

ANALISIS KARAKTERISTIK PEMBAKARAN *HYDROCHAR* DARI TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT DENGAN AKTIVASI *NaOH* DAN BATUBARA *SUB-BITUMINOUS*

Akbar Abdul Aziz¹, Akhmad Faruq Alhikami² Ena Marlina³

¹ Teknik Mesin, Universitas Islam Malang
e-mail : 22101052012@unisma.ac.id

² Teknik Mesin, Universitas Islam Malang
e-mail : alhikami@unisma.ac.id

³ Teknik Mesin, Universitas Islam Malang
e-mail : ena.marlina@unisma.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis pengaruh aktivasi *NaOH* 0,5 M pada *hydrochar* tandan kosong kelapa sawit (TKKS) terhadap karakteristik pembakaran dan energi aktivasi dalam aplikasi *co-firing* dengan batubara sub-bituminus. Sampel *hydrochar* teraktivasi (HC 20%), TKKS tanpa aktivasi (EFB 20%), dan batubara murni diuji menggunakan Thermogravimetric Analysis (TGA). Hasil menunjukkan bahwa aktivasi *NaOH* meningkatkan kestabilan termal *hydrochar* dengan profil degradasi dua tahap dan *weight loss* 94,12%. HC 20% memiliki *Ti* 267,73°C, *Tp* 447,64°C, dan *Tb* 537,04°C. Meskipun nilai Ignition Index dan Combustion Index lebih rendah, energi aktivasi pada tahap kedua pembakaran menurun signifikan, menunjukkan peningkatan reaktivitas termal. Aktivasi *NaOH* terbukti mendukung efisiensi pembakaran biomassa untuk aplikasi *co-firing* di PLTU.

Kata Kunci: *Hydrochar, aktivasi NaOH, TKKS, TGA, karakteristik pembakaran, energi aktivasi, co-firing.*

ABSTRACT

This study analyzes the effect of 0.5 M NaOH activation on hydrochar derived from oil palm empty fruit bunches (EFB) in relation to combustion characteristics and activation energy for co-firing with sub-bituminous coal. Three samples—NaOH-activated hydrochar (HC 20%), non-activated EFB (EFB 20%), and pure coal—were examined using Thermogravimetric Analysis (TGA). Results show that NaOH activation improves thermal stability, producing a two-stage degradation profile with a 94.12% weight loss. HC 20% recorded an ignition temperature of 267.73°C, a peak temperature of 447.64°C, and a burnout temperature of 537.04°C. Although the Ignition Index and Combustion Index were lower than those of EFB and coal, the activation energy during the second combustion stage decreased significantly, indicating enhanced thermal reactivity. Overall, NaOH activation strengthens hydrochar's potential as an efficient co-firing fuel for coal-fired power plants.

Keywords: *Hydrochar, NaOH activation, EFB, TGA, combustion characteristics, activation energy, co-firing.*

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi yang terus meningkat mendorong upaya diversifikasi sumber energi di Indonesia, termasuk pemanfaatan biomassa sebagai bahan bakar alternatif pada sistem *co-firing* di pembangkit listrik berbahan bakar batubara. Salah satu limbah biomassa yang sangat melimpah di Indonesia adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS), namun karakter TKKS mentah (kadar air tinggi, kandungan volatil yang besar, dan struktur lignoselulosa kompleks) menuntut perlakuan pra-pengolahan untuk

meningkatkan performa pembakarannya .[1][2] [3]

Hydrothermal Carbonization (HTC) muncul sebagai metode efektif untuk meningkatkan kualitas bahan bakar biomassa dengan menghasilkan *hydrochar* yang memiliki kestabilan termal lebih baik, kandungan karbon tetap yang meningkat, serta nilai kalor yang lebih mendekati batubara muda. Hasil HTC umumnya menurunkan fraksi volatil dan meningkatkan fraksi fixed carbon, sehingga memengaruhi suhu penyalaan, suhu puncak

pembakaran, dan suhu burnout sampel.[4][5][6]

aktivasi kimia—khususnya dengan basa kuat seperti NaOH—dilaporkan dapat memodifikasi struktur permukaan hydrochar (meningkatkan porositas dan luas permukaan serta menciptakan situs aktif), yang berdampak pada peningkatan reaktivitas oksidasi karbon pada suhu operasi pembakaran. Perubahan mikrostruktur ini relevan untuk aplikasi *co-firing* karena memengaruhi kinetika pembakaran dan efisiensi pembakaran campuran biomassa–batubara.[7]

Untuk mengkuantifikasi efek perlakuan HTC dan aktivasi NaOH terhadap sifat pembakaran, analisis termogravimetri (TGA) menjadi alat utama karena memberikan informasi kuantitatif tentang profil degradasi massa, parameter termal (T_i , T_p , T_b), serta parameter kinetika termasuk energi aktivasi (E_a) pada tahapan devolatilisasi dan oksidasi karbon tetap. Kajian kinetika dari berbagai studi menunjukkan bahwa E_a dapat bervariasi signifikan tergantung perlakuan termal dan kimia, laju pemanasan, dan komposisi sampel; penurunan E_a pada tahap oksidasi biasanya dikaitkan dengan peningkatan reaktivitas hydrochar.[8][9][10][11]

Beberapa studi aplikasi dan studi kasus lokal menegaskan potensi TKKS sebagai sumber bahan bakar untuk *co-firing* dari sisi teknis dan ekonomi, selama kualitas bahan bakar ditingkatkan melalui proses seperti HTC dan aktivasi kimia. Analisis TGA pada kombinasi hydrochar–batubara menunjukkan interaksi termal yang dapat berpengaruh pada penyalaan dan pembakaran campuran, sehingga penting untuk mengukur parameter kinetika.[12][13][8][14][15]

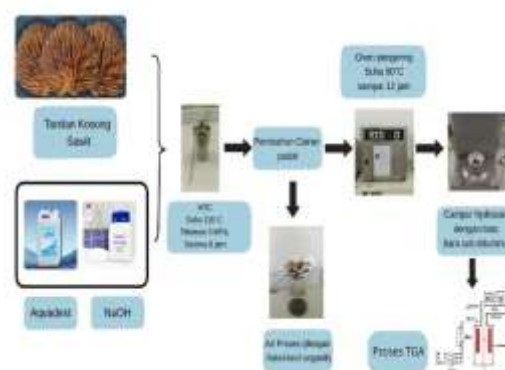
Berdasarkan kajian pustaka tersebut, penelitian ini difokuskan untuk mengukur dan menganalisis energi aktivasi hydrochar TKKS yang diaktivasi dengan NaOH (0,5 M) menggunakan TGA[16]. serta membandingkannya dengan EFB tanpa aktivasi dan batubara sebagai acuan. Tujuan utamanya adalah menentukan bagaimana

aktivasi NaOH memengaruhi kinetika pembakaran—khususnya nilai E_a pada dua tahapan utama—sebagai indikator kelayakan hydrochar untuk aplikasi *co-firing* di PLTU.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang dimana pengamatan secara langsung. melakukan pengamatan langsung terhadap objek yang diteliti 20% TKKS+80% Batu bara dengan aktivasi 0,5 m NaOH. Proses pengujian HTC selama 8 jam. Variabel yang diamati adalah karakteristik pembakaran dan energi aktivasi.

SKEMA INSTALASI PENELITIAN



Gambar 1. Skema Instalasi Proses HTC

Skema ini menunjukkan proses Hydrothermal Carbonization (HTC) untuk mengolah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) menjadi hydrochar dengan aktivasi NaOH 0.5 M. Bahan baku yang digunakan yakni NaOH sebagai katalis basa dan TKKS sebagai biomassa. Proses HTC, Biomassa dipanaskan dengan suhu (180–210°C).

Metode Coats redfern

Metode Coats–Redfern digunakan untuk menghitung energi aktivasi (E_a) berdasarkan data TGA melalui pendekatan integral dari persamaan kinetika. Metode ini memungkinkan pemisahan dua tahap pembakaran biomassa, yaitu devolatilisasi dan oksidasi karbon tetap, sehingga E_a tiap tahap dapat dihitung secara spesifik. Dengan memplot hubungan $\ln(g(\alpha)/T^2)$ terhadap $1/T$, kemiringan garis regresi digunakan untuk memperoleh nilai E_a .

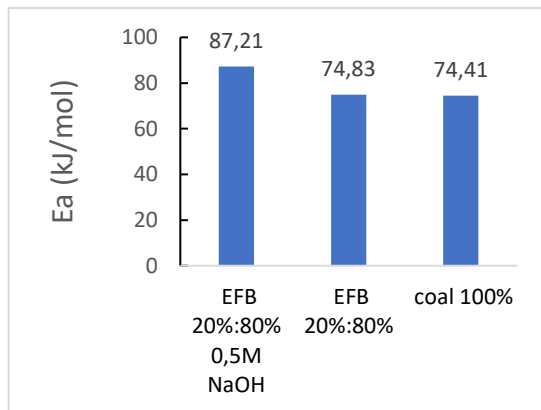
Pada penelitian ini, metode Coats–Redfern menunjukkan bahwa aktivasi NaOH menurunkan energi aktivasi pada tahap oksidasi, yang menandakan peningkatan reaktivitas pembakaran hydrochar TKKS.

$$\ln \left| \frac{g(\alpha)}{T^2(K)} \right| = \ln \left| \frac{AR}{\beta E_\alpha} \right| \ln \left(1 - \frac{2RT}{E_\alpha} \right) - \frac{E_\alpha}{RT}$$

Diasumsikan bahwa $\frac{2RT}{E_\alpha} \ll 1$, maka nilai tersebut dapat diabaikan sehingga persamaan Coats–Redfern menjadi berikut:[4]

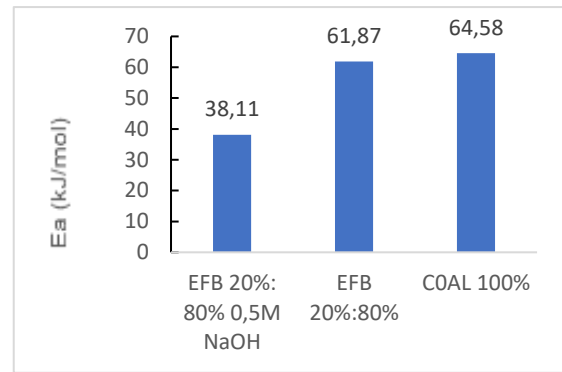
$$\ln \left| \frac{g(\alpha)}{T^2(K)} \right| = \ln \left| \frac{AR}{\beta E_\alpha} \right| - \frac{E_\alpha}{RT}$$

HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 2. Grafik Energi aktivasi stage 1

HC 20% menunjukkan nilai energi aktivasi tertinggi pada Stage 1, yaitu 87,21 kJ/mol, menandakan bahwa aktivasi NaOH menghasilkan struktur hydrochar yang lebih stabil pada tahap pemanasan awal. Nilai ini lebih tinggi dibanding EFB 20% dan coal, yang berarti proses awal penguapan volatil pada hydrochar teraktivasi memerlukan energi lebih besar. Hal ini dapat terjadi akibat penguatan struktur karbon dan pengurangan komponen volatil setelah proses HTC-NaOH.



Gambar 3. Grafik Energi aktivasi stage 2
Pada Stage 2, HC 20% memiliki energi aktivasi paling rendah dibanding seluruh sampel, yaitu 38,11 kJ/mol. Nilai ini menunjukkan bahwa karbon tetap pada hydrochar teraktivasi lebih mudah teroksidasi dibanding EFB 20% dan batubara. Penurunan energi aktivasi ini menandakan peningkatan reaktivitas pembakaran, yang merupakan efek positif dari aktivasi NaOH yang memperbesar pori dan meningkatkan situs aktif.

Penurunan Ea Stage 2 merupakan indikator bahwa hydrochar teraktivasi bersifat lebih reaktif pada suhu tinggi, sehingga sangat cocok digunakan sebagai bahan bakar campuran pada proses *co-firing* di PLTU.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis energi aktivasi pembakaran biomassa, hydrochar TKKS yang diaktivasi NaOH 0,5 M menunjukkan performa paling baik pada tahap oksidasi karbon dengan energi aktivasi terendah, yaitu 38,11 kJ/mol. Hal ini menunjukkan bahwa hydrochar teraktivasi lebih reaktif dan mudah terbakar pada suhu tinggi dibanding EFB 20% atau TKKS mentah. Dengan demikian, HC 20% mempunyai potensi tinggi sebagai bahan bakar *co-firing* pada PLTU.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] 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.
- [2] Y. C. Dwiaji, "Analisis Pengaruh Co-Firing Biomassa Terhadap Kinerja Peralatan Boiler PLTU Batubara Unit 1 PT. XYZ," *J. Appl. Mech. Eng. Renew. Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 7–15, 2023, doi: 10.52158/jamere.v3i1.445.
- [3] A. V. Febriani, F. F. Hanum, A. Rahayu, and B. Setya, "THE IMPACT OF CARBONIZATION TEMPERATURE ON THE QUALITY OF EMPTY FRUIT BUNCH CHARCOAL AND PALM KERNEL CHARCOAL FOR CO-FIRING APPLICATION," vol. 15, pp. 28–39, 2025.
- [4] C. Călin, E. E. Sîrbu, M. Tănase, R. György, D. R. Popovici, and I. Banu, "A Thermogravimetric Analysis of Biomass Conversion to Biochar: Experimental and Kinetic Modeling," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 21, pp. 1–23, 2024, doi: 10.3390/app14219856.
- [5] M. A. Qodir and A. F. Alhikami, "Analisis profil degradasi massa pada hydrochar menggunakan teknik Hydrothermal Carbonization dari limbah tandan kosong sawit," 2025.
- [6] J. Petrović *et al.*, "Hydrothermal Carbonization of Waste Biomass: A Review of Hydrochar Preparation and Environmental Application," *Processes*, vol. 12, no. 1, 2024, doi: 10.3390/pr12010207.
- [7] F. Zhou *et al.*, "Efficient removal of methylene blue by activated hydrochar prepared by hydrothermal carbonization and NaOH activation of sugarcane bagasse and phosphoric acid," *RSC Adv.*, vol. 12, no. 3, pp. 1885–1896, 2022, doi: 10.1039/d1ra08325b.
- [8] E. Garcia, I. F. Ejim, and H. Liu, "Thermogravimetric analysis of co-combustion of a bituminous coal and coffee industry by-products," *Thermochim. Acta*, vol. 715, no. March, p. 179296, 2022, doi: 10.1016/j.tca.2022.179296.
- [9] M. A. Islam, G. Kabir, M. Asif, and B. H. Hameed, "Combustion kinetics of hydrochar produced from hydrothermal carbonisation of Karanj (*Pongamia pinnata*) fruit hulls via thermogravimetric analysis," *Bioresour. Technol.*, vol. 194, pp. 14–20, 2015, doi: 10.1016/j.biortech.2015.06.094.
- [10] I. S. Pansawati, Y. Agustin, and Y. Ahda, "Kinetic and combustion characteristics of oil palm empty fruit bunch biochar using thermogravimetric analysis," *J. Teknosains*, vol. 13, no. 2, p. 128, 2024, doi: 10.22146/teknosains.89413.
- [11] L. Dong, X. Huang, J. Ren, L. Deng, and Y. Da, "Thermogravimetric Assessment and Differential Thermal Analysis of Blended Fuels of Coal, Biomass and Oil Sludge," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 19, 2023, doi: 10.3390/app131911058.
- [12] D. Erivianto, A. Dani, and H. Gunawan, "Pengolahan Biomassa Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Bahan Bakar Pembangkit Listrik Tenaga Uap," *J. Indones. Sos. Teknol.*, vol. 3, no. 1, pp. 162–171, 2022, doi: 10.36418/jist.v3i1.337.
- [13] M. F. Praevia and W. Widayat, "Analisis Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Cofiring pada PLTU Batubara," *J. Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 3, no. 1, pp. 28–37, 2022, doi: 10.14710/jebt.2022.13367.
- [14] 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, doi: 10.1080/17597269.2018.1564482.
- [15] A. Termodinamika *et al.*, "1 , 2 , 3,"

- 2015.
- [16] P. Attasophonwattana, J. Pukrushpan, and C. Areeprasert, "Thermal Decomposition and Kinetic Study of Empty Fruit Bunch Derived Hydrochar Produced from Hydrothermal Carbonization and Washing Processes," no. June, pp. 15–21, 2021.