

EFEKTIVITAS AKTIVASI 0.5M NaOH *HYDROCHAR* TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT PADA TERMODINAMIKA PEMBAKARAN *CO-FIRING* DENGAN BATUBARA SUB-BITUMINUS

Moch Yusuf Efendi¹, Ena Marlina², Akhmad Faruq Alhikami³

¹Teknik Mesin, Universitas Islam Malang

Email : 22101052008@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 bertujuan mengevaluasi pengaruh aktivasi 0,5 M NaOH pada *hydrochar* tandan kosong kelapa sawit (TKKS) terhadap performa termodinamika pembakaran *co-firing* dengan batubara sub-bituminus. *Hydrochar* diproduksi melalui *hydrothermal carbonization* (HTC) dan diaktivasi menggunakan larutan 0,5 M NaOH. Tiga sampel diuji: campuran 20% *hydrochar* teraktivasi + 80% batubara, 20% TKKS tanpa aktivasi + 80% batubara, serta 100% batubara sebagai kontrol. Analisis *Thermogravimetric Analysis* (TGA) pada suhu 25–1000 °C digunakan untuk mengidentifikasi degradasi massa dan parameter termodinamika (ΔG , ΔH , ΔS). Aktivasi NaOH menurunkan energi bebas Gibbs awal menjadi 106,81 kJ/mol, menunjukkan peningkatan spontanitas reaksi. Nilai ΔH positif (77,73 kJ/mol) mengindikasikan sifat endotermik, sementara ΔS negatif (-0,040 kJ/mol·K) mencerminkan peningkatan keteraturan sistem. Pada tahap lanjut, ΔG meningkat namun ΔS tetap stabil, menandakan kestabilan proses. Secara keseluruhan, aktivasi NaOH 0,5 M meningkatkan reaktivitas awal dan efisiensi energi pada proses *co-firing*.

Kata kunci: *hydrochar*, Tandan Kosong Kelapa Sawit, NaOH, *hydrothermal carbonization*, *Thermogravimetric Analysis*, termodinamika, *co-firing*, batubara.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the effect of 0.5 M NaOH activation on empty fruit bunch (EFB) hydrochar and its thermodynamic performance during co-firing with sub-bituminous coal. Hydrochar was produced via hydrothermal carbonization (HTC) and subsequently activated using 0.5 M NaOH. Three samples were examined: 20% activated hydrochar + 80% coal, 20% non-activated TKKS + 80% coal, and 100% coal as a control. Thermogravimetric Analysis (TGA) at 25–1000 °C was employed to determine mass degradation and thermodynamic parameters (ΔG , ΔH , ΔS). NaOH activation reduced the initial Gibbs free energy to 106.81 kJ/mol, indicating enhanced reaction spontaneity. A positive ΔH value (77.73 kJ/mol) confirmed the endothermic nature of the process, while a negative ΔS (-0.040 kJ/mol·K) reflected increased system order. In later stages, ΔG increased but ΔS remained controlled, suggesting process stability. Overall, 0.5 M NaOH activation improved initial reactivity and energy efficiency in biomass–coal co-firing.

Keywords: *hydrochar*, empty fruit bunch, NaOH, *hydrothermal carbonization*, *Thermogravimetric Analysis*, thermodynamics, *co-firing*, coal

PENDAHULUAN

Indonesia memiliki jumlah PLTU yang cukup besar dan menjadi sumber utama emisi karbon, terutama CO₂ yang dapat mencapai jutaan ton per tahun per unit berkapasitas 1 GW [1]. Emisi ini berkontribusi signifikan terhadap pemanasan global karena CO₂ berperan sebagai gas rumah kaca dominan [2].

Salah satu strategi yang terus dikembangkan adalah teknologi *co-firing* biomassa, yaitu pencampuran biomassa

dengan batubara dalam proses pembakaran tunggal, yang mampu menurunkan emisi sekaligus mengurangi konsumsi batubara [3] [4].

TKKS merupakan biomassa potensial di Indonesia karena kandungan lignoselulosanya yang tinggi dan dapat diolah melalui *hydrothermal carbonization* (HTC) untuk menghasilkan *Hydrochar* berenergi lebih tinggi [5]. Selama proses HTC, senyawa volatil dan teroksidasi terkonsentrasi dalam fase cair, sementara padatan mengalami peningkatan

kematangan karbon [6]. Temuan termodinamika terkait proses dehidrasi senyawa anorganik yang bersifat endotermik dan non-spontan memberikan dasar untuk memahami reaksi serupa pada aktivasi dan pembakaran *Hydrochar* TKKS [7]. Keterbaruan penelitian ini terletak pada penggunaan *Hydrochar* TKKS teraktivasi NaOH dalam *co-firing* dengan batubara sub-bituminus serta evaluasi sifat termodinamikanya. Kajian ini mendukung percepatan transisi energi rendah karbon dan pengembangan teknologi pembangkitan yang lebih berkelanjutan di Indonesia.

TINJAUAN PUSTAKA

Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) memiliki sifat fisik dan kimia yang mendukung pemanfaatannya sebagai bahan baku industri [8]. Komposisi utamanya terdiri atas selulosa 35–50%, hemiselulosa 15–25%, dan lignin 20–30%, sehingga menjadikan potensi untuk sumber bioenergi maupun material berbasis biomassa [9]. Kandungan air TKKS yang relatif rendah, sekitar 6,28%, turut meningkatkan stabilitas penyimpanan dan memfasilitasi proses pengolahan berikutnya [10]. Selain itu, abu hasil pembakarannya mengandung kalium tinggi, mencapai 48,25%, sehingga dapat diaplikasikan sebagai katalis heterogen pada proses transesterifikasi dalam produksi biodiesel [11].

Praperlakuan menggunakan NaOH efektif dalam memodifikasi struktur kimia TKKS. Konsentrasi NaOH 7–9% dilaporkan menghasilkan pulp berkualitas tinggi pada campuran TKKS dan batang pisang [12]. Dalam produksi bioetanol, penggunaan NaOH 5% pada suhu 120 °C mampu meningkatkan kemurnian selulosa secara signifikan [13].

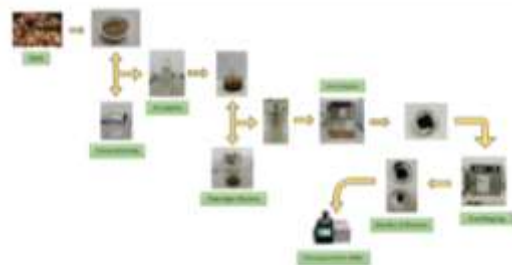
Pada biomassa EFB, pembentukan hidrochar pada 350 °C memberikan densitas energi lebih dari 27 MJ/kg ±68,5% dari energi awal, sehingga meningkatkan performa pembakaran dan peletisasi dalam sistem *co-firing* [14]. Proses HTC juga menurunkan kandungan oksigen dan hidrogen, menghasilkan padatan karbon

yang lebih stabil dan reaktif [15]. Aktivasi hidrochar TKKS dengan NaOH meningkatkan luas permukaan dan porositas, sehingga memperbaiki reaktivitas termal dan menurunkan emisi saat digunakan bersama batubara sub-bituminus [3].

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan batubara sub-bituminus dan biomassa tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang diaktivasi menggunakan larutan 0,5 M NaOH sebagai bahan dasar pembuatan *Hydrochar*.

Proses menggunakan metode *Hydrothermal Carbonization* (HTC) pada suhu 250 °C selama 8 jam untuk menghasilkan *Hydrochar*.



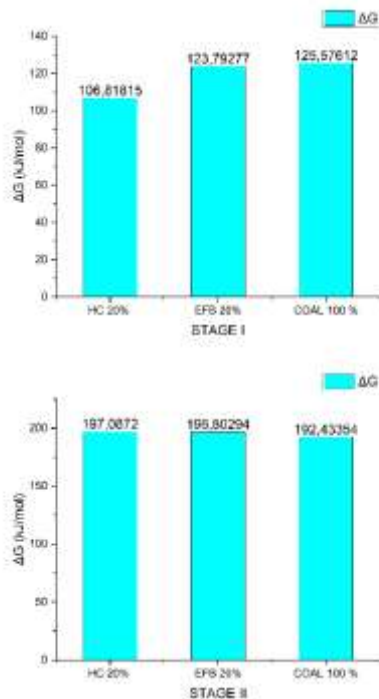
Gambar 1. Skema Instalasi Penelitian

Produk yang dihasilkan kemudian diaktivasi secara kimia dengan larutan 0,5 M NaOH. Terdapat tiga variasi komposisi, yaitu: 20% *Hydrochar* teraktivasi 0,5 M NaOH + 80% batubara sub-bituminus, 20% Biomassa EFB tanpa aktivasi + 80% batubara sub-bituminus, dan 100% batubara sub-bituminus.

Analisis pembakaran dilakukan menggunakan *Thermogravimetric Analysis* (TGA) pada rentang suhu 25 °C hingga 1000 °C, dengan laju pemanasan *heating rate* 10 °C/menit dan atmosfer reaktif berupa oksigen. Parameter utama yang dianalisis meliputi profil degradasi massa, karakteristik pembakaran, energi aktivasi, serta perubahan energi bebas Gibbs (ΔG), entalpi (ΔH), dan entropi (ΔS).

HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Gibbs Free Energy



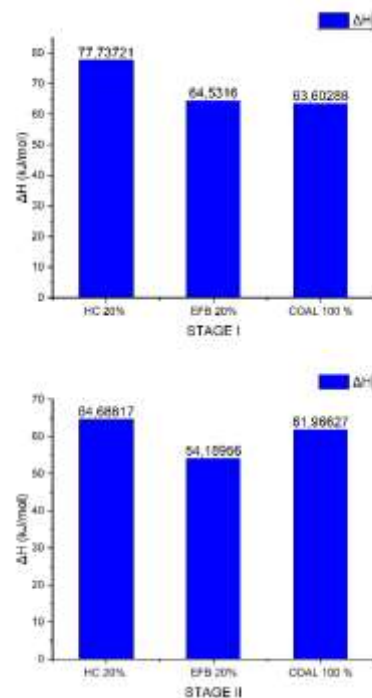
Gambar 2. Grafik Gibbs Free Energy

Pada *Stage I*, HC 20% memiliki nilai ΔG paling rendah sebesar 106,82 kJ/mol, sedangkan EFB 20% dan batubara masing-masing sebesar 123,79 kJ/mol dan 125,58 kJ/mol. Nilai ΔG yang lebih kecil pada HC 20% menunjukkan bahwa aktivasi NaOH mampu meningkatkan spontanitas reaksi awal dengan menurunkan hambatan energi bebas.

Pada *Stage II*, seluruh sampel mengalami peningkatan ΔG , menandakan bahwa proses oksidasi lanjutan memerlukan energi yang lebih besar. Nilai ΔG tertinggi terdapat pada HC 20% sebesar 197,09 kJ/mol, diikuti EFB 20% sebesar 196,80 kJ/mol, dan batubara sebesar 192,43 kJ/mol. Kenaikan tersebut menggambarkan bahwa reaksi pada tahap ini berlangsung kurang spontan akibat struktur karbon yang lebih kompleks.

Secara keseluruhan, aktivasi NaOH terbukti mampu mempercepat reaksi awal pembakaran melalui penurunan ΔG pada tahap awal, namun pada tahap berikutnya, proses tetap memerlukan energi tinggi untuk menyempurnakan pembakaran karbon padat

b. Enthalpy



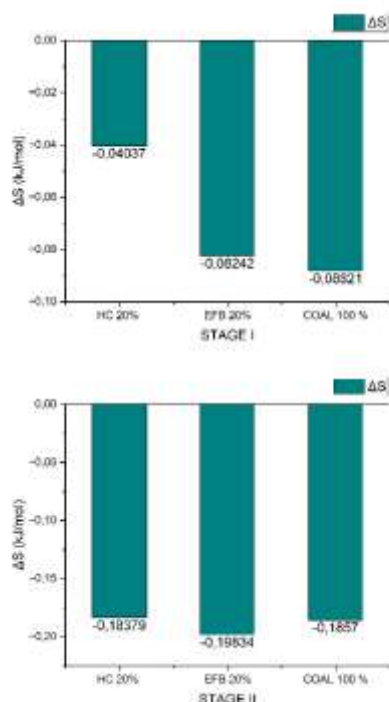
Gambar 3. Grafik Enthalpy

Pada *Stage I*, HC 20% memiliki ΔH tertinggi sebesar 77,74 kJ/mol, diikuti EFB 20% 64,53 kJ/mol dan COAL 100% 63,60 kJ/mol. Nilai ΔH yang tinggi pada HC 20% menunjukkan reaksi lebih endotermik akibat aktivasi NaOH yang meningkatkan jumlah gugus aktif dan mengubah struktur permukaan sehingga membutuhkan energi lebih besar untuk dekomposisi awal.

Pada *Stage II*, seluruh sampel mengalami penurunan ΔH , namun HC 20% tetap tertinggi 64,69 kJ/mol, diikuti COAL 100% 61,97 kJ/mol dan EFB 20% 54,19 kJ/mol. Penurunan ini menandakan proses dekomposisi berlangsung lebih efisien secara termal, meskipun HC 20% masih memerlukan energi tinggi untuk penguraian lignin dan karbon aromatik.

Secara keseluruhan, HC 20% menunjukkan kebutuhan energi terbesar pada kedua tahap reaksi. Hal ini disebabkan oleh efek aktivasi NaOH yang meningkatkan porositas serta membentuk ikatan kimia baru pada struktur karbon, sehingga energi termodinamika pembakaran meningkat.

c. Entropy



Gambar 4. Grafik *Entropy*

Pada *Stage I*, nilai ΔS masing-masing adalah $-0,04037$ kJ/mol untuk HC 20%, $-0,08242$ kJ/mol untuk EFB 20%, dan $-0,08821$ kJ/mol untuk Coal 100%. Nilai ΔS yang menunjukkan bahwa selama tahap awal pembakaran atau dekomposisi, sistem mengalami penurunan entropi akibat pelepasan senyawa volatil dan terbentuknya residu padat yang lebih stabil secara termal. Nilai ΔS HC 20% yang paling kecil lebih mendekati nol mengindikasikan bahwa perubahan keteraturan molekul pada sampel ini relatif lebih baik dibandingkan EFB maupun batubara. Kondisi ini berkaitan dengan adanya aktivasi NaOH yang berperan dalam memperbaiki keteraturan struktur pori serta meningkatkan kestabilan termal material, sehingga penurunan entropi pada tahap awal berlangsung tidak terlalu signifikan.

Pada *Stage II*, nilai ΔS menurun lebih tajam dengan nilai $-0,18379$ kJ/mol untuk HC 20%, $-0,19834$ kJ/mol untuk EFB 20%, dan $-0,18570$ kJ/mol untuk Coal 100%. Penurunan ΔS yang lebih besar menunjukkan bahwa tahap lanjutan ini melibatkan reaksi dekomposisi yang lebih kompleks, termasuk penguraian senyawa

karbon aromatik dan lignoselulosa menjadi struktur karbon yang lebih teratur.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa proses yang terjadi bersifat nonsontan secara entropik karena seluruh nilai ΔS bernilai negatif. Penurunan ΔS yang lebih besar pada *Stage II* dibandingkan *Stage I* menandakan bahwa reaksi pada tahap kedua lebih didominasi oleh pembentukan produk padat yang lebih stabil secara termodinamika. Aktivasi NaOH pada HC 20% memberikan pengaruh nyata terhadap kestabilan sistem dengan memperkecil perubahan entropi, yang menunjukkan peningkatan keteraturan struktur akibat modifikasi permukaan serta penguatan ikatan antar gugus fungsional selama proses termal.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis parameter termodinamika, sampel HC 20% menunjukkan kinerja paling efisien dalam proses pembakaran *co-firing*. Hal ini ditunjukkan oleh nilai ΔG terendah pada Stage I, yang mengindikasikan reaksi lebih menguntungkan secara energetik dibanding EFB 20% dan batubara 100%. Nilai ΔH yang tetap moderat mencerminkan kebutuhan energi yang stabil selama proses, sementara penurunan entropi (ΔS) yang lebih kecil menunjukkan perubahan sistem yang lebih terkendali. Secara keseluruhan, HC 20% memberikan keseimbangan terbaik antara spontanitas reaksi, stabilitas energi, dan keteraturan sistem, sehingga dapat dikategorikan sebagai bahan *co-firing* yang paling efisien.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. F. Rizki, H. Yulinawati, M. D. S. Silalahi, J. T. Lingkungan, F. Arsitektur, and T. Lingkungan, "Jurnal 1 - Pemecahan Masalah," no. 61, pp. 1–8, 2024.
- [2] Alimuddin, A. H. Tambunan, Machfud, and A. Novianto, "Analysis of CO₂ Emissions from Geothermal Power Plant Ulubelu and Its Contribution to Development of Electricity Generators in Lampung Province," *J. Pengelolaan*

- Sumberd. Alam dan Lingkung.*, vol. 9, no. 2, pp. 287–304, 2019, doi: 10.29244/jpsl.9.2.287-304.
- [3] A. P. NURYADI *et al.*, “Simulasi CFD Pengurangan CO₂ pada Co-firing Batubara dan Tandan Kosong Kelapa Sawit Menggunakan Model Pembakaran Non-Premixed,” *J. Teknol. Lingkung.*, vol. 24, no. 2, pp. 283–291, 2023, doi: 10.55981/jtl.2023.725.
- [4] A. I. Muslim, A. Kurniawan, W. D. Nurhidayat, and A. De Wibowo Muhammad Sidik, *Biomass Generator Analysis for Renewable Energy Transition with the Co-Firing Program at PLTU Pelabuhan Ratu*, no. Icontention 2023. Atlantis Press International BV, 2024. doi: 10.2991/978-94-6463-406-8_3.
- [5] I. Arisetyadhi, L. Kalsum, Y. Bow, A. Syarif, and F. Arifin, “Characterization of Empty Fruit Bunch of Palm Oil as Co-firing Biomass Feedstock,” vol. 7, no. 1, pp. 3–7, 2023.
- [6] 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.
- [7] N. Ç. A. A. Sevilay Çolak, “Eurasian journal of pulmonology,” vol. 3, no. Ek 1, pp. 2–166, 2020.
- [8] A. Termodinamika *et al.*, “1 , 2 , 3,” 2015.
- [9] L. H. Saputri, M. Hafiz, and M. Fadli, “Comparison of Fiber Characteristics of Emphy Fruit Bunches (EFB) after Steaming and Boiling Treatment in Pulp Synthesis Perbandingan Karakteristik Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) setelah Treatment Pengukusan dan Perebusan dalam Sintesis Pulp,” vol. 2, no. 1, pp. 43–56, 2023.
- [10] P. Studi, T. Kimia, U. A. Dahlan, K. Iii, and J. Supomo, “Karakteristik Torrefaksi dan Densifikasi Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit,” vol. 1, pp. 77–84, 2014.
- [11] R. A. D. P. Ananda, L. N. Komariah, N. P. Putri, and S. Arita, “Potensi dan karakteristik abu tandan kosong kelapa sawit sebagai katalis heterogen untuk produksi biodiesel Potential and characteristics of oil palm empty fruit bunches as a heterogeneous catalyst for biodiesel production,” vol. 29, no. 1, pp. 36–45.
- [12] S. Rizky Amelia, M. Yerizam, and E. Dewi, “Analisis Karakteristik Pulp Campuran Tandan Kosong Kelapa Sawit dan Pelepah Pisang dengan Pelarut NaOH,” *J. Pendidik. dan Teknol. Indones.*, vol. 1, no. 10, pp. 389–393, 2021, doi: 10.52436/1.jpti.91.
- [13] H. A. Permana, F. Delvitasari, and W. R. Hartari, “Pengaruh Konsentrasi NaOH dan Suhu Delignifikasi pada Kandungan Lignoselulosa Tandan Kosong Kelapa Sawit (Effect of NaOH Concentration and Delignification Temperature on Lignocellulose Content of Empty Fruit Bunches of Oil Palm),” vol. 12, no. 1, pp. 51–58, 2024.
- [14] G. K. Parshetti, S. Kent Hoekman, and R. Balasubramanian, “Chemical, structural and combustion characteristics of carbonaceous products obtained by hydrothermal carbonization of palm empty fruit bunches,” *Bioresour. Technol.*, vol. 135, pp. 683–689, 2013, doi: 10.1016/j.biortech.2012.09.042.
- [15] J. R. H. Panjaitan, “Panas Pretreatment Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Sodium Hidroksida dan Asam Fosfat,” *J. Tek. Kim. dan Lingkung.*, vol. 5, no. 2, pp. 155–163, 2021, doi: 10.33795/jtkl.v5i2.216.