

ANALISIS KARAKTERISTIK PEMBAKARAN CAMPURAN *HYDROCHAR* TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT TERAKTIVASI NaOH DENGAN BATU BARA *SUB-BITUMINUS* PADA PROSES *CO-FIRING*

Much Nizar zirmi¹, Ena Marlina², Akhmad Faruq Alhikami³

¹Teknik Mesin, Universitas Islam Malang

Email : 22101052017@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 menganalisis karakteristik dan kinetika pembakaran campuran *hydrochar* tandan kosong kelapa sawit (TKKS) teraktivasi NaOH dengan batu bara *sub-bituminus*, serta membandingkannya dengan TKKS 20% tanpa aktivasi dan batu bara 100%. *Hydrochar* disintesis melalui metode *Hydrothermal Carbonization* (HTC) pada suhu 210 °C selama 8 jam dengan variasi aktivasi NaOH 0,5 M dan 1 M. Analisis pembakaran dilakukan menggunakan *Thermogravimetric Analysis* (TGA/DTG) untuk memperoleh profil degradasi massa, temperatur penyalan, temperatur puncak pembakaran, temperatur *burnout*, serta nilai *ignition index* dan *combustion index*. Parameter kinetika ditentukan menggunakan metode *Coats–Redfern*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *hydrochar* teraktivasi NaOH memiliki reaktivitas pembakaran lebih baik dibandingkan TKKS tanpa aktivasi dan coal 100%, ditandai dengan temperatur penyalan dan energi aktivasi yang lebih rendah. *Hydrochar* teraktivasi NaOH 1 M menunjukkan performa pembakaran paling optimal dan berpotensi sebagai bahan bakar *co-firing* PLTU.

Kata kunci: *co-firing*, *hydrochar*, TKKS, karakteristik pembakaran, kinetika pembakaran.

ABSTRACT

This study aims to analyze the characteristics and combustion kinetics of NaOH-activated oil palm empty fruit bunch (OPEFB) hydrochar mixture with sub-bituminous coal, and compare it with 20% OPEFB without activation and 100% coal. Hydrochar was synthesized through the Hydrothermal Carbonization (HTC) method at 210 °C for 8 hours with NaOH activation variations of 0.5 M and 1 M. Combustion analysis was carried out using Thermogravimetric Analysis (TGA/DTG) to obtain the mass degradation profile, ignition temperature, peak combustion temperature, burnout temperature, and ignition index and combustion index values. Kinetic parameters were determined using the Coats–Redfern method. The results showed that NaOH-activated hydrochar had better combustion reactivity than unactivated OPEFB and 100% coal, characterized by lower ignition temperature and activation energy. 1 M NaOH-activated hydrochar showed the most optimal combustion performance and has the potential as a co-firing fuel for coal-fired power plants.

Keywords: *co-firing*, *hydrochar*, OPEFB, combustion characteristics, combustion kinetics.

PENDAHULUAN

Pemanfaatan batu bara sebagai sumber utama energi listrik pada PLTU masih menimbulkan permasalahan

lingkungan akibat emisi gas rumah kaca. Oleh karena itu, penerapan teknologi *co-firing* biomassa menjadi salah satu strategi untuk mendukung bauran energi terbarukan dan menekan emisi karbon [1][2]. Limbah

kelapa sawit, khususnya tandan kosong kelapa sawit (TKKS), memiliki potensi besar sebagai bahan bakar alternatif karena ketersediaannya yang melimpah di Indonesia dan telah mulai diaplikasikan pada sistem *co-firing* PLTU [3][4].

Namun, pemanfaatan TKKS secara langsung masih menghadapi kendala berupa kadar air tinggi dan karakteristik pembakaran yang kurang stabil [5][6]. Salah satu metode pra-perlakuan yang dikembangkan untuk meningkatkan kualitas biomassa adalah *Hydrothermal Carbonization* (HTC), yang mampu menghasilkan *hydrochar* dengan sifat termal lebih baik dan mendekati karakter batu bara [7][8]. Aktivasi kimia menggunakan NaOH juga dilaporkan dapat meningkatkan reaktivitas dan performa pembakaran *hydrochar* [9][10].

Analisis karakteristik pembakaran *hydrochar* dan campurannya dengan batu bara umumnya dilakukan menggunakan *Thermogravimetric Analysis* (TGA/DTG) untuk mengevaluasi temperatur penyalaan, laju degradasi massa, *ignition index*, *combustion index*, serta energi aktivasi pembakaran [11][12].

TINJAUAN PUSTAKA

Teknologi *co-firing* biomassa dengan batu bara telah banyak dikaji sebagai solusi transisi energi untuk menurunkan emisi karbon pada PLTU. Berbagai penelitian menyatakan bahwa *co-firing* mampu meningkatkan bauran energi terbarukan tanpa memerlukan modifikasi besar pada sistem pembangkit yang ada [13]. Implementasi *co-firing* berbasis biomassa kelapa sawit, seperti cangkang dan TKKS, menunjukkan potensi teknis yang baik pada sistem pembakaran *circulating fluidized bed* maupun *pulverized coal boiler* [6].

TKKS sebagai limbah biomassa memiliki keterbatasan berupa kadar air tinggi, kandungan hemiselulosa besar, serta stabilitas pembakaran yang rendah jika digunakan secara langsung [5]. Oleh karena itu, berbagai metode pra-perlakuan dikembangkan, seperti torefaksi dan *Hydrothermal Carbonization* (HTC), untuk

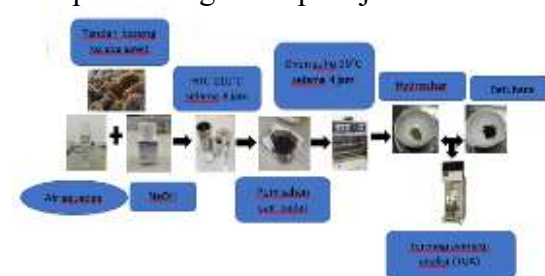
meningkatkan kualitas bahan bakar biomassa [7]. Aktivasi kimia menggunakan NaOH dilaporkan mampu memperbaiki struktur dan reaktivitas biomassa dengan mengubah komponen lignoselulosa serta meningkatkan performa pembakaran [10].

Karakteristik dan kinetika pembakaran biomassa, biochar, maupun *hydrochar* umumnya dianalisis menggunakan *Thermogravimetric Analysis* (TGA/DTG) untuk menentukan temperatur penyalaan, laju degradasi massa, *ignition index*, *combustion index*, serta energi aktivasi pembakaran [14].

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *eksperimental* untuk menganalisis karakteristik dan kinetika pembakaran campuran *hydrochar* tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dengan batu bara *sub-bituminus* pada sistem *co-firing*.

Bahan baku berupa TKKS dikeringkan dan dipreparasi, kemudian disintesis menjadi *hydrochar* menggunakan metode *Hydrothermal Carbonization* (HTC) pada suhu 210 °C selama 8 jam. Aktivasi kimia dilakukan menggunakan larutan NaOH dengan variasi konsentrasi 0,5 M dan 1 M. Setelah proses HTC, *hydrochar* dinetralkan hingga pH mendekati netral, dikeringkan kembali, dan disiapkan sebagai sampel uji.



Gambar 1. Skema Instalasi Penelitian

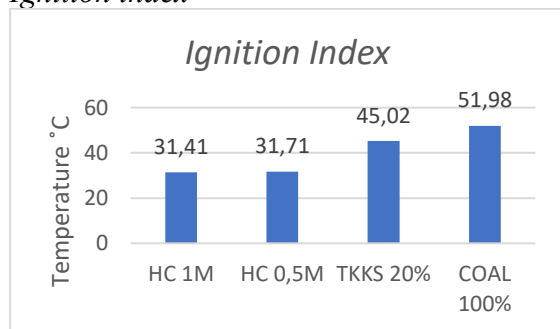
Variasi sampel penelitian meliputi *hydrochar* TKKS teraktivasi NaOH 0,5 M dan 1 M yang dicampur dengan batu bara *sub-bituminus*, serta sampel pembandingan berupa campuran TKKS 20% tanpa aktivasi dan batu bara 100%. Seluruh sampel dianalisis menggunakan *Thermogravimetric Analysis* (TGA/DTG) untuk memperoleh profil degradasi massa

selama proses pembakaran. Parameter yang diamati meliputi temperatur penyalaan, temperatur puncak pembakaran, temperatur *burnout*, serta laju kehilangan massa.

Analisis data dilakukan dengan menghitung *ignition index* dan *combustion index* untuk mengevaluasi kemudahan penyalaan dan stabilitas pembakaran. Selain itu, parameter kinetika pembakaran ditentukan melalui perhitungan energi aktivasi menggunakan metode *Coats-Redfern*. Hasil analisis dibandingkan antar sampel untuk mengevaluasi pengaruh aktivasi NaOH dan potensi hydrochar TKKS sebagai bahan bakar alternatif pada sistem *co-firing* PLTU.

HASIL DAN PEMBAHASAN

a. *Ignition index*



Gambar 2. Grafik *Ignition index*

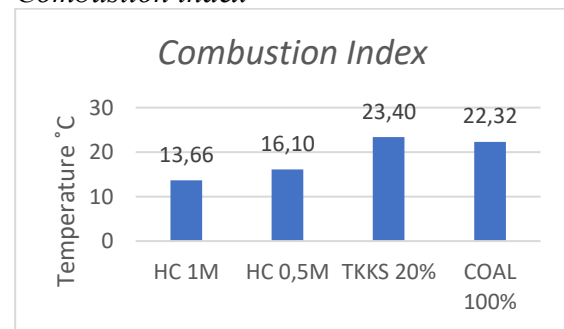
Berdasarkan grafik *ignition index*, perbedaan nilai indeks penyalaan menunjukkan variasi kemudahan awal pembakaran pada setiap sampel. Sampel TKKS 20% : coal 80% memiliki nilai *ignition index* yang relatif tinggi, menandakan karakteristik penyalaan yang lebih mudah dan cepat. Kondisi ini dipengaruhi oleh tingginya kandungan *volatile matter* pada biomassa TKKS yang mempercepat pelepasan gas mudah terbakar pada suhu rendah. Sebaliknya, sampel *hydrochar* teraktivasi NaOH 1 M dan 0,5 M menunjukkan nilai *ignition index* yang lebih rendah, mencerminkan stabilitas termal yang lebih baik akibat berkurangnya fraksi volatil reaktif selama proses HTC dan aktivasi kimia.

Perbedaan konsentrasi NaOH juga memengaruhi nilai *ignition index*. *Hydrochar* dengan aktivasi NaOH 1 M memiliki nilai indeks penyalaan paling

rendah dibandingkan sampel lainnya, yang menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi aktivator memperkuat struktur karbon aromatik dan menurunkan reaktivitas awal pembakaran. *Hydrochar* 0,5 M menunjukkan nilai menengah, mengindikasikan keseimbangan antara stabilitas termal dan kemudahan penyalaan.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa aktivasi NaOH dan proses HTC mampu mengontrol karakteristik penyalaan bahan bakar. *Hydrochar* teraktivasi memiliki perilaku pembakaran yang lebih stabil dibandingkan TKKS tanpa aktivasi, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi *co-firing* yang membutuhkan kestabilan dan keamanan operasional.

b. *Combustion index*



Gambar 3. Grafik *Combustion index*

Berdasarkan grafik *combustion index*, terlihat perbedaan kinerja pembakaran yang signifikan pada setiap sampel. Sampel TKKS 20% : coal 80% menunjukkan nilai *combustion index* tertinggi, yang mengindikasikan reaktivitas pembakaran yang sangat baik. Nilai ini dipengaruhi oleh kandungan *volatile matter* biomassa yang tinggi, sehingga proses oksidasi berlangsung cepat dan intens dalam rentang suhu pembakaran. Kondisi tersebut mencerminkan efisiensi pembakaran yang tinggi, namun dengan kecenderungan kestabilan termal yang lebih rendah.

Sampel *hydrochar* teraktivasi NaOH 0,5 M memiliki nilai *combustion index* lebih tinggi dibandingkan *hydrochar* 1 M, yang menunjukkan laju pembakaran yang lebih reaktif. Hal ini disebabkan oleh struktur karbon yang belum sepenuhnya terkondensasi serta masih tersedianya

fraksi volatil reaktif. Sebaliknya, *hydrochar* teraktivasi NaOH 1 M menunjukkan nilai [1] *combustion index* terendah, yang menandakan pembakaran berlangsung lebih lambat dan stabil akibat meningkatnya derajat karbonisasi dan keteraturan struktur karbon.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan [2] konsentrasi NaOH pada proses aktivasi *hydrochar* menurunkan *combustion index* namun meningkatkan kestabilan pembakaran. *Hydrochar* teraktivasi, khususnya 1 M, memiliki karakter pembakaran yang lebih terkendali sehingga [3] berpotensi lebih aman dan stabil untuk aplikasi *co-firing* jangka panjang pada PLTU.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis karakteristik pembakaran dan parameter kinetika, dapat disimpulkan bahwa aktivasi *hydrochar* TKKS menggunakan NaOH memberikan pengaruh signifikan terhadap perilaku [4] pembakaran pada sistem *co-firing* dengan batubara *sub-bituminus*. *Hydrochar* teraktivasi NaOH 1 M menunjukkan kestabilan termal yang lebih baik, ditandai [5] dengan nilai *ignition index* dan *combustion index* yang lebih rendah yang mengindikasikan kemudahan reaksi oksidasi dan pembakaran yang lebih terkendali. Sebaliknya, TKKS 20% tanpa aktivasi memiliki reaktivitas pembakaran yang lebih tinggi, tercermin dari nilai *combustion index* yang lebih besar, namun [6] cenderung kurang stabil. Sementara itu, *hydrochar* 0,5 M menunjukkan karakter pembakaran menengah sebagai hasil keseimbangan antara kandungan volatil dan struktur karbon. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa peningkatan konsentrasi NaOH pada proses aktivasi dan perlakuan HTC mampu mengoptimalkan reaktivitas serta kestabilan pembakaran [7] *hydrochar*, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi dan keamanan operasional dalam aplikasi *co-firing* pada pembangkit listrik tenaga uap berbasis batubara.

DAFTAR PUSTAKA

- Y. Xu, K. Yang, J. Zhou, and G. Zhao, "Coal-Biomass Co-Firing Power Generation Technology: Current Status, Challenges and Policy Implications," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 9, 2020.
- M. S. Roni, S. Chowdhury, S. Mamun, M. Marufuzzaman, W. Lein, and S. Johnson, "Biomass Co-Firing Technology with Policies, Challenges, and Opportunities: A Global Review," 2017.
- A. Indra, F. Haryadi, and I. Haryani, "Analisis Pengujian Co-Firing Biomassa Cangkang Kelapa Sawit Pada PLTU Circulating Fluidized Bed (CFB) Sebagai Upaya Bauran Energi Terbarukan," *PT. PLN (Persero) Pusat Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistrikan*, vol. 24, no. 2, pp. 61–66, 2022.
- A. V. Febriani, F. F. Hanum, and A. sdan Tantangan Biomassa Sebagai Bahan Bakar pada PLTU dan PLTBm," 2024.
- A. Irawan, T. Riadz, and Nurmalisa, "PROSES TOREFAKSI TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT UNTUK KANDUNGAN HEMISELULOSA DAN UJI KEMAMPUAN PENYERAPAN AIR," vol. 15, no. 3, pp. 190–195, 2015.
- W. Chaeruni, Hardiyanto, and Cahyadi, "Karakteristik Pembakaran Campuran Batubara dan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) Menggunakan Analisis Termogravimetri Deferensial Temperatur (TG-DTA)," *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, vol. 8, no. 3, pp. 1629–1638, 2024.
- 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.
- [8] J. Fang, L. Zhan, Y. S. Ok, and B. Gao, “Minireview of potential applications of hydrochar derived from hydrothermal carbonization of biomass,” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 57, pp. 15–21, 2018.
- [9] Muryanto, Y. Sudiyani, and H. Abimnyu, “Optimization of NaOH Alkali Pretreatment of Oil Palm Empty Fruit Bunch for Bioethanol,” *Terap.Indones*, vol. 18, no. 1, pp. 27–35, 2016.
- [10] S. Ruksathamcharoen, T. Chuenyam, M. W. Ajiwibowo, and K. Yoshikawa, “Thermogravimetric analysis of combustion characteristics and kinetics of hydrothermally treated and washed empty fruit bunch,” *Biofuels*, vol. 12, no. 8, pp. 977–986, 2021.
- [11] L. Tang *et al.*, “Thermogravimetric Analysis of the Combustion Characteristics and Combustion Kinetics of Coals Subjected to Different Chemical Demineralization Processes,” *ACS Omega*, vol. 7, no. 16, pp. 13998–14008, 2022.
- [12] K. Yang, J. Sun, H. Liu, W. Yang, and L. Dong, “Study on the Thermogravimetric Kinetics of Dehydrated Sewage Sludge Regulated by Cationic Polyacrylamide and Sawdust,” *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 10, 2023.
- [13] H. Zhang and C. Yu, “Experimental Study on Co-Firing of Coal and Biomass in Industrial-Scale Circulating Fluidized Bed Boilers,” *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 14, 2025.
- [14] I. S. Pansawati, Y. Agustin, and Y. Ahda, “KINETIC AND COMBUSTION CHARACTERISTICS OF OIL PALM EMPTY FRUIT BUNCH BIOCHAR USING THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS,” *National Research and Innovation Agency*, vol. 13, no. 2, pp. 128–139, 2024.