



Pengaruh Kondisi Pirolisis terhadap Penurunan Kandungan Volatile Matter pada Batubara Kualitas Rendah

Sofia Jati Wardani¹, Mohammad Fahrurrozi², Hary Sulisty³

¹⁾²⁾³⁾Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No. 2 Yogyakarta, 55281

Email: sofijatiwardani@mil.ugm.ac.id, mfahrurrozi@ugm.ac.id, hary@ugm.ac.id

Abstrak

Mengingat kebutuhan energi yang tinggi, batubara merupakan salah satu alternatif bahan bakar yang masih banyak digunakan. Untuk dapat digunakan sebagai bahan bakar yang baik kualitas batubara menjadi perhatian penting. Semakin tinggi kualitas batubara maka efisiensi proses juga semakin baik. Untuk itu meningkatkan kualitas batubara menjadi perhatian penting. Proses pirolisis dapat menjadi salah satu proses untuk memisahkan bahan *volatile* dan *moisture* yang terkandung didalam batubara dan meningkatkan kualitasnya. Pembahasan kali ini akan menunjukkan bagaimana proses pirolisis meningkatkan kualitas batubara tersebut dilihat dari perubahan komposisi dan nilai kalorinya dan Penelitian ini bertujuan untuk mendemonstrasikan bagaimana proses pirolisis meningkatkan kualitas batubara dengan memeriksa perubahan komposisi dan nilai kalori. Percobaan pirolisis dilakukan pada sampel batubara dengan kalsifikasi lignite pada berbagai temperatur 500°C, 600°C, dan 700°C selama 1 jam. Pada suhu 700 °C waktu pirolisis divariasikan menjadi 20 menit, 40 menit, 60 menit untuk menentukan kondisi yang paling efektif. Penelitian ini menggunakan sampel batubara kualitas rendah yang diperoleh dari tambang di Kecamatan Sambaliung, Kabupaten Berau, Kalimantan Timur. Percobaan pirolisis dilakukan pada suhu 500°C, 600°C, dan 700°C selama 1 jam. Pada suhu 700°C, waktu pirolisis divariasikan menjadi 20 menit, 40 menit, dan 60 menit untuk menentukan kondisi yang paling efektif. Analisis proksimat dilakukan untuk menilai perubahan kadar kelembaban, zat *volatile*, karbon tetap, dan abu sebelum dan setelah pirolisis. Hasilnya menunjukkan bahwa pirolisis secara signifikan mengurangi bahan *volatile* dan *moisture* meningkatkan kandungan karbon tetap, dengan kondisi optimal pada 700°C selama 30 menit. Batubara yang telah dipirolisis menunjukkan nilai kalor yang lebih tinggi, menunjukkan efisiensi energi yang meningkat. Kesimpulan temuan ini menunjukkan potensi pirolisis sebagai metode yang layak untuk peningkatan kualitas batubara, menawarkan manfaat yang substansial untuk aplikasi industri.

Kata Kunci: batubara, pyrolysis, upgrading

Abstract

Given the high energy demand, coal is one of the alternative fuels that are still widely used. To be able to be used as a good fuel, the quality of coal is an important concern. The higher the quality of the coal, the better the process efficiency. For this reason, improving the quality of coal is an important concern. The pyrolysis process can be a process to separate volatile and moisture materials contained in coal and improve its quality. This discussion will show how the pyrolysis process improves the quality of the coal seen from the change in its composition and calorific value and this study aims to demonstrate how the pyrolysis process improves the quality of coal by examining changes in composition and calorific value. Pyrolysis experiments were carried out on coal samples with lignite calcification at various temperatures of 500°C, 600°C, and 700°C for 1 hour. At 700°C the pyrolysis time is varied into 20 minutes, 40 minutes, 60 minutes to determine the most effective conditions. This study used low-quality coal samples obtained from a mine in Sambaliung District, Berau Regency, East Kalimantan. Pyrolysis experiments were carried out at 500°C, 600°C, and 700°C for 1 hour. At 700°C, the pyrolysis time is varied to 20 minutes, 40 minutes, and 60 minutes to determine the most effective conditions. Proximate analysis was performed to assess changes in moisture levels, volatile substances, fixed carbon, and ash before and after pyrolysis. *The results showed that pyrolysis significantly reduced volatile matter and increased fixed carbon content, with optimal conditions at 700°C for 30 minutes. The improved coal exhibited a higher calorific value, indicating increased energy efficiency. These findings highlight the potential of pyrolysis as a viable method for coal quality enhancement, offering substantial benefits for industrial applications.*

Keywords: Coal, pyrolysis, upgrading

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu produsen batubara terbesar di dunia, dimana diperkirakan cadangannya mencapai 32,38 miliar ton dan sumber daya sebesar 124,79 miliar ton. Dari banyaknya batubara tersebut sekitar 70% merupakan batubara kualitas rendah yang tidak efisien untuk diproses, nilai kalornya kurang dari 21,35 kJ/gr dan kandungan kelembabannya mencapai 30%. Hal ini menunjukkan bahwa batubara kualitas rendah memiliki kandungan *carbon* yang lebih rendah dibandingkan dengan batubara kualitas tinggi seperti batubara antrasit (Sun et al., 2024). Batubara kualitas rendah memerlukan lebih banyak konsumsi dan biaya produksi yang lebih tinggi (Rizkiana et al., 2018). Proses berteknologi diperlukan untuk meningkatkan kualitas batubara. Hal ini berkaitan dengan tingginya permintaan domestik guna memenuhi kebutuhan energi (Halim et al., 2022). Mengingat batubara merupakan sumber energi dengan pertumbuhan yang cepat dibandingkan dengan gas, minyak, nuklir, *hydro* dan energi terbarukan. Batubara menjadi salah satu sumber energi yang paling penting, memenuhi hampir 40% kebutuhan bahan bakar sebagai pemenuhan energi listrik dunia (Edress & Abdel-Fatah, 2018). Karena batubara kualitas rendah juga mendominasi proporsi dari total batubara yang tersedia, Pemanfaatan batubara kualitas rendah merupakan tujuan jangka panjang dengan proses yang memiliki efisiensi tinggi dan menghasilkan proses dengan minim polusi (Yang et al., 2022).

Tabel 1. Klasifikasi Batubara Berdasarkan Jenisnya

Jenis Batubara	Kelembaban (%)	Volatile Matter (%)	Karbon Tetap (%)	Nilai Kalori (kcal/kg)
Antrasit	Sangat rendah	< 10	Sangat tinggi	> 6900
Bituminus	Rendah hingga sedang	10-45	Tinggi	5700 - 6900
Sub-Bituminus	Tinggi	15-30	Sedang	3900 - 5700
Lignit	Sangat tinggi	30-50	Rendah	< 3900

Sumber: (Speight, 2015)

Dari tabel.1 dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi kelembaban dan kandungan *volatile matter* pada batubara kualitas rendah seperti sub-bituminus dan lignite akan menurunkan nilai kalornya (Y. Wang et al., 2022). Untuk itu untuk meningkatkan kualitas batubara dengan mengurangi kandungan kelembaban dan *volatile matter* dapat meningkatkan nilai kalornya. Selain itu peningkatan kualitas batubara akan memberikan penurunan konsumsi energi, dan meningkatkan kebersihan serta efisiensi

peros (Sun et al., 2024). Proses pirolisis bias menjadi pilihan untuk melakukan pemisahan tersebut (Yang et al., 2023). Proses pirolisis bukan hanya proses penting dalam konversi termal batubara derajat rendah tetapi saat ini diakui sebagai cara terbaik untuk mencapai pemanfaatan batubara dengan mengubah batubara derajat rendah menjadi hidrokarbon, bahan kimia, dan semi-kok berkualitas tinggi (K. Wang et al., 2024)

Pirolisis merupakan proses *thermochemical*, pada kondisi inert dan atmosferis, proses ini secara termal mendekomposisi bahan menjadi gas, liquid, dan padatan pada suhu tertentu. Perosesnya dapat dikategorikan menjadi *slow*, *fast*, dan *flash* pirolisis. Setiap kategori memiliki perbedaan produk yang dihasilkan, dipengaruhi juga oleh komposisi bahan (Zheng-wei et al., 2022). Produk pirolisis juga dipengaruhi oleh kondisi operasi seperti laju panas, temperatur operasi, waktu tinggal, dan ukuran partikel bahan yang dipirolisis. Dibandingkan dengan proses konversi *thermochemical* lain seperti gasifikasi dan pembakaran *pyrolysis* umumnya beroperasi pada suhu yang relatif lebih rendah berkisar 400°C -600°C dan lebih diminati karena produknya, dengan komposisi didominasi *char* dan bahan bakar cair yang mudah disimpan dan ditrasportasikan. Pirolisis memiliki banyak kelebihan dibandingkan dengan proses konversi *thermochemical* antara lain (Raza et al., 2021):

1. Pirolisis adalah proses konversi yang lebih sederhana dan relatif lebih murah.
2. Pirolisis cocok untuk berbagai jenis bahan baku.
3. Prosesnya mengurangi kebutuhan tempat pembuangan akhir dan emisi gas rumah kaca (GRK).
4. Memiliki potensi pencemaran air yang sangat kecil.
5. Konstruksi reaktor pirolisis yang relatif cepat.

Efisiensi pirolisis adalah efisiensi termal yang diperoleh sebagai rasio antara perbedaan nilai kalor keseluruhan produk pirolisis dan total energi termal yang digunakan untuk memproses sampel. Pirolisis adalah proses yang dikenal untuk menghasilkan biofuel dan bahan kimia dengan densitas energi tinggi (Raza et al., 2021).

Pirolisis adalah strategi efektif untuk pemanfaatan batubara berkualitas rendah, yang dapat menghasilkan bahan kimia dan bahan bakar bernilai tinggi. Produk dari pirolisis batubara ini lebih spesifik seperti tar, gas, dan *char* (Yang et al., 2023). Namun, tar hasil pirolisis yang diperoleh dari proses tradisional mengandung komponen berat (titik didih > 360 °C). Dalam proses pirolisis, komponen berat dalam tar yang mencapai lebih dari 50% dapat menyebabkan penyumbatan pipa dan gangguan proses hilir (Xia et al., 2022). Peningkatan katalitik dari volatil dari pirolisis batubara dapat mengurangi kandungan fraksi berat dalam tar dan meningkatkan kandungan bahan kimia bernilai tinggi (misalnya, hidrokarbon aromatik ringan dan fenol), yang telah menjadi strategi menjanjikan untuk meningkatkan batubara berperingkat rendah (Yang et al., 2022). Untuk itu proses pirolisis menjadi proses yang menjanjikan karena dapat memisahkan dengan signifikan kandungan *volatile matter* dan kelembaban yang terkandung dalam *low grade coal*. dengan menggunakan proses pirolisis yang dapat menurunkan kandungan kelembaban dan *volatile matter*, maka nilai kalori dari produk *char* batubara hasil batubara maka mengalami peningkatan. Selain itu produk pirolisis berupa *char* merupakan material yang mesoporous, dimana dengan peningkatan pori - pori ini akan mempengaruhi tingkat reaktifitasnya (Li et al., 2022).

Pada penelitian ini peneliti menggunakan *low-grade coal* yang diperoleh dari tambang yang berada di Kecamatan Sambaliung, Kabupaten Berau, Kalimantan Timur. Berdasarkan penelusuran pustaka, peneliti belum menemukan penelitian mengenai pirolisis dengan kondisi operasi dan penggunaan batubara tersebut. Diharapkan dengan penelitian ini dapat mengembangkan efisiensi proses pirolisis untuk meningkatkan kualitas batubara dari kualitas rendah menjadi kualitas yang lebih tinggi.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan efisiensi proses pirolisis untuk meningkatkan kualitas batubara dari kualitas rendah menjadi kualitas yang lebih tinggi. Secara spesifik, penelitian ini

akan mengevaluasi pengaruh suhu dan waktu pirolisis terhadap perubahan komposisi kimia (moisture content, volatile matter, fixed carbon, ash content) pada batubara kualitas rendah, menganalisis peningkatan nilai kalori batubara setelah melalui proses pirolisis dan menentukan kondisi operasi optimal pirolisis (suhu dan waktu) untuk meningkatkan kualitas batubara kualitas rendah secara signifikan.

Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat mengembangkan metode peningkatan kualitas batubara kualitas rendah melalui proses pirolisis, sehingga dapat meningkatkan efisiensi pemanfaatan batubara sebagai sumber energi di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Bahan Baku

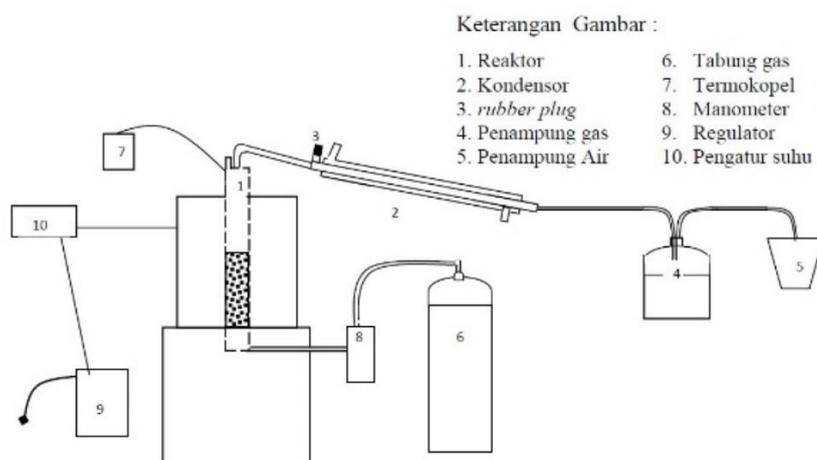
Bahan baku pada penelitian kali ini adalah *low-grade coal* yang diperoleh dari tambang yang berada di Kecamatan Sambaliung, Kabupaten Berau, Kalimantan Timur. Dengan spesifikasi hasil *proximate* dan *ultimate* analisis sebagai berikut:

Tabel 2. Hasil Analisa Batubara sebelum Pirolisis

<i>Proximate Analysis</i>	<i>Ultimate Analysis</i>
Moisture : 21,02%	C : 54,36%
Volatile matter : 27,37%	H : 5,07%
Fix Carbon : 46,74%	O : 39,03%
Ash : 4,85 %	N : 1,24%
	S : 0,29%

Alat Penelitian

Alat Pirolisis terdiri dari reaktor *fixed bed* yang terbuat dari bahan kuarsa dengan ukuran: panjang 41,5 cm, *diameter* dalam 3,81 cm, diameter luar 3,97 cm, pendingin (*condenser*) dengan ukuran panjang 34 cm, penampung gas dengan ukuran 19 L, ember penampung air dengan ukuran 4 L, tabung gas N₂, *termocouple*, regulator, dan pengatur suhu yang dirangkai seperti pada Gambar 1 dibawah ini. Untuk mengecilkan ukuran batubara digunakan palu dan *ball mill*. Dan untuk menyamakan ukuran digunakan ayakan dengan ukuran 16 dan 18 mesh, sehingga didapatkan ukuran batubara yang seragam.



Gambar 1. Rangkaian Alat Pirolisis

Sumber: (Sulistyo & Syamsiah, 2013)

Prosedur Penelitian

Batubara dari bentuk bongkahan besar diperkecil ukurannya mula – mula dipukul dengan palu, kemudian setelah ukurannya berkisar 5-3 cm barulah batubara diperkecil kembali dengan bantuan *ball mill*. Proses menggunakan *ball mill* berlangsung sekitar 20-30 menit kemudian secara bertahap diayak dengan hingga didapatkan ukuran batubara lolos *mesh* 16 dan tertahan di *mesh* 18. Didapatkan ukuran batubara sebesar 1,19 ml – 1 ml. Kemudian batubara ditimbang seberat 70 gr untuk dimasukkan kedalam reaktor. Setelah reaktor terpasang dengan baik dengan masa pengeleman selama 24 jam, barulah kemudian dilakukan *purging* dengan gas nitrogen selama 10 menit. Selama masa *purging* juga dilakukan pengetesan kebocoran. Setelah dipastikan *purging* sudah dilaksanakan dan tidak ada kebocoran barulah proses pirolisis dilaksanakan. Produk hasil pirolisis kemudian di analisa *proximate* dengan metode ASTM D3173 (Ardinata et al., 2022; Imran et al., 2020). Sedangkan untuk mengetahui *ultimate analysis* dilakukan pengujian di UPT Laboratorium Terpadu, Universitas Diponegoro, sampel yang dilakukan pengujian adalah sampel sebelum pirolisis dan sampel setelah pirolisis pada suhu 700°C selama 40 menit.

Proximate analysis menggunakan metode ASTM D3173, langkah awal pengujian ini adalah melakukan analisa *moisture content*. Sampel batubara yang belum dan sudah dipirolisis ditimbang pada berat tertentu kemudian diapanaskan kedalam oven dengan suhu 105°C selama 1 jam dan didinginkan kedalam *desicator*. *Moisture content* pada batubara kemudian dihitung mengikuti rumus (1) dibawah ini:

$$M\% = \frac{W_2 - W_3}{W_2 - W_1} \times 100\% \quad (1)$$

Dimana:

M% = persen *moisture content*

W1 = berat cawan

W2 = berat cawan + sampel

W3 = berat cawan + sampel yang sudah dikeringkan

Untuk menghitung jumlah *persent volatile matter* (PVM) yang terkandung didalam batubara, batubara yang telah dikeringkan ditimbang seberat 2 gr tempatkan kedalam cawan tahan panas yang tertutup, kemudian panaskan di oven pada suhu 550 °C selama 10 menit, kemudian sampel didinginkan didalam *desicator* sebelum dilakukan penimbangan. Untuk menghitung PVM dapat dilakukan dengan mengikuti rumus (2) dibawah ini:

$$VM\% = \frac{A - B}{B} \times 100\% \quad (2)$$

Dimana:

VM% = *persent volatile matter* (PVM)

A = berat sampel kering sebelum dioven

B = berat sampel kering setelah pengovenan suhu 550 °C selama 10 menit

Selanjutnya untuk menentukan kandungan abu atau *ash*, sejumlah 2 gr batubara kemudian ditepatkan kedalam cawan, dan dilanjutkan untuk dipanaskan didalam oven pada suhu 550 °C selama 4 jam dan ditimbang setelah didinginkan didalam *desicator*. Untuk menghitung *ash content* lakukan perhitungan dengan rumus (3) dibawah ini:

$$Ash\% = \frac{C}{A} \times 100\% \quad (3)$$

Dimana:

Ash% = persen *ash*

A = berat sampel awal

C = berat sampel yang telah dioven

Untuk menghitung kandungan *fix carbon* pada batubara maka lakukan perhitungan menggunakan rumus (4) dibawah ini:

$$\text{Fix Carbon} = 100\% - (\text{moisture content \%} - \text{Ash content \%} - \text{volatile matter \%}) \quad (4)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan didapatkan hasil pengamatan proses pirolisis berupa produk gas yang terbentuk pada kondisi operasi yang berbeda sebagai berikut, yang akan ditampilkan pada tabel 3.

Tabel 3. Data Pengamatan Proses Pirolisis

Nama	Temperatur (°C)	Waktu (menit)	Volume (ml)	Massa Char (gr)
Char A	500	60	5.850	40,92
Char B	600	60	10.380	37,26
Char C	700	60	14.455	35.18
Char D	700	40	14,270	35,25
Char E	700	20	11.620	35.71

Pada tabel berikut dapat diketahui bahwa produk *char* yang terbentuk akan semakin sedikit berbanding terbalik dengan waktu proses pirolisis dan temperatur operasi pirolisis. Hal ini menunjukkan bahwa penurunan kandungan *moisturizer* dan *volatile matter* yang semakin besar berjalannya waktu dan temperatur tinggi. Lalu pada temperatur yang lebih tinggi laju pembentukan produk gas lebih besar dibandingkan dengan penggunaan variasi waktu. Hal ini dapat dijadikan pertimbangan dalam penentuan kondisi operasi optimum dengan mempertimbangkan biaya energi panas yang digunakan dalam proses pirolisis sehingga didapatkan kondisi yang paling ekonomis. Pada proses pirolisis di suhu 700 °C produk gas telah berhenti terbentuk pada waktu berkisar 35 menit, hal ini menunjukkan bahwa kandungan *moisture* dan *volatile matter* yang tersisa sudah sangat sedikit dan tidak cukup signifikan. Maka pemanasan lebih lanjut tidak memberikan efektifitas yang baik dan penggunaan energi yang digunakan tidak efisien lagi.

Data hasil pengujian *proximate* untuk batubara yang telah melalui proses pirolisis menggunakan metode ASTM D3173, ditunjukkan pada tabel 4.

Tabel 4 . Data Pengujian Analisa Proximate

Nama	Moisture %	Volatile Matter %	Fix Carbon %	Ash %
Char A	5,79	18,15	67,85	8,21
Char B	1,68	8,67	79,38	9,7
Char C	0,07	5,49	84,64	10,93
Char D	0,27	5,31	83,81	10,25
Char E	0,93	6,4	82,81	9,78
Low-grade Coal	21,02	27,37	46,74	4,85

Dari data yang ditampilkan pada tabel 4. Nilai *moisture* dan *volatile matter* berbanding terbalik dengan jumlah produk gas yang terbentuk dan berbanding lurus dengan kandungan *ash* dan *fix carbon*, dari pengamatan ini maka produk gas yang terbentuk dapat dijadikan tolak ukur dalam mengidentifikasi keefektifan proses pirolisis guna menurunkan kandungan *moisture* dan *volatile matter* dalam

meningkatkan kualitas batubara. Kekurangan yang dapat ditemui dalam proses ini adalah terjadinya peningkatan konsentrasi abu persatuan massa, karena berkurangnya kandungan *moisture* dan *volatile matter*, kemudian akibat batubara yang lebih berpori akibat celah yang berisi *moisture* dan *volatile matter* telah dikosongkan maka dengan nilai kalori yang sama pada berat tertentu *char* akan memiliki kepadatan yang lebih rendah mengakibatkan *char* lebih mudah hancur dibandingkan dengan batubara pada umumnya dikelas kalori yang sama, hal ini juga menyebabkan *char* lebih mudah menyerap kelembaban udara maka dari itu proses penyimpanan perlu diperhatikan dengan seksama (Speight, 2015).

Disisi lain dengan munculnya pori – pori, dapat meningkatkan reaktifitas dan kemampuan adsorpsi yang lebih baik karena memiliki luas area yang lebih besar. *Char* hasil *upgrading* ini akan sangat cocok dijadikan bahan baku industri yang memerlukan reaktifitas yang tinggi dan atau kemampuan adsorpsi yang baik. Sedangkan batubara biasa akan lebih cocok untuk aplikasi yang memerlukan stabilitas dan kekuatan mekanis selama proses berlangsung (Speight, 2015).

Tabel 5 . Data *Ultimate Analysis* Batubara

Sebelum Pirolisis	<i>Char</i>
C : 54,36%	C : 74,50%
H : 5,07%	H : 2,382%
O : 39,03%	O : 21,12%
N : 1,24%	N : 1,65%
S : 0,29%	S : 0,35%

Tabel 5 menunjukkan adanya pengaruh yang signifikan tentang kenaikan jumlah atom C pada *char* dibandingkan dengan batubara sebelum dipirolisis, hal ini juga menunjukkan keberhasilan dari upaya peningkatan kualitas batubara, dimana jumlah karbon meningkat seiring meningkatnya jumlah karbon (Chen et al., 2022). Untuk memastikan lebih spesifiknya kita dapat menghitung perubahan nilai kalor persatuan massa dari batubara menjadi *char*. Banyak studi yang dikembangkan guna memprediksi nilai HHV (*Higher Heating Value*), salasanya adalah *Dulong Formula* (Chen et al., 2022). Berikut ditunjukkan pada persamaan (5).

$$HHV_{Dulong} = 0.3383 \times C + 1.443 \times H - 0.1804 \times O + 0.0942 \times S \quad (5)$$

Dari persamaan tersebut dilakukan perhitungan didapatkan nilai HHV untuk batubara adalah 18.69 MJ/kg atau 4466 kcal/kg, sedangkan HHV *char* adalah 24.86 MJ/kg atau 5938 kcal/kg sesuai dengan (Speight, J. G., 2015) mengklasifikasikan batubara berdasarkan ASTM D388 maka batubara yang kita amati termasuk dalam klasifikasi lignite dan *char* hasil pirolisis memiliki properties yang menyerupai klasifikasi sub-bituminous B.

Studi lebih lanjut diperlukan guna memastikan bahwa proses pirolisis ini apakah cukup efektif dan ekonomis mengingat peningkatan kualitas batubara tidak cukup signifikan dan klasifikasinya masih belum cukup tinggi untuk menjadi bahan bakar yang cukup versatile, penyesuaian proses perlu diperhatikan agar proses *upgrading* tetap memberikan dampak ekonomis dan meningkatkan efisiensi proses, mengingat bahwa proses pirolisis ini membutuhkan sumber panas dengan *cost* tertentu.

KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini adalah proses pirolisis dapat secara efektif meningkatkan kualitas batubara. Batubara lignit yang digunakan telah dipirolisis dan klasifikasinya naik menjadi sub-bituminous B. hal ini sesuai dengan adanya peningkatan nilai karbon pada hasil uji *ultimate* dari 54,36% menjadi 74,50%, dan peningkatan *fix carbon* pada hasil uji *proximate* yang semula 46,74% menjadi

83,81% dan dibuktikan menggunakan persamaan dulang nilai HHV batubara sebesar 4466 kcal/kg setelah dilakukan proses pirolisis menghasilkan produk berupa padatan *char* dengan nilai HHV menjadi 5938 kcal/kg. studi lebih lanjut diperlukan guna memastikan apakah proses ini cukup ekonomis dan efektif diterapkan di industri.

DAFTAR PUSTAKA

- Ardinata, S., Herniti, D., & Pranajati, A. (2022). Analisis Proksimat Batubara Menggunakan Standar Astm Pada Pt. Cahaya Bumi Perdana Kabupaten Sawahlunto Provinsi Sumatera Barat. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 22(1).
- Chen, J., Ding, L., Wang, P., Zhang, W., Li, J., Mohamed, B. A., Chen, J., Leng, S., Liu, T., & Leng, L. (2022). The estimation of the higher heating value of biochar by data-driven modeling. *J. Renew. Mater*, 10, 1555–1574.
- Edress, N. A. A., & Abdel-Fatah, A. R. (2018). Fuel analyses and rank determination of the Egyptian Maghara main coal seam, north central Sinai, Egypt. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(4), 477–484.
- Halim, A., Widyanti, A. A., Wahyudi, C. D., Martak, F., & Septiani, E. L. (2022). A Pilot Plant Study of Coal Dryer: Simulation and Experiment. *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, 22(1), 124–140.
- Imran, A. M., Widodo, S., & Irvan, U. R. (2020). Correlation of fixed carbon content and calorific value of South Sulawesi Coal, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 473(1), 12106.
- Li, Y., Feng, D., Sun, S., Zhao, Y., Miao, D., & Wu, J. (2022). Reburning pulverized coal with natural gas/syngas upgrading: NO reducing ability and physicochemical structure evolution of coal char. *Science of The Total Environment*, 852, 158517.
- Raza, M., Inayat, A., Ahmed, A., Jamil, F., Ghenai, C., Naqvi, S. R., Shanableh, A., Ayoub, M., Waris, A., & Park, Y.-K. (2021). Progress of the pyrolyzer reactors and advanced technologies for biomass pyrolysis processing. *Sustainability*, 13(19), 11061.
- Rizkiana, J., Handoko, S., Wulandari, W., Ridha, M. A., Prasetyo, H. A., & Sasongko, D. (2018). Hybrid Coal: Effects Of Composition And Co-pyrolysis Retention Time in Low Rank Coal and Biomass Waste Co-pyrolysis Process on The Product's Yield. *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, 68–75.
- Speight, J. G. (2015). *Handbook of coal analysis*. John Wiley & Sons.
- Sulistyo, H., & Syamsiah, S. (2013). Pengolahan gas CO₂ hasil samping industri amoniak melalui gasifikasi batubara yang telah dipirolisis dengan menambahkan Ca (OH) 2. *Jurnal Rekayasa Proses*, 7(1), 26–32.
- Sun, Z., Yao, S., Ren, G., Guo, J., Yang, F., Zhang, M., & Zhang, B. (2024). Study on coarse-grained coal water removal characteristics via steam flash drying for low-rank coal upgrading. *Journal of Cleaner Production*, 446, 141349.
- Wang, K., Tursun, Y., Zhang, K., Gao, Z., Dai, Z., Zhong, M., Jin, L., Li, J., & Liu, Y. (2024). Catalytic

- upgrading of Naomaohu coal pyrolysis volatiles over CaO catalyst. *Journal of the Energy Institute*, 116, 101714.
- Wang, Y., Li, Y., Wang, G., Zhu, J., Yang, H., Jin, L., Hu, S., & Hu, H. (2022). In-situ catalytic upgrading of coal pyrolysis volatiles over red mud-supported nickel catalysts. *Fuel*, 324, 124742.
- Xia, M., Zhu, J., Wei, B., Hu, H., & Jin, L. (2022). Catalytic upgrading of ex-situ heavy coal tar over modified activated carbon. *Fuel*, 312, 122912.
- Yang, H., Zhang, J., Chen, Z., Wan, L., Li, C., Zhang, X., Li, J., Tian, R., Yu, J., & Gao, S. (2023). Base-acid relay catalytic upgrading of coal pyrolysis volatiles over CaO and HZSM-5 catalysts. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 170, 105926.
- Yang, H., Zhang, J., Li, C., Chen, Z., Wang, D., Wang, D., Sharif, M. I., Li, J., Yu, J., & Gao, S. (2022). The effect of acid-base synergistic catalysis on upgrading of volatiles from coal pyrolysis over Mg-Al composite oxides. *Fuel*, 321, 124030.
- Zheng-wei, W., Bao-yong, W. E. I., Jian-nan, L. Ü., Yi-ming, W., Yun-fei, W. U., He, Y., & Hao-quan, H. U. (2022). 煤热解与甲烷蒸汽重整耦合过程焦油在碳基镍催化剂上的原位催化提质. *燃料化学学报 (中英文)*, 50(2), 129–142.

