

EFEKTIVITAS KENAIKAN KONSENTRASI NaOH AKTIVASI *HYDROCHAR* BATOK KELAPA TERHADAP THERMODINAMIKA PEMBAKARAN *CO-FIRING* BATU BARA *SUB-BITUMINOUS*

Andreas Bagus Laksana Putra¹, Ena Marlina², Akhmad Faruq Alhikami³

¹Teknik Mesin, Universitas Islam Malang

Email : 22101052067@unisma.ac.id

²Teknik Mesin, Universitas Islam Malang

Email : ena.marlina@unisma.ac.id

³Teknik Mesin, Universitas Islam Malang

Email : alhikami@unisma.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini penting karena *co-firing* biomassa berpotensi menurunkan emisi batu bara tanpa mengubah infrastruktur pembangkit. Masalah penelitian ini adalah pengaruh konsentrasi NaOH terhadap performa termodinamika pembakaran *hydrochar* batok kelapa pada sistem *co-firing*. Penelitian ini bertujuan menganalisis perubahan laju degradasi massa, energi bebas Gibbs, entalpi, dan entropi akibat variasi aktivasi NaOH. Metode penelitian bersifat eksperimental. *Hydrochar* disintesis melalui *hydrothermal carbonization*, diaktivasi dengan NaOH 0,5 M dan 1 M, lalu dicampur dengan batu bara *sub-bituminous* pada rasio 20:80. Analisis dilakukan menggunakan *Thermogravimetric Analysis* dan pendekatan *Coats–Redfern*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi NaOH menurunkan temperatur awal degradasi dan memperbaiki parameter termodinamika pembakaran. Nilai Gibbs Free Energy menurun, sedangkan entalpi dan entropi menunjukkan reaktivitas yang lebih baik. Kesimpulannya, aktivasi NaOH meningkatkan kelayakan *hydrochar* sebagai bahan bakar *co-firing*. Penelitian lanjutan disarankan mengkaji rasio campuran dan skala industri.

Kata Kunci: *hydrochar*, NaOH, *co-firing*, termodinamika pembakaran, TGA

ABSTRACT

This study is important because biomass co-firing offers a practical strategy to reduce coal-related emissions without major power plant modifications. The research addresses the effect of NaOH activation concentration on the thermodynamic combustion performance of coconut shell hydrochar in a co-firing system. The objective is to analyze changes in mass degradation behavior, Gibbs free energy, enthalpy, and entropy resulting from different NaOH concentrations. An experimental method was applied. Hydrochar was produced through hydrothermal carbonization, chemically activated using 0.5 M and 1 M NaOH, and blended with sub-bituminous coal at a 20:80 ratio. Combustion characteristics were evaluated using Thermogravimetric Analysis combined with the Coats–Redfern model. The results show that higher NaOH concentration lowers the initial degradation temperature and improves combustion thermodynamics. Gibbs free energy decreases, while enthalpy and entropy indicate enhanced reactivity. The study concludes that NaOH activation significantly improves hydrochar suitability for co-firing applications. Future research should examine different blending ratios and industrial-scale implementation.

Keywords: *hydrochar*, NaOH activation, *co-firing*, combustion thermodynamics, TGA

PENDAHULUAN

Indonesia menghadapi tantangan serius pada sektor energi dan lingkungan akibat meningkatnya kebutuhan energi yang masih didominasi bahan bakar fosil, khususnya batu bara yang menyumbang lebih dari 60% pembangkitan listrik nasional. Ketergantungan ini meningkatkan emisi karbon dan mengancam ketahanan energi karena sifat batu bara yang tidak terbarukan. Indonesia termasuk sepuluh

besar penyumbang emisi batu bara global, sementara target bauran energi terbarukan sebesar 23% pada 2025 baru mencapai 13,1% pada 2023[1], [2], [3].

Pemanfaatan biomassa lokal melalui skema *co-firing* menjadi solusi strategis untuk menurunkan emisi tanpa mengganti infrastruktur pembangkit. Batok kelapa memiliki potensi tinggi karena ketersediaannya melimpah dan kandungan

karbonnya tinggi. Namun, karakteristik batok kelapa mentah seperti kadar air tinggi dan densitas energi rendah membatasi pemanfaatannya langsung sebagai bahan bakar[4], [5], [6], [7].

Hydrothermal Carbonization merupakan metode efektif untuk mengonversi batok kelapa menjadi hydrochar berkualitas tinggi pada kondisi air bersuhu 180–250°C. Proses ini menghasilkan bahan bakar padat dengan nilai kalor dan kestabilan termal yang lebih baik. Aktivasi kimia menggunakan NaOH dapat meningkatkan porositas, luas permukaan, dan reaktivitas pembakaran hydrochar, sehingga berpotensi kuat sebagai bahan bakar alternatif dalam sistem co-firing dengan batu bara sub-bituminous[2], [8], [9].

TINJAUAN PUSTAKA

Co-firing merupakan teknologi pembakaran simultan batu bara dan biomassa dalam satu sistem PLTU yang memungkinkan integrasi energi terbarukan tanpa penggantian infrastruktur utama. Teknologi ini dinilai efektif sebagai solusi transisi energi karena mampu menurunkan emisi gas rumah kaca, memanfaatkan biomassa lokal, dan menjaga efisiensi pembangkit. Batu bara masih mendominasi pembangkitan listrik dan menyumbang sekitar 30% emisi CO₂ global, sehingga penerapan co-firing menjadi strategi dekarbonisasi yang layak secara teknis dan ekonomis. Pengurangan emisi bersih melalui co-firing dilaporkan mencapai 5–20% tergantung rasio biomassa, sementara potensi biomassa Indonesia yang besar mendukung penerapannya secara berkelanjutan[7], [10], [11].

Secara prinsip, co-firing memadukan dua bahan bakar dengan karakteristik berbeda untuk menghasilkan panas pada boiler. Kinerjanya dipengaruhi oleh nilai kalor, kadar air, abu, dan volatilitas bahan bakar, serta kompatibilitas dengan sistem pembakaran. Tantangan utama meliputi slagging, perbedaan laju pembakaran, dan kebutuhan modifikasi sistem pengumpanan. Tiga

pendekatan umum co-firing meliputi direct, indirect, dan parallel co-firing. Direct co-firing paling sederhana dan ekonomis, tetapi dibatasi rasio biomassa rendah. Indirect co-firing menawarkan fleksibilitas dan rasio biomassa lebih tinggi melalui gasifikasi, namun memerlukan investasi besar. Parallel co-firing memberikan keandalan operasional tinggi dengan sistem terpisah, meskipun biaya awalnya lebih besar[12][13].

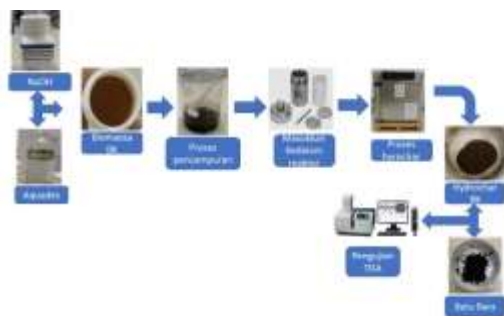
Batu bara, khususnya sub-bituminous, banyak digunakan karena ketersediaan dan reaktivitasnya yang baik, meski memiliki nilai kalor lebih rendah dibandingkan rank lebih tinggi. Karakteristiknya ditentukan melalui analisis proksimat dan ultimate yang memengaruhi efisiensi pembakaran dan emisi. Biomassa batok kelapa menjadi kandidat kuat untuk co-firing karena kandungan lignin tinggi, nilai kalor hingga 29 MJ/kg, serta kemudahan konversi melalui proses termokimia. Pemanfaatannya mendukung diversifikasi energi dan pengelolaan limbah[1], [7], [14].

Aktivasi kimia menggunakan NaOH berperan meningkatkan sifat pembakaran biomassa atau hydrochar melalui peningkatan porositas dan reaktivitas. Karakteristik termal bahan bakar dan campurannya dianalisis menggunakan TGA dan DTA untuk mengevaluasi stabilitas termal, kinetika reaksi, dan efek sinergi dalam co-firing. Pemahaman termodinamika pembakaran menjadi dasar penting dalam menilai efisiensi energi dan kelayakan proses pembakaran batu bara dan biomassa[2], [7][2], [15], [16].

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental untuk menganalisis pengaruh pencampuran hydrochar batok kelapa yang diaktivasi NaOH 1 M dengan batu bara bituminous dalam sistem co-firing. Evaluasi difokuskan pada pengaruh aktivasi NaOH terhadap kinerja pembakaran, yang dikaji melalui

analisis Thermogravimetric Analysis (TGA).

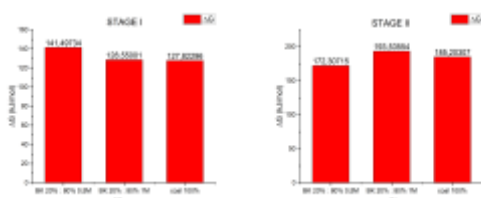


gambar 1. Skema Instalansi Penelitian

Sampel hydrochar disiapkan melalui aktivasi kimia dan proses hidrotermal. Larutan aktivator dibuat dengan melarutkan 2 g NaOH dalam 5 mL aquades, kemudian dicampurkan dengan 5 g biomassa batok kelapa hingga homogen. Campuran selanjutnya diproses dalam reaktor autoclave pada suhu 210 °C selama 8 jam untuk menghasilkan hydrochar. Produk yang diperoleh disaring, dinetralkan menggunakan aquades hingga pH 7, lalu dikeringkan semalaman dan dioven pada suhu 95 °C selama 6 jam sebelum dianalisis menggunakan TGA. Data TGA diolah untuk memperoleh profil degradasi massa dan parameter termodinamika pembakaran, meliputi energi bebas Gibbs (ΔG), entalpi (ΔH), dan entropi (ΔS). Parameter tersebut digunakan untuk mengevaluasi spontanitas reaksi, karakter eksotermik pembakaran, serta tingkat ketidakteraturan sistem selama proses degradasi termal bahan bakar.

HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Gibbs Free Energy

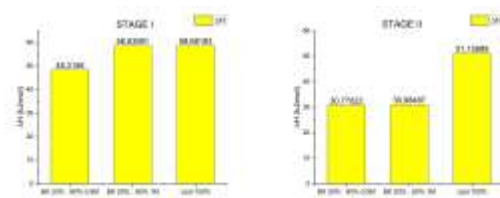


gambar 2. Grafik Gibbs free Energy

Perhitungan parameter termodinamika menggunakan metode Coats–Redfern menunjukkan bahwa energi bebas Gibbs (ΔG) mencerminkan

spontanitas dan kestabilan termal pembakaran hasil hydrothermal carbonization. Nilai ΔG meningkat dari Stage 1 ke Stage 2 pada seluruh sampel, yang menandakan kebutuhan energi aktivasi lebih besar pada tahap pembakaran lanjutan akibat dominasi oksidasi karbon aromatik dan lignin terkarbonisasi. Sampel batok kelapa teraktivasi NaOH 1 M menunjukkan nilai ΔG tertinggi pada Stage 2 (193,536 kJ/mol), diikuti batubara murni dan sampel NaOH 0,5 M. Nilai ΔG yang lebih tinggi mengindikasikan struktur karbon yang lebih stabil dan teraromatisasi, sehingga reaksi cenderung kurang spontan dan memerlukan energi eksternal lebih besar. Peningkatan konsentrasi NaOH terbukti memperkuat kestabilan termal material hasil HTC, bahkan mendekati karakteristik termodinamika batubara. Hasil ini menegaskan bahwa aktivasi NaOH berperan penting dalam meningkatkan kualitas karbon padat sebagai bahan bakar berenergi tinggi dan material karbon yang tahan terhadap degradasi termal.

b. Entalpy

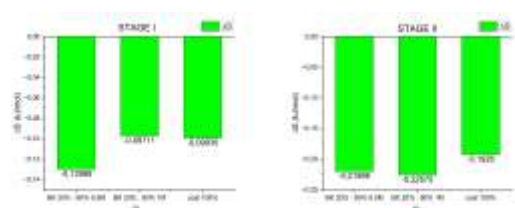


gambar 3. Grafik Enthalpy

Hasil perhitungan entalpi aktivasi (ΔH) dengan metode Coats–Redfern menunjukkan perbedaan karakter pembakaran pada setiap sampel dan tahapan reaksi. Pada seluruh sampel, nilai ΔH lebih tinggi pada Stage 1 dan menurun pada Stage 2, yang menandakan pergeseran mekanisme pembakaran dari degradasi senyawa volatil menuju oksidasi karbon padat yang lebih stabil. Sampel batok kelapa teraktivasi NaOH 1 M memiliki nilai ΔH tertinggi pada Stage 1 dan mendekati nilai batubara murni, menunjukkan peningkatan kestabilan termal dan kekuatan ikatan karbon akibat aktivasi kimia.

Sebaliknya, sampel NaOH 0,5 M menunjukkan nilai ΔH lebih rendah, yang mengindikasikan struktur karbon lebih reaktif dan mudah terdekomposisi. Penurunan ΔH pada Stage 2 di semua sampel menunjukkan bahwa oksidasi lanjutan berlangsung lebih efisien setelah komponen kompleks terurai. Hasil ini menegaskan bahwa peningkatan konsentrasi NaOH pada proses HTC meningkatkan kualitas termal hydrochar dan membuat karakteristiknya semakin mendekati batubara sebagai bahan bakar padat.

c. Entropy



gambar 4. Grafik Entropy

Analisis entropi (ΔS) menunjukkan bahwa seluruh sampel memiliki nilai ΔS negatif pada kedua tahap pembakaran, yang menandakan penurunan tingkat ketidakteraturan sistem selama proses termal berlangsung. Penurunan ΔS yang lebih besar pada Stage 2 mengindikasikan terbentuknya struktur karbon yang lebih terorganisir akibat oksidasi lanjutan dan peningkatan aromatisasi karbon padat. Sampel batok kelapa teraktivasi NaOH 1 M menunjukkan nilai ΔS paling negatif, terutama pada Stage 2, yang mencerminkan keteraturan struktur dan kestabilan termodinamika yang lebih tinggi dibandingkan sampel 0,5 M dan batubara murni. Hasil ini menegaskan bahwa peningkatan konsentrasi NaOH dalam proses hydrothermal carbonization memperkuat reorganisasi struktur karbon, sehingga meningkatkan kualitas termal dan potensi hydrochar sebagai bahan bakar padat alternatif.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa aktivasi hydrochar batok kelapa dengan NaOH 0,5 M dan 1

M secara signifikan memengaruhi karakteristik termodinamika pembakaran pada sistem co-firing dengan batubara sub-bituminous. Analisis TGA memperlihatkan peningkatan kestabilan termal dan pergeseran puncak dekomposisi ke suhu lebih tinggi seiring naiknya konsentrasi NaOH. Model Coats–Redfern menunjukkan kenaikan energi bebas Gibbs (ΔG) pada setiap tahap reaksi, dengan sampel NaOH 1 M memiliki kestabilan termal tertinggi, sementara NaOH 0,5 M menunjukkan ΔG awal lebih besar yang menandakan keteraturan transisi molekuler. Penurunan entalpi (ΔH) mengindikasikan proses eksotermik yang lebih efisien, sedangkan peningkatan entropi (ΔS) mencerminkan efisiensi konversi energi yang lebih baik dibanding batubara murni. Temuan ini menegaskan potensi hydrochar teraktivasi sebagai bahan bakar alternatif co-firing, meskipun penelitian lanjutan dengan variasi aktivator dan kondisi reaksi masih diperlukan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Ali Khan, B. H. Hameed, M. Raza Siddiqui, Z. A. Alothman, and I. H. Alsohaimi, "Physicochemical properties and combustion kinetics of food waste derived hydrochars," *J. King Saud Univ. - Sci.*, vol. 34, no. 4, 2022, doi: 10.1016/j.jksus.2022.101941.
- [2] S. Ruksathamcharoen *et al.*, "Thermogravimetric analysis of combustion characteristics and kinetics of hydrothermally treated and washed empty fruit bunch," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 12, no. March, pp. 977–986, 2021, doi: 10.1016/j.jksus.2022.101941.
- [3] A. Funke and F. Ziegler, "Hydrothermal carbonization of biomass: A summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering," *Biofuels, Bioprod. Biorefining*, vol. 4, no. 2, pp. 160–177, 2010, doi: 10.1002/bbb.198.

- [4] M. R. Amin and A. F. Alhikami, "Analisis Thermodinamika Pembakaran Pada Pencampuran Sub-bituminus Batu Bara Dengan Tempurung Kelapa," pp. 49–54.
- [5] G. K. Parshetti *et al.*, "Conversion of empty fruit bunches (EFBs) by hydrothermal carbonization towards hydrochar production," *Bioresour. Technol.*, vol. 271, no. March, pp. 9190–9204, 2021, doi: 10.1016/j.egy.2022.10.183.
- [6] G. Zhu *et al.*, "Characterization and pelletization of cotton stalk hydrochar from HTC and combustion kinetics of hydrochar pellets by TGA," *Fuel*, vol. 244, no. January, pp. 479–491, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.02.039.
- [7] J. Lei, Y. Wang, Q. Wang, S. Deng, and Y. Fu, "Evaluation of Kinetic and Thermodynamic Parameters of Pyrolysis and Combustion Processes for Bamboo Using Thermogravimetric Analysis," *Processes*, vol. 12, no. 11, 2024, doi: 10.3390/pr12112458.
- [8] Q. Lang *et al.*, "Co-hydrothermal carbonization of corn stalk and swine manure: Combustion behavior of hydrochar by thermogravimetric analysis," *Bioresour. Technol.*, vol. 271, no. September 2018, pp. 75–83, 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2018.09.100.
- [9] B. Y. Li *et al.*, "Comparison Kinetic Analysis between Coats-Redfern and Criado's Master Plot on Pyrolysis of Horse Manure," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 106, no. September, pp. 1273–1278, 2023, doi: 10.3303/CET23106213.
- [10] M. P. Maniscalco, M. Volpe, and A. Messineo, "Hydrothermal carbonization as a valuable tool for energy and environmental applications: A review," *Energies*, vol. 13, no. 15, 2020, doi: 10.3390/en13164098.
- [11] S. Mousa, I. Dubdub, M. A. Alfaiad, M. Y. Younes, and M. A. Ismail, "Characterization and Kinetic Study of Agricultural Biomass Orange Peel Waste Combustion Using TGA Data," *Polymers (Basel)*, vol. 17, no. 8, 2025, doi: 10.3390/polym17081113.
- [12] S. Poomsawat and W. Poomsawat, "Analysis of hydrochar fuel characterization and combustion behavior derived from aquatic biomass via hydrothermal carbonization process," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 27, no. March, 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.101255.
- [13] M. F. D. A. A. Faruq, and A. Ena, "SOLVEN LIMBAH AIR TAHU," pp. 23–27.
- [14] M. A. Abdelrahman, A. F. Alhikami, and E. Marlina, "A study of structural and elemental properties characterization of hydrochar derived from empty fruit bunches through hydrothermal carbonization," pp. 81–87.
- [15] P. Palmay, M. Mora, D. Barzallo, and J. C. Bruno, "Determination of thermodynamic parameters of polylactic acid by thermogravimetry under pyrolysis conditions," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 21, 2021, doi: 10.3390/app112110192.
- [16] X. Xing *et al.*, "Fuel Properties and Combustion Kinetics of Hydrochar Prepared by Hydrothermal Carbonization of Corn Straw," *BioResources*, vol. 11, no. 4, pp. 9190–9204, 2016, doi: 10.15376/biores.11.4.9190-9204.