briket arang daun kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) dengan perekat pati sago (*Metroxylon sago* Rott.),” *Jom Faperta UR*, vol. 4, no. 1, pp. 1–11, 2017.
- [24] N. Iskandar, S. Nugroho, and M. F. Feliyana, “Uji kualitas produk briket arang tempurung kelapa berdasarkan standar mutu SNI,” *J. Ilm. Momentum*, vol. 15, no. 2, 2019.
- [25] W. Kusuma, A. Sarwono, and R. D. Noriyati, “Kajian eksperimental terhadap karakteristik pembakaran briket limbah ampas kopi instan dan kulit kopi (studi kasus di pusat penelitian kopi dan kakao Indonesia),” *J. Tek. Pomits*, pp. 2–4, 2013.
- [26] E. Junary, J. P. Pane, and N. Herlina, “Pengaruh suhu dan waktu karbonisasi terhadap nilai kalor dan karakteristik pada pembuatan bioarang berbahan baku pelepah aren (*Arenga pinnata*),” *J. Tek. Kim. USU*, vol. 4, no. 2, 2015.
- [27] K. E. A. Putra, D. N. K. P. Negara, and C. I. P. K. Kencanawati, “Pengaruh waktu karbonisasi terhadap karakteristik karbon aktif bambu swat (*Gigantochloa verticillata*),” *J. Ilm. Tek. DESAIN Mek.*, vol. 7, no. 4, pp. 335–340, 2018.
- [28] L. Efiyanti, S. A. Wati, D. Setiawan, S. Saepuloh, and G. Pari, “Sifat kimia dan kualitas arang lima jenis kayu asal kalimantan barat,” *J. Penelit. Has. Hutan*, vol. 38, no. 1, pp. 45–56, 2020.