

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

Dwi Eko Wahyudi Jusuf¹, Ena Marlina², Akhmad Faruq Alhikami³

¹Program Studi Teknik Mesin, Universitas Islam Malang

e-mail: 22201052076@unisma.ac.id

Jl. Mayjen Haryono No. 193, Kota Malang 65144

Abstrak

Pemanfaatan hydrochar batok kelapa sebagai bahan bakar pendamping batu bara melalui teknologi co-firing berpotensi mendukung transisi energi dan mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Penelitian ini bertujuan menganalisis profil degradasi massa dan parameter termodinamika pembakaran berupa energi bebas Gibbs (ΔG), entalpi (ΔH), dan entropi (ΔS) pada sampel 0,5 Na HTC, BK20%, dan Coal100%. Hydrochar diproduksi melalui Hydrothermal Carbonization pada suhu 200°C selama 8 jam, dikeringkan pada 95°C selama 5 jam, diseragamkan hingga 200 mesh, lalu diuji menggunakan Thermogravimetric Analysis (TGA). Hasil menunjukkan empat tahap degradasi termal. BK20% memiliki laju degradasi maksimum tertinggi dan residu terendah sebesar 3,85%, yang menunjukkan pembakaran lebih sempurna. Pada Stage III, sampel 0,5 Na HTC menghasilkan ΔG terendah sebesar 185,259 kJ/mol, ΔH tertinggi sebesar 79,579 kJ/mol, dan ΔS paling mendekati nol sebesar -0,148 kJ/mol·K. Temuan tersebut menunjukkan bahwa aktivasi NaOH 0,5 M menurunkan hambatan termodinamika, meningkatkan kapasitas energi, dan memperbaiki reaktivitas hydrochar sehingga berpotensi digunakan dalam sistem co-firing batu bara sub-bituminus.

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

Abstract

The use of coconut-shell hydrochar as a supplementary fuel for coal through co-firing technology may support the energy transition and reduce dependence on fossil fuels. This study analyzes the mass-degradation profile and combustion thermodynamic parameters, including Gibbs free energy (ΔG), enthalpy (ΔH), and entropy (ΔS), of the 0.5 Na HTC, BK20%, and Coal100% samples. Hydrochar was produced by Hydrothermal Carbonization at 200°C for 8 h, dried at 95°C for 5 h, sieved to 200 mesh, and tested using Thermogravimetric Analysis (TGA). The results show four thermal-degradation stages. BK20% exhibited the highest maximum degradation rate and the lowest residue of 3.85%, indicating more complete combustion. At Stage III, 0.5 Na HTC produced the lowest ΔG of 185.259 kJ/mol, the highest ΔH of 79.579 kJ/mol, and the ΔS value closest to zero at -0.148 kJ/mol·K. These findings indicate that 0.5 M NaOH activation reduces the thermodynamic barrier, increases energy capacity, and improves hydrochar reactivity, supporting its potential application in sub-bituminous coal co-firing.

Keywords: *coconut-shell hydrochar, co-firing, NaOH activation, Thermogravimetric Analysis, combustion thermodynamics.*

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik masih banyak dipenuhi oleh pembangkit berbahan bakar batu bara, termasuk batu bara sub-bituminus. Ketergantungan tersebut menjaga keandalan pasokan energi, tetapi juga meningkatkan emisi karbon dioksida dan polutan udara. Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan tanpa modifikasi besar pada sistem pembangkit adalah co-firing, yaitu pembakaran bersama batu bara dan biomassa dalam satu sistem. Teknologi ini memungkinkan substitusi sebagian bahan bakar fosil sekaligus mempertahankan stabilitas pembakaran

apabila sifat termokimia kedua bahan sesuai (Demirbas, 2019; Liu et al., 2023).

Batok kelapa merupakan limbah biomassa dengan kandungan karbon dan nilai kalor yang relatif tinggi. Namun, biomassa mentah memiliki kadar air tinggi, densitas rendah, dan kestabilan termal yang belum optimal. Hydrothermal Carbonization (HTC) dapat mengubah biomassa basah menjadi hydrochar kaya karbon pada temperatur 180–250°C. Penambahan NaOH selama HTC berperan dalam proses dehidrasi, dekarboksilasi, dan pembentukan pori sehingga berpotensi meningkatkan kualitas bahan bakar serta

reaktivitas termalnya (Funke & Ziegler, 2010; Wang et al., 2023).

Kajian mengenai co-firing dan hydrochar telah banyak dilakukan, tetapi analisis yang menghubungkan aktivasi NaOH pada hydrochar batok kelapa dengan profil degradasi massa dan parameter termodinamika pembakaran masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini menganalisis perilaku TGA/DTG serta nilai energi bebas Gibbs, entalpi, dan entropi pada sampel 0,5 Na HTC, BK20%, dan Coal100%. Analisis tersebut digunakan untuk menilai pengaruh aktivasi NaOH 0,5 M terhadap kemudahan reaksi, kebutuhan energi, dan perubahan keteraturan struktur selama pembakaran.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian menggunakan metode eksperimental. Sampel dipersiapkan di Laboratorium Terpadu Universitas Islam Malang, sedangkan pengujian Thermogravimetric Analysis dilakukan di Laboratorium Terpadu Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Brawijaya. Penelitian dilaksanakan pada April 2025. Variasi sampel terdiri atas 0,5 Na HTC, BK20%, dan Coal100% sesuai penamaan pada data pengujian.

Batok kelapa dikarbonisasi melalui proses HTC pada suhu 200°C selama 8 jam. Sampel selanjutnya dikeringkan dalam oven pada 95°C selama 5 jam dan diayak hingga ukuran 200 mesh. Variasi perlakuan mencakup hydrochar tanpa aktivasi dan hydrochar yang diaktivasi menggunakan larutan NaOH 0,5 M, dengan komposisi co-firing 20% hydrochar dan 80% batu bara sub-bituminus. Skema preparasi sampel ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema pembuatan hydrochar batok kelapa dengan aktivasi NaOH.

Data TGA diolah untuk memperoleh kurva perubahan massa terhadap temperatur, sedangkan DTG digunakan untuk menentukan laju kehilangan massa. Profil degradasi dibagi menjadi fase penguapan air, devolatilisasi, pembakaran utama, dan pembentukan residu. Parameter termodinamika dihitung dengan pendekatan Coats–Redfern untuk memperoleh ΔG , ΔH , dan ΔS pada Stage II dan Stage III. Nilai ΔG digunakan untuk menilai hambatan termodinamika, ΔH menunjukkan kebutuhan energi, dan ΔS menggambarkan perubahan keteraturan sistem selama reaksi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Profil degradasi massa

Kurva TGA dan DTG pada Gambar 2 menunjukkan bahwa seluruh sampel mengalami empat tahap penurunan massa. Fase I berlangsung pada 30–170°C dan didominasi penguapan air. Fase II pada 170–340°C berkaitan dengan pelepasan senyawa volatil dan dekomposisi awal komponen organik. Fase III pada 340–540°C merupakan pembakaran utama, sedangkan pada temperatur di atas 540°C kurva mulai mendatar karena material memasuki fase burnout dan menyisakan abu atau mineral anorganik.

Pada fase awal, kehilangan massa tercatat sebesar 13,46% pada 0,5 Na HTC, 12,57% pada BK20%, dan 14,91% pada Coal100%. Nilai terendah pada BK20% menunjukkan kandungan air yang lebih rendah. Pada fase devolatilisasi, BK20% mengalami kehilangan massa terbesar sebesar 20,77%, sedangkan 0,5 Na HTC sebesar 16,12%. Besarnya pelepasan volatil pada BK20% mempercepat pembentukan nyala awal dan mendukung pembakaran karbon batu bara.

Fase III menghasilkan penurunan massa terbesar. Coal100% kehilangan massa sebesar 80,09%, 0,5 Na HTC sebesar 64,79%, dan BK20% sebesar 62,82%. Meskipun persentase kehilangan massa Coal100% lebih besar, puncak DTG BK20% paling tinggi, sekitar 8%/menit, yang menunjukkan laju pembakaran paling cepat. Perbedaan ini terjadi karena sebagian massa BK20% telah terlepas pada fase devolatilisasi, sedangkan batu bara memiliki kandungan fixed carbon lebih tinggi yang baru teroksidasi pada fase pembakaran utama.

Residu akhir sebesar 5,62% pada 0,5 Na HTC, 3,85% pada BK20%, dan 4,91% pada Coal100%. Residu terendah pada BK20% menunjukkan pembakaran lebih sempurna. Secara keseluruhan, pencampuran hydrochar dan batu bara memberikan efek sinergis: senyawa volatil hydrochar mempercepat penyalaan, sedangkan karbon tetap batu bara mempertahankan pembakaran pada temperatur tinggi. Temuan ini sejalan dengan kajian Waheed et al. (2023), yang menunjukkan adanya interaksi sinergis pada campuran batu bara dan hydrochar selama co-firing.

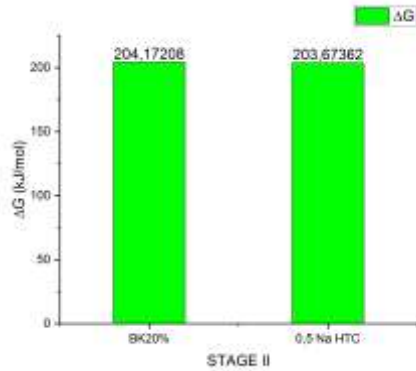
3.2 Analisis termodinamika pembakaran

Ringkasan nilai parameter termodinamika disajikan pada Tabel 1. Seluruh nilai ΔG dan ΔH bernilai positif, sedangkan ΔS bernilai negatif. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa proses degradasi membutuhkan energi dari luar, berlangsung secara endotermik pada tahap aktivasi, dan membentuk keadaan teraktivasi yang lebih teratur dibandingkan kondisi awal.

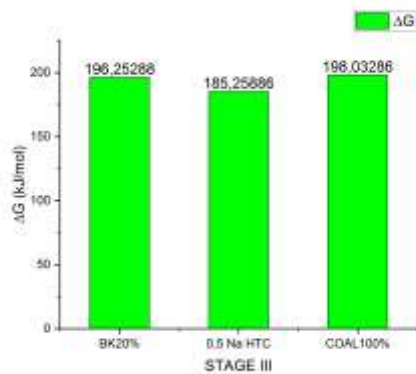
Tabel 1. Parameter termodinamika pembakaran.

Parameter	Stage	BK20%	0,5 Na HTC	Coal100%
ΔG (kJ/mol)	II	204,172	203,674	—
ΔG (kJ/mol)	III	196,253	185,250	198,033
ΔH (kJ/mol)	II	23,643	26,516	—
ΔH (kJ/mol)	III	73,749	79,579	72,932
ΔS (kJ/mol·K)	II	-0,233	-0,248	—
ΔS (kJ/mol·K)	III	-0,172	-0,148	-0,175

Energi Gibbs Free Gibbs (ΔG)



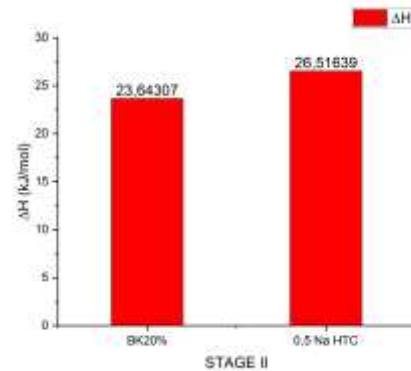
Gambar 4. Energi bebas Gibbs (ΔG) pada Stage II.



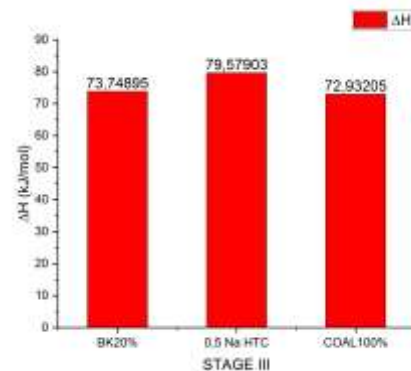
Gambar 5. Energi bebas Gibbs (ΔG) pada Stage III.

Pada Stage II, nilai energi bebas Gibbs (ΔG) BK20% sebesar 204,172 kJ/mol dan 0,5 Na HTC sebesar 203,674 kJ/mol. Nilai ΔG yang positif menunjukkan bahwa proses dekomposisi belum berlangsung spontan dan masih memerlukan energi dari luar. Nilai 0,5 Na HTC yang sedikit lebih rendah daripada BK20% menandakan hambatan termodinamika yang lebih kecil setelah aktivasi NaOH. Pada Stage III, nilai ΔG menurun menjadi 196,253 kJ/mol pada BK20%, 185,259 kJ/mol pada 0,5 Na HTC, dan 198,033 kJ/mol pada Coal100%. Nilai terendah pada 0,5 Na HTC menunjukkan bahwa reaksi oksidasi karbon berlangsung lebih mudah. Kondisi tersebut diduga berkaitan dengan struktur karbon yang lebih amorf serta peningkatan luas permukaan pori setelah perlakuan hidrotermal dan aktivasi NaOH.

Entalpi (ΔH)



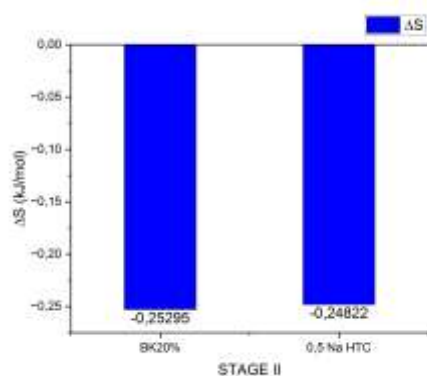
Gambar 6. Entalpi (ΔH) pada Stage II.



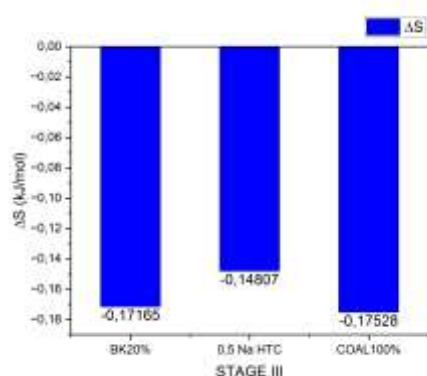
Gambar 7. Entalpi (ΔH) pada Stage III.

Seluruh sampel menghasilkan nilai entalpi (ΔH) positif, sehingga tahap aktivasi dan dekomposisi termalnya bersifat endotermik atau memerlukan penyerapan energi. Pada Stage II, BK20% memiliki ΔH sebesar 23,643 kJ/mol, sedangkan 0,5 Na HTC sebesar 26,516 kJ/mol. Nilai yang lebih tinggi pada 0,5 Na HTC menunjukkan bahwa struktur karbon hasil HTC lebih padat dan memerlukan energi lebih besar untuk memulai dekomposisi. Pada Stage III, ΔH meningkat menjadi 73,749 kJ/mol pada BK20%, 79,579 kJ/mol pada 0,5 Na HTC, dan 72,932 kJ/mol pada Coal100%. Nilai tertinggi pada 0,5 Na HTC mengindikasikan kandungan energi yang lebih terkonsentrasi serta kestabilan struktur karbon yang lebih tinggi pada tahap dekomposisi lanjut.

Entropi (ΔS)



Gambar 8. Entropi (ΔS) pada Stage II.



Gambar 9. Entropi (ΔS) pada Stage III.

Seluruh nilai entropi (ΔS) bernilai negatif, yang menunjukkan bahwa pembentukan kompleks teraktivasi menyebabkan sistem menjadi lebih teratur dibandingkan kondisi awal. Pada Stage II, BK20% memiliki ΔS sebesar $-0,253 \text{ kJ/mol}\cdot\text{K}$, sedangkan 0,5 Na HTC sebesar $-0,248 \text{ kJ/mol}\cdot\text{K}$. Pada Stage III, nilai ΔS meningkat atau menjadi kurang negatif, yaitu $-0,172 \text{ kJ/mol}\cdot\text{K}$ pada BK20%, $-0,148 \text{ kJ/mol}\cdot\text{K}$ pada 0,5 Na HTC, dan $-0,175 \text{ kJ/mol}\cdot\text{K}$ pada Coal100%. Nilai 0,5 Na HTC yang paling mendekati nol menunjukkan perubahan keteraturan yang lebih kecil dan fleksibilitas struktur yang lebih baik selama oksidasi. Kombinasi ΔG terendah, ΔH tertinggi, dan ΔS paling mendekati nol menegaskan bahwa aktivasi NaOH 0,5 M menghasilkan hydrochar dengan hambatan reaksi lebih rendah, kapasitas energi lebih tinggi, dan respons termal yang lebih reaktif.

4. KESIMPULAN

Seluruh sampel mengalami empat tahap degradasi termal, yaitu penguapan air, devolatilisasi, pembakaran utama, dan pembentukan residu. BK20% menunjukkan laju degradasi maksimum tertinggi dan residu paling rendah sebesar 3,85%, sehingga proses pembakarannya berlangsung lebih cepat dan lebih sempurna dibandingkan sampel lainnya.

Aktivasi NaOH 0,5 M memberikan karakteristik termodinamika yang paling menguntungkan pada Stage III. Sampel 0,5 Na HTC memiliki ΔG terendah sebesar $185,259 \text{ kJ/mol}$, ΔH tertinggi sebesar $79,579$

kJ/mol , dan ΔS paling mendekati nol sebesar $-0,148 \text{ kJ/mol}\cdot\text{K}$. Hasil tersebut menunjukkan hambatan termodinamika yang lebih kecil, kandungan energi lebih terkonsentrasi, serta reaktivitas struktur yang lebih baik.

Hydrochar batok kelapa teraktivasi NaOH berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan bakar pendamping batu bara sub-bituminus dalam sistem co-firing. Penelitian lanjutan perlu menguji variasi konsentrasi NaOH, kondisi HTC, dan emisi gas pembakaran untuk menentukan kondisi operasi optimum.

DAFTAR PUSTAKA

- Baxter, L. L. (2005). Biomass-coal co-combustion: Opportunity for affordable renewable energy. *Fuel*, 84(10), 1295–1302.
- 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>
- 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>
- Gai, C., Dong, Y., & Zhang, T. (2016). Thermal behavior and kinetic study of biomass by TGA and DTA. *Bioresour Technology*, 219, 576–582. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.015>
- Gil, M. V., & Rubiera, F. (2018). Co-firing of coal and biomass: Fundamentals, technologies, and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 122–141. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.078>
- Libra, J. A., Ro, K. S., Kranert, M., Fühner, C., Berge, N. D., Neubauer, Y., Titirici, M.-M., & Funke, A. (2011). Hydrothermal carbonization of biomass residuals: A comparative review. *Biofuels*, 2(1), 71–106. <https://doi.org/10.4155/bfs.10.81>
- Liao, Y., & Ma, X. (2021). Thermodynamic analysis of biomass–coal co-firing based on energy and exergy methods. *Energy Conversion and Management*, 236, 114047. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114047>
- Liu, L., Zaki, M., Xie, Y., Gao, S., Guo, Y., Dong, J., Gao, Y., Li, A., & Ji, G. (2023). Recent advances of research in coal and biomass co-firing for electricity and heat generation. *Circular Economy*, 2(4), 100063. <https://doi.org/10.1016/j.cec.2023.100063>
- Nawaz, A., & Kumar, P. (2023). Impact of hydrothermal carbonization severity on fuel properties, kinetic and thermodynamic parameters. *Fuel*, 336, 127166. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127166>
- Riyanto, H., Hardianto, T., Adriansyah, W., & Jeffry, G. Y. (2021). Studi termodinamika pembakaran kombinasi batu bara dan biomassa limbah. 5(2), 82–90.
- Vyazovkin, S., Burnham, A. K., Criado, J. M., Pérez-Maqueda, L. A., Popescu, C., & Sbirrazzuoli, N. (2014). ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data. *Thermochimica Acta*, 590, 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2014.02.021>
- Waheed, Q., Ahmad, M. S., & Khan, Z. A. (2023). Synergistic effects of coal–hydrochar blends during co-firing: A thermogravimetric and kinetic study. *Energy Conversion and Management*, 278, 116654. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116654>

- Wang, G., Li, D., Xiong, L., Dan, J., et al. (2023). Application of catalysts in biomass hydrothermal carbonization for the preparation of high-quality blast furnace injection fuel. *Energy*, 283, 129147. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129147>
- Wang, Z., Lin, Y., & Zhao, Y. (2020). Effect of hydrothermal carbonization on fuel properties and combustion behavior of biomass. *Fuel*, 277, 118143. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118143>