

KARAKTERISTIK DAN KINETIKA PEMBAKARAN CO-FIRING HYDROCHAR BATOK KELAPA TERAKTIVASI NaOH DAN BATU BARA SUB BITUMINUS

Mohamad Maulana Roziq¹, Ena Marlina², Akhmad Faruk Alhikami³

¹program studi Teknik mesin, universitas islam malang,
e-mail: rozeqco@gmail.com

²program studi Teknik mesin, universitas islam malang,
e-mail:

³program studi Teknik mesin, universitas islam malang,
e-mail: alhikami@unisma.ac.id

Jl. Mayjen Haryono No. 193, Kota Malang 65144

Abstrak

Penerapan biomassa sebagai bahan bakar pendamping batu bara melalui teknologi co-firing merupakan salah satu strategi untuk mendukung transisi energi dan menurunkan emisi karbon pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Batok kelapa memiliki potensi sebagai sumber biomassa yang dapat dikonversi menjadi hydrochar melalui proses Hydrothermal Carbonization (HTC) serta ditingkatkan kualitasnya menggunakan aktivasi kimia dengan larutan NaOH. Penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh aktivasi NaOH terhadap karakteristik pembakaran dan kinetika hydrochar batok kelapa yang digunakan pada sistem co-firing dengan batu bara sub-bituminus. Analisis dilakukan menggunakan Thermogravimetric Analysis (TGA) dan Derivative Thermogravimetric Analysis (DTG), sedangkan parameter kinetika dihitung dengan pendekatan Coats–Redfern. Evaluasi meliputi profil degradasi massa, parameter pembakaran berupa ignition temperature (Ti), peak temperature (Tp), burnout temperature (Tb), DTGmax, ignition index (Di), combustion index (S), serta energi aktivasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran 20% hydrochar dan 80% batu bara menghasilkan performa pembakaran terbaik yang ditunjukkan oleh nilai Ti terendah (257,20°C), DTGmax tertinggi (7,984), dan residu akhir paling rendah (3,85%). Di sisi lain, hydrochar yang diaktivasi menggunakan NaOH 0,5 M memiliki combustion index (S) tertinggi (6,769) serta energi aktivasi yang lebih rendah dibandingkan batu bara murni, sehingga menunjukkan reaktivitas termal yang lebih baik. Temuan ini membuktikan bahwa aktivasi NaOH mampu meningkatkan kualitas hydrochar dan memberikan potensi yang baik sebagai bahan bakar biomassa untuk aplikasi co-firing di PLTU.

Kata kunci: hydrochar batok kelapa, co-firing, aktivasi NaOH, Thermogravimetric Analysis, kinetika pembakaran.

Abstract

The utilization of biomass as a co-firing fuel alongside coal is a strategy to support the energy transition and reduce carbon emissions in coal-fired power plants. Coconut shells hold potential as a biomass source that can be converted into hydrochar via Hydrothermal Carbonization (HTC) and subsequently upgraded through chemical activation with an NaOH solution. This study aims to examine the effect of NaOH activation on the combustion characteristics and kinetics of coconut shell hydrochar used in a co-firing system with sub-bituminous coal. Analyses were conducted using Thermogravimetric Analysis (TGA) and Derivative Thermogravimetric Analysis (DTG), while kinetic parameters were calculated using the Coats–Redfern approach. The evaluation covered mass degradation profiles and combustion parameters—specifically ignition temperature (Ti), peak temperature (Tp), burnout temperature (Tb), DTGmax, ignition index (Di), combustion index (S)—as well as activation energy. The results indicate that a blend of 20% hydrochar and 80% coal yielded the best combustion performance, evidenced by the lowest Ti (257.20°C), highest DTGmax (7.984), and lowest final residue (3.85%). Furthermore, hydrochar activated with 0.5 M NaOH exhibited the highest combustion index (S) of 6.769 and lower activation energy compared to pure coal, indicating superior thermal reactivity. These findings demonstrate that NaOH activation enhances hydrochar quality, offering significant potential for its use as a biomass fuel in coal-fired power plant co-firing applications.

Keywords: Coconut shell hydrochar, co-firing, NaOH activation, Thermogravimetric Analysis, combustion kinetics.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di Indonesia masih didominasi oleh Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batu bara sub-bituminus. Tingginya penggunaan batu bara menyebabkan

peningkatan emisi karbon dioksida (CO₂) sehingga diperlukan solusi yang mampu mendukung transisi energi tanpa mengurangi keandalan pembangkit. Salah satu teknologi yang banyak dikembangkan adalah co-firing, yaitu pembakaran campuran batu bara dan biomassa sebagai sumber energi terbarukan.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penerapan co-firing mampu mengurangi emisi CO₂ serta dapat diimplementasikan pada PLTU tanpa memerlukan modifikasi besar pada sistem pembakaran. Namun, perbedaan karakteristik batu bara dan biomassa, seperti nilai kalor, stabilitas termal, dan reaktivitas pembakaran, masih menjadi tantangan sehingga diperlukan peningkatan kualitas biomassa sebelum digunakan sebagai bahan bakar co-firing.

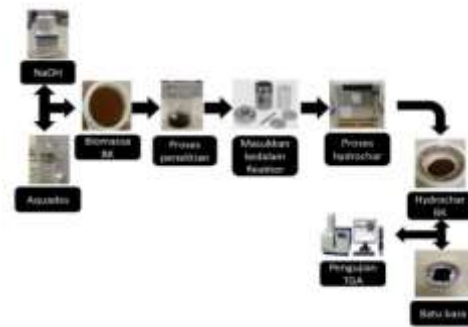
Di sisi lain, batok kelapa merupakan limbah biomassa yang memiliki potensi besar sebagai bahan bakar alternatif karena kandungan karbonnya yang tinggi dan ketersediaannya yang melimpah di Indonesia. Untuk meningkatkan kualitasnya, biomassa dapat diproses menggunakan Hydrothermal Carbonization (HTC) dan aktivasi kimia dengan larutan natrium hidroksida (NaOH) sehingga menghasilkan hydrochar dengan karakteristik pembakaran yang lebih baik. Penelitian Liu dkk. menunjukkan bahwa aktivasi NaOH mampu meningkatkan nilai kalor dan stabilitas termal hydrochar, sedangkan Chen dkk. melaporkan bahwa proses HTC dapat meningkatkan kualitas bahan bakar biomassa. Selain itu, analisis Thermogravimetric Analysis (TGA) dan metode Coats-Redfern telah banyak digunakan untuk mengevaluasi karakteristik pembakaran dan energi aktivasi biomassa secara akurat.

Meskipun penelitian mengenai hydrochar biomassa telah banyak dilakukan, kajian yang secara khusus menganalisis pengaruh aktivasi NaOH pada proses HTC batok kelapa terhadap karakteristik degradasi massa, karakteristik pembakaran, dan energi aktivasi hydrochar dalam sistem co-firing dengan batu bara sub-bituminus masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh aktivasi NaOH menggunakan metode Thermogravimetric Analysis (TGA) dan pendekatan Coats-Redfern dengan mengevaluasi profil degradasi massa, karakteristik pembakaran, serta energi aktivasi. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar dalam pengembangan bahan bakar biomassa yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan mendukung implementasi teknologi co-firing pada PLTU.

alternatif.

2. METODE PENELITIAN

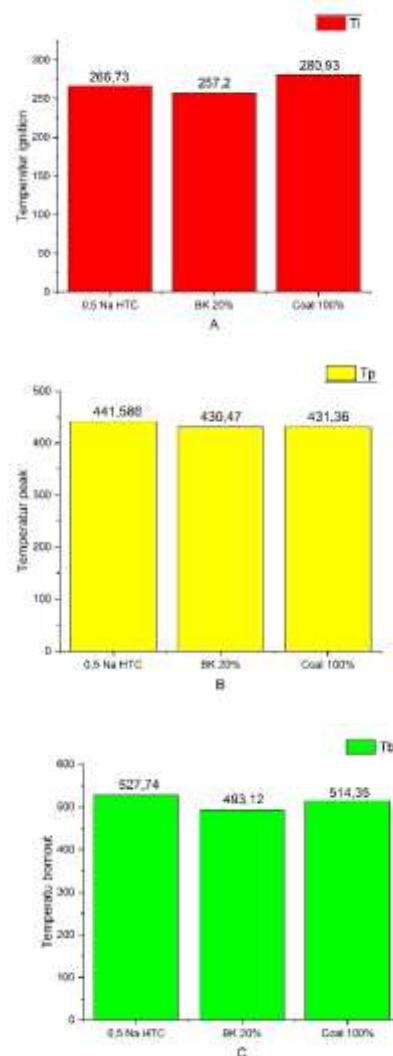
Penelitian ini menggunakan metode eksperimental melalui observasi langsung terhadap objek penelitian, dengan menitikberatkan erbandingan efek pencampuran *hydrochar* dari biomassa batok kelapa yang telah diaktivasi menggunakan larutan NaOH 0,5 M dalam proses *co-firing* bersama batubara bituminous. Tujuan utamanya adalah menilai pengaruh variasi konsentrasi NaOH terhadap performa pembakaran, yang dianalisis menggunakan metode *Thermogravimetric Analysis* (TGA).



Gambar 2 Skema pembuatan hydrochar menggunakan batok kelapa dengan aktivasi NaOH.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Profil karakteristik pembakaran



Gambar 3.1 Karakteristik pembakaran T_i, T_p, T_b

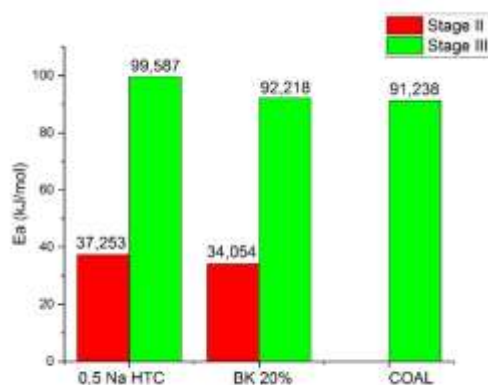
Temperatur ignition (T_i) merepresentasikan kemudahan bahan bakar untuk memulai proses pembakaran. Campuran BK 20% menunjukkan nilai

Ti terendah sebesar 257,20°C, diikuti 0,5 Na HTC sebesar 266,73°C dan Coal 100% sebesar 280,93°C. Nilai Ti yang lebih rendah pada BK 20% mengindikasikan bahwa penambahan 20% hydrochar mampu meningkatkan reaktivitas awal campuran sehingga proses penyalaan berlangsung lebih mudah.

Temperatur puncak pembakaran (Tp) menunjukkan suhu ketika laju pembakaran mencapai nilai maksimum. Sampel BK 20% memiliki nilai Tp terendah, yaitu 430,47°C, sedikit lebih rendah dibandingkan Coal 100% (431,36°C) dan 0,5 Na HTC (441,59°C). Hasil ini menunjukkan bahwa campuran BK 20% mencapai pembakaran maksimum pada temperatur yang lebih rendah, sehingga mengindikasikan proses pembakaran yang lebih efisien.

Temperatur burnout (Tb) merupakan temperatur ketika proses pembakaran telah selesai. Nilai Tb terendah diperoleh pada BK 20% sebesar 493,12°C, diikuti Coal 100% sebesar 514,35°C dan 0,5 Na HTC sebesar 527,74°C. Rendahnya nilai Tb pada BK 20% menunjukkan bahwa campuran tersebut mampu menyelesaikan pembakaran lebih cepat dibandingkan hydrochar maupun batu bara murni. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa penambahan 20% hydrochar hasil HTC yang diaktivasi menggunakan NaOH 0,5 M dapat meningkatkan karakteristik pembakaran dan memberikan performa yang lebih baik pada sistem co-firing.

2. Energi Aktivasi



Gambar 3.2 Energi Aktivasi

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa setiap sampel memiliki nilai energi aktivasi yang berbeda. Hydrochar batok kelapa yang diaktivasi menggunakan NaOH 0,5 M memiliki energi aktivasi lebih rendah dibandingkan batubara murni. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa aktivasi kimia meningkatkan reaktivitas hydrochar melalui pembentukan struktur yang lebih berpori dan peningkatan luas permukaan sehingga proses oksidasi berlangsung lebih mudah.

Campuran BK 20% juga menunjukkan energi aktivasi yang lebih rendah dibandingkan batubara murni. Hal ini mengindikasikan adanya efek sinergis antara hydrochar dan batubara yang mempercepat pelepasan zat volatil serta meningkatkan laju pembakaran, sejalan dengan hasil analisis TGA dan DTG yang menunjukkan laju degradasi massa tertinggi pada sampel tersebut.

Sebaliknya, batubara murni memiliki energi aktivasi tertinggi karena didominasi oleh struktur karbon yang lebih stabil, sehingga membutuhkan temperatur dan energi yang lebih besar untuk memulai pembakaran.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa penurunan energi aktivasi berhubungan dengan peningkatan reaktivitas pembakaran. Aktivasi NaOH terbukti mampu memperbaiki karakteristik kinetika hydrochar, sehingga berpotensi meningkatkan kinerja biomassa sebagai bahan bakar pada sistem co-firing dengan batubara sub-bituminus.

4. KESIMPULAN

- Seluruh sampel mengalami empat tahapan degradasi termal, yaitu penguapan air, pelepasan senyawa volatil, pembakaran utama, dan pembentukan residu. Campuran BK 20% menunjukkan performa degradasi terbaik dengan laju degradasi maksimum tertinggi dan residu akhir terendah (3,85%), yang mengindikasikan pembakaran lebih efektif dibandingkan hydrochar maupun batu bara murni.
- Campuran BK 20% memiliki karakteristik pembakaran terbaik dengan ignition temperature (Ti) terendah (257,20°C) dan DTG maksimum tertinggi (7,984 %/menit), sehingga lebih mudah menyala dan terbakar. Sementara itu, hydrochar teraktivasi NaOH 0,5 M menghasilkan combustion index (S) tertinggi (6,769), yang menunjukkan kestabilan pembakaran lebih baik akibat meningkatnya porositas dan luas permukaan.
- Analisis kinetika menunjukkan bahwa hydrochar teraktivasi NaOH memiliki energi aktivasi lebih rendah dibandingkan batu bara sub-bituminus, sehingga lebih reaktif dan memerlukan energi yang lebih kecil untuk memulai pembakaran. Sebaliknya, batu bara memiliki energi aktivasi lebih tinggi karena stabilitas termalnya lebih besar. Hasil ini menunjukkan bahwa aktivasi NaOH meningkatkan potensi hydrochar sebagai bahan bakar biomassa untuk aplikasi co-firing.

SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat dipertimbangkan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan variasi konsentrasi activator NaOH yang lebih beragam guna menentukan konsentrasi optimum dalam meningkatkan karakteristik pembakaran serta menurunkan energi hydrochar.
2. Variasi komposisi campuran hydrochar dan batu bara perlu diperluas agar diperoleh komposisi *co-firing* yang memberikan performa pembakaran paling optimal.

DAFTAR PUSTAKA

1. Agency, I. E. (2023). *World Energy Outlook 2023*.
2. Almusafir, R., & Smith, J. D. (2024). *Thermal Decomposition and Kinetic Parameters of Three Biomass Feedstocks for the Performance of the Gasification Process Using a Thermogravimetric Analyzer*.
3. Association, W. C. (2020). *Coal Facts 2020*. <https://www.worldcoal.org>
4. Atkins, P. W., & de Paula, J. (2017). *Atkins Physical Chemistry* (10th ed.). Oxford University Press.
5. Attasophonwattana, P., Pukrushpan, J., & Areeprasert, C. (2021). *Studi Dekomposisi Termal dan Kinetik Hidrokarbon Berasal Proses Karbonisasi dan Pencucian*. 15–21.
6. Auliya, K., Sriwijayasih, I., & Auliya, P. K. (2024). *Performance Review of Distillation Equipment Using An Evaporator*. 8(2), 175–181.
7. Basu, P. (2018). *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction* (3rd ed.). Academic Press.
8. Bichang, D. O., Oladele, I. O., Alabi, O. O., Aramide, F. O., Oluseye, O., Borisade, S. G., Githinji, D. N., & Ojemaye, M. O. (2024). Heliyon Comparative property investigation of raw and treated coconut shell biomass for potential polymer composite application. *Heliyon*, 10(23), e40704. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40704>
9. Chen, W.-H., Kuo, P.-C., Liu, S.-H., & Wang, C.-W. (2016). Thermogravimetric analysis and kinetic modeling of torrefaction and pyrolysis of *Miscanthus*. *Energy*, 113, 1015–1021. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.133>
10. Chen, W.-H., Lin, B.-J., & Liu, S.-H. (2020). Hydrothermal carbonization of biomass and its impact on fuel characteristics and combustion behavior. *Applied Energy*, 261, 114229. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114229>
11. Demirbas, A. (2019). Biomass and Coal Co-firing: Fuel Preparation and Combustion. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 41(15), 1841–1852. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1570068>
12. Dtg, T. G. A., El-sayed, S. A., & Mostafa, M. E. (2014). Pyrolysis characteristics and kinetic parameters determination of biomass fuel powders by differential thermal gravimetric analysis. *Energy Conversion and Management*, 85, 165–172. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.068>
13. Food and Agriculture Organization. (2022). *FAOSTAT: Coconut Production Data 2022*.
14. Funke, A., & Ziegler, F. (2010). Hydrothermal carbonization of biomass: A summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4(2), 160–177. <https://doi.org/10.1002/bbb.198>
15. Gabbott, P. (2008). *Principles and Applications of Thermal Analysis*. Blackwell Publishing.