

PENGARUH VARIASI CO-SOLVENT HYDROTHERMAL CARBONIZATION LIMBAH TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT TERHADAP KARAKTERISTIK TERMODINAMIKA PEMBAKARAN

Achmad Nur Ihsan M Z¹, Ena Marlina^{1,2}, Akhmad Faruq Alhikami^{1,2}

¹program studi Teknik mesin, Fakultas Teknik, Universitas Islam Malang,

²Agro-Renew Center for Energy and Environment, Universitas Islam Malang

Jl. MT. Haryono 193 Malang 65114, Indonesia

e-mail: ikhshanmz213@gmail.com

e-mail: ena.marlina@unisma.ac.id

e-mail: alhikami@unisma.ac.id

ABSTRAK

Pemanfaatan biomassa sebagai bahan bakar alternatif melalui teknologi *co-firing* dapat mengurangi ketergantungan terhadap batubara. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh *co-solvent* asam sitrat 0,5 M dan NaOH 0,5 M pada proses *Hydrothermal Carbonization* (HTC) tandan kosong kelapa sawit (TKKS) terhadap karakteristik pembakaran campuran 20% hydrochar dan 80% batubara sub-bituminous. Analisis dilakukan menggunakan Thermogravimetric Analysis (TGA) dan Differential Thermogravimetric Analysis (DTG), serta parameter termodinamika berupa energi bebas Gibbs (ΔG), entalpi (ΔH), dan entropi (ΔS). Hasil menunjukkan NaOH-TKKS memiliki reaktivitas pembakaran lebih tinggi dibandingkan CA-TKKS, dengan laju degradasi maksimum sekitar $-6,5\%/menit$, mendekati batubara sebesar $-6,7\%/menit$. Nilai pada pembakaran utama ΔG dan ΔH NaOH-TKKS masing-masing sebesar 143,57 dan 51,22, lebih rendah dibandingkan CA-TKKS sebesar 145,33 dan 54,89 serta batubara sebesar 196,93 dan 76,39. **Kata kunci:** *hydrochar*, tandan kosong kelapa sawit, *Hydrothermal carbonization*, *co-solvent*, termodinamika pembakaran,

ABSTRACT

Transportation Utilizing biomass as an alternative fuel through co-firing technology can reduce reliance on coal. This study aims to analyze the effect of using 0.5 M citric acid (CA) and 0.5 M NaOH as co-solvents during the Hydrothermal Carbonization (HTC) of oil palm empty fruit bunches (OPEFB) on the combustion characteristics of a blend comprising 20% hydrochar and 80% sub-bituminous coal. Analyses were conducted using Thermogravimetric Analysis (TGA) and Differential Thermogravimetric Analysis (DTG), alongside thermodynamic parameters including Gibbs free energy (ΔG), enthalpy (ΔH), and entropy (ΔS). The results indicate that NaOH-treated OPEFB hydrochar (NaOH-TKKS) exhibits higher combustion reactivity than CA-treated OPEFB hydrochar (CA-TKKS), with a maximum degradation rate of approximately $-6.5\%/min$, approaching that of coal ($-6.7\%/min$). During the main combustion stage, the ΔG and ΔH values for NaOH-TKKS were 143.57 and 51.22, respectively lower than those of CA-TKKS (145.33 and 54.89) and coal (196.93 and 76.39).

Keywords: *Hydrochar, Oil Palm empty fruit bunches, hydrothermal carbonization, co-solvent, combustion thermodynamics.*

PENDAHULUAN

Pengurangan emisi CO_2 adalah masalah mendesak saat ini dengan dorongan untuk dekarbonisasi di setiap bidang, terutama dalam sektor energi. Mencapai netralitas karbon sambil tetap menjaga efisiensi biaya untuk pembangkit listrik dari batubara (PLTU pembangkit listrik tenaga uap) adalah hal yang penting. Salah satu strategi untuk menggantikan batubara dengan bahan bakar rendah karbon adalah dengan mengurangi emisi karbon secara bertahap, seperti melalui pembakaran yang mencampurkan batubara dengan biomassa atau *co-firing* [1],[2]. Teknologi *co-firing* adalah proses pembakaran dua jenis bahan bakar yang berbeda secara bersamaan. Pada umumnya, *co-firing* di boiler menggunakan biomassa sebagai salah satu bahan bakar. *Co-firing* merupakan teknologi yang memadukan pembakaran batu bara dan biomassa dalam satu sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), yang memungkinkan integrasi energi terbarukan tanpa perlu mengubah infrastruktur utama. Pengurangan emisi bersih melalui *co-firing* dilaporkan dapat mencapai antara 5% hingga 20%, tergantung pada perbandingan penggunaan biomassa, sementara potensi besar biomassa di Indonesia mendukung praktik ini secara berkelanjutan. [3],[4],[21].

Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) termasuk produk samping (*by-product*) berupa material padat yang dihasilkan oleh industri pengolahan kelapa sawit. [5]. Batubara adalah bahan bakar hidrokarbon padat yang terbentuk melalui proses penggabungan dan pembatubaraan di dalam cekungan (seperti daerah rawa) selama periode geologis yang panjang, melibatkan aktivitas bio-geokimia terhadap akumulasi tumbuhan alami yang kaya selulosa dan lignin. [6]. *Hydrothermal Carbonization* HTC adalah metode di mana berbagai bahan baku biomassa basah dapat diubah menjadi biocoal, suatu zat yang menyerupai batubara dalam penampilan dan nilai kalorinya. HTC ini di proses pada suhu 180 hingga 260°C dan tekanan 10–50 bar, yang secara efektif mengubah bahan organik dalam biomassa basah menjadi keluaran padat, cair, dan gas. Suhu merupakan faktor yang paling dominan pengaruhnya pada suhu HTC yang lebih rendah, dihasilkan hidrokar yang terfungsionalisasi dan cocok digunakan sebagai adsorben polutan, sedangkan pada suhu yang lebih tinggi dihasilkan hidrokar dengan sifat bahan bakar yang lebih baik. Kondisi HTC pada air

subkritis berperan penting sebagai pelarut yang memfasilitasi hidrolisis senyawa organik dalam biomassa, sehingga memicu terjadinya depolimerisasi yang cepat menjadi produk-produk yang larut dalam air [7],[8],[9],[4].

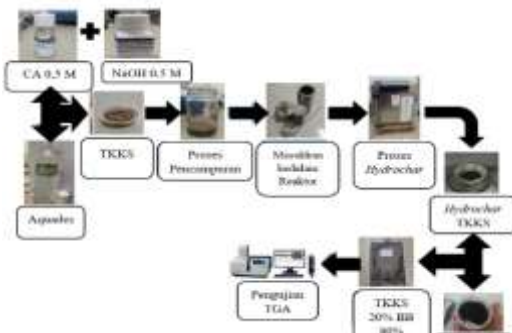
Keunggulan HTC dibandingkan *pyrolysis* konvensional adalah kemampuannya memproses bahan baku berkadar air tinggi tanpa *pre-drying* yang mahal [10]. HTC merupakan teknologi termokimia terkemuka yang dapat mengonversi limbah berkadar kelembaban tinggi menjadi produk bernilai (disebut hidrochar) pada kondisi perlakuan yang relatif ringan, yaitu 180–260°C dan 2–10 Mpa [11],[12]. *Co-solvent* adalah zat yang ditambahkan ke dalam larutan untuk meningkatkan kelarutan bahan aktif yang kurang larut dalam pelarut utama [13]. *Co-solvent* untuk senyawa asam berfungsi meningkatkan kelarutan zat yang dapat mendonorkan proton (H^+), seperti asam salisilat, dengan cara menurunkan polaritas sistem pelarut sehingga interaksi antara zat terlarut dan pelarut menjadi lebih baik [14].

Penelitian mengenai *co-firing* dan hidrochar telah banyak dikembangkan, namun kajian yang secara khusus mengaitkan aktivasi citric acid dan NaOH pada hidrochar tandan kosong kelapa sawit dengan karakteristik degradasi massa serta parameter termodinamika pembakaran masih relatif terbatas. Oleh sebab itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis karakteristik TGA/DTG serta parameter termodinamika berupa energi bebas Gibbs, entalpi, dan entropi pada sampel 0,5 M CA HTC dan 0,5 M NaOH HTC, TKKS 20%, dan Coal 100%. Analisis tersebut bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh aktivasi CA 0,5 M dan NaOH 0,5 M terhadap kemudahan berlangsungnya reaksi, kebutuhan energi, dan perubahan keteraturan struktur material selama proses pembakaran.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menerapkan pendekatan eksperimental, dengan preparasi sampel dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Islam Malang dan analisis Thermogravimetric Analysis (TGA) dilaksanakan di Laboratorium Terpadu Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Brawijaya. Kegiatan penelitian berlangsung dari November 2025 hingga April 2026. Sampel yang diuji mencakup tiga variasi, yaitu 0,5 NA TKKS, CA TKKS, dan COAL 100%, sesuai dengan label yang tercantum pada data hasil pengujian.

Tandan kosong kelapa sawit dikarbonisasi melalui proses HTC (*Hydrothermal Carbonization*) pada suhu 210°C selama 8 jam. Setelah itu, sampel dikeringkan dalam oven pada suhu 80°C selama 2 jam. Perlakuan yang divariasikan meliputi hydrochar tanpa aktivasi dan *hydrochar* yang diaktivasi dengan larutan NaOH 0,5 M, dengan komposisi co-firing sebesar 20% *hydrochar* dan 80% batu bara sub-bituminus.



Gambar 1 Skema pembuatan *hydrochar* menggunakan tandan kosong kelapa sawit dengan *co-solvent citric acid* dan NaOH.

Data TGA dianalisis untuk menghasilkan kurva perubahan massa dan memahami perilaku dekomposisi biomassa sebagai fungsi temperatur, sementara analisis DTG digunakan untuk menentukan laju penurunan massa. Proses degradasi massa diklasifikasikan menjadi empat tahap, yaitu penguapan air, devolatilisasi, pembakaran utama, dan pembentukan residu. Selanjutnya, parameter termodinamika pada Stage II dan Stage III ditentukan menggunakan metode Coats–Redfern untuk memperoleh nilai ΔG , ΔH , dan ΔS . Nilai ΔG digunakan untuk menggambarkan tingkat hambatan termodinamika suatu reaksi, ΔH menunjukkan besarnya energi yang diperlukan selama proses reaksi, sedangkan ΔS merepresentasikan perubahan tingkat keteraturan sistem selama berlangsungnya reaksi.

Analisis termodinamika

Termodinamika adalah bidang dalam kimia yang mempelajari fenomena perpindahan panas selama reaksi kimia. Fokus utamanya mencakup besaran energi kalor yang dihasilkan oleh sejumlah tertentu reaktan, serta teknik-teknik untuk mengukur energi kalor tersebut. Termodinamika pembakaran merupakan sub-bidang termodinamika yang mengkaji proses perubahan energi kimia dalam bahan bakar menjadi energi termal melalui reaksi pembakaran. [15].

Energi bebas gibbs (ΔG) adalah besaran termodinamika fundamental yang menentukan kondisi kesetimbangan reaksi kimia dan kestabilan material [16].

$$\Delta G = Ea + R \times Tm \times \ln\left(\frac{Kb \times T}{hA}\right) \quad [17]$$

Entalpi adalah sebagai besaran termodinamika yang merepresentasikan gabungan antara energi internal sistem dengan energi yang digunakan untuk melakukan kerja terhadap lingkungannya akibat perubahan volume pada tekanan tertentu [18].

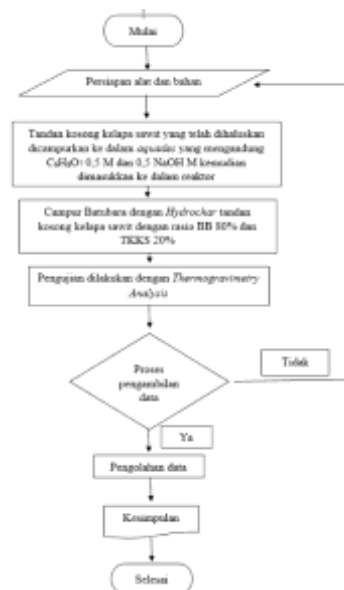
$$\Delta H = Ea - R \times$$

$$T \quad [17]$$

Entropi dapat diartikan sebagai ukuran tingkat ketidakteraturan suatu sistem serta penentu arah alami berlangsungnya suatu proses termodinamika [19]

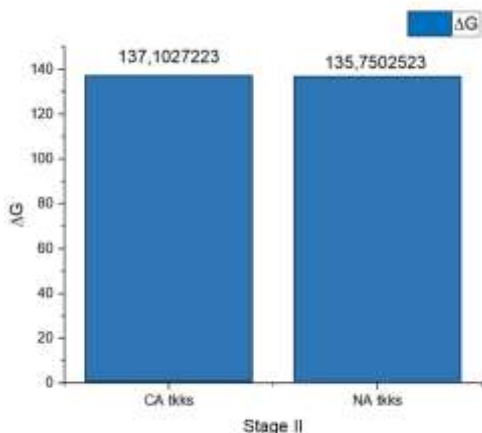
$$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{Tm} \quad [17]$$

DIAGRAM ALIR PENELITIAN

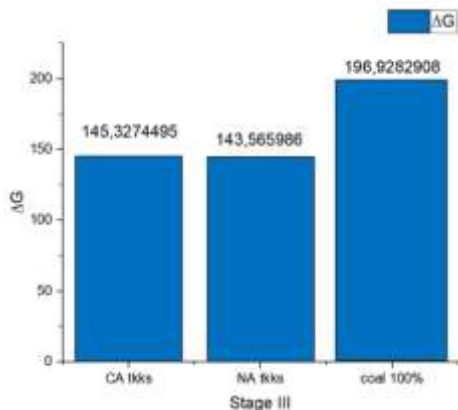


HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Analisis Gibbs Free Energy



Gambar 2 Gibbs Free Energy Stage II

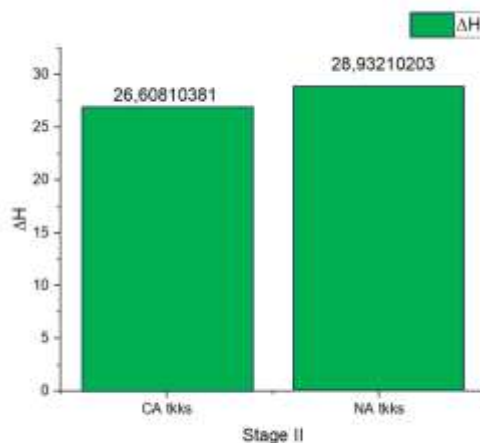


Gambar 3 Gibbs Free Energy Stage III

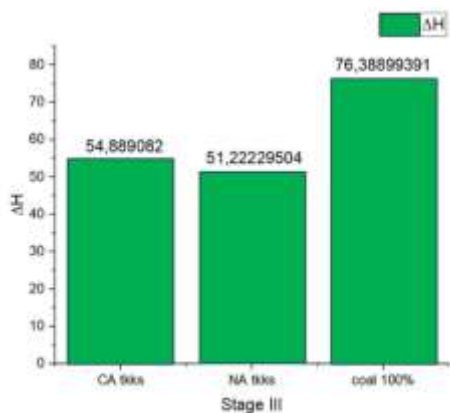
Gambar 2 pada stage II diperoleh nilai ΔG untuk sampel CA TKKS sebesar 137,10 dan NA TKKS sebesar 135,75. Nilai ΔG yang positif pada kedua sampel menunjukkan bahwa proses dekomposisi termal yang terjadi masih memerlukan energi dari luar untuk dapat berlangsung. Nilai ΔG NA TKKS yang sedikit lebih rendah dibandingkan CA TKKS mengindikasikan bahwa hydrochar hasil aktivasi NaOH memiliki hambatan termodinamika yang sedikit lebih kecil.

Gambar 3 pada stage III menunjukkan nilai ΔG diperoleh sebesar 145,33 untuk CA TKKS, 143,57 untuk NA TKKS, dan 196,93 untuk Coal 100%. Perbandingan dengan Stage II, nilai ΔG pada CA TKKS dan NA TKKS justru meningkat, namun keduanya tetap jauh lebih rendah dibandingkan Coal 100%. Nilai ini menunjukkan bahwa reaksi pada tahap tersebut masih berlangsung lebih mudah pada kedua sampel *hydrochar* dibandingkan pada batubara. NA TKKS memiliki nilai ΔG paling rendah di antara ketiga sampel, yang menunjukkan bahwa sampel tersebut membutuhkan energi paling kecil untuk melanjutkan proses pembakaran atau oksidasi karbon. Nilai ΔG yang rendah ini mengindikasikan bahwa *hydrochar* hasil aktivasi NaOH memiliki reaktivitas termal yang lebih tinggi dibandingkan CA TKKS maupun batubara.

2. Analisis Enthalpy



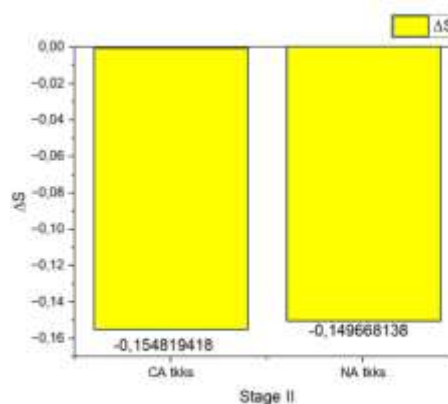
Gambar 4 Enthalpy Stage II



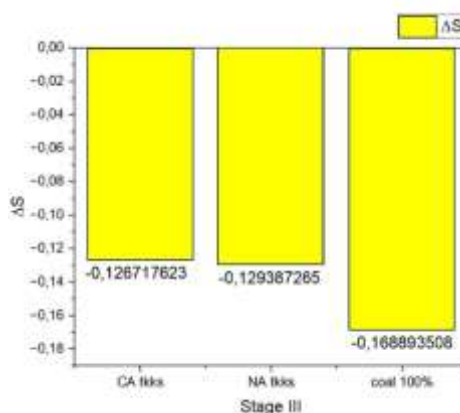
Gambar 5 Enthalpy Stage III

Gambar 4 dan gambar 5 seluruh sampel menunjukkan nilai ΔH positif. Nilai entalpi yang positif menunjukkan bahwa proses dekomposisi termal atau pembakaran yang terjadi bersifat endotermik, yaitu memerlukan penyerapan energi panas dari lingkungan untuk memutus ikatan kimia dalam material. Gambar 4 menunjukkan sampel CA TKKS memiliki nilai ΔH sebesar 26,61, sedangkan NA TKKS memiliki nilai ΔH sebesar 28,93. Gambar 5 memperlihatkan terjadi peningkatan nilai entalpi yang cukup signifikan pada seluruh sampel. Sampel CA TKKS memiliki nilai ΔH sebesar 54,89, NA TKKS sebesar 51,22, dan coal 100% sebesar 76,39. Peningkatan nilai ΔH dari Stage II ke Stage III menunjukkan bahwa pada tahap ini proses yang berlangsung melibatkan dekomposisi komponen karbon yang lebih kompleks dan lebih stabil. Reaksi yang terjadi tidak lagi didominasi oleh pelepasan senyawa volatil, melainkan oleh oksidasi dan degradasi residu karbon atau char yang membutuhkan energi lebih besar. COAL 100% menunjukkan nilai ΔH tertinggi, yang menunjukkan bahwa batu bara menyimpan energi paling besar dalam struktur karbonnya sehingga memerlukan energi paling besar untuk terurai sejalan dengan sifat batu bara yang memiliki struktur aromatik kompleks dan tingkat karbonisasi alami yang tinggi.

3. Analisis Entropy



Gambar 6 Entropy Stage II



Gambar 7 Entropy Stage III

Berdasarkan grafik entropi (ΔS) gambar 6 dan gambar 7 seluruh sampel menunjukkan nilai ΔS negatif. Nilai termodinamika entropi menggambarkan tingkat ketidakteraturan atau keacakan suatu sistem. Gambar 6 menunjukkan sampel CA TKKS memiliki nilai ΔS sebesar -0,154819, sedangkan NA TKKS memiliki nilai ΔS sebesar -0,149668. Nilai entropi yang negatif pada kedua sampel menunjukkan bahwa proses dekomposisi yang berlangsung menyebabkan sistem kehilangan sebagian derajat kebebasan molekulnya sehingga menjadi lebih terorganisasi. Nilai ΔS NA TKKS yang sedikit lebih tinggi (kurang negatif) dibandingkan CA TKKS menunjukkan bahwa hydrochar hasil aktivasi NaOH mengalami penurunan ketidakteraturan yang sedikit lebih kecil.

Gambar 7 menunjukkan nilai entropi meningkat (menjadi kurang negatif) pada CA TKKS dan NA

TKKS dibandingkan Stage II, yaitu masing-masing sebesar -0,126718 untuk CA TKKS dan -0,129387 untuk NA TKKS, sedangkan coal 100% justru mencatatkan nilai ΔS sebesar -0,168894 paling negatif di antara ketiga sampel. Perubahan ini menunjukkan bahwa pada tahap dekomposisi lanjutan, kedua sampel hydrochar mengalami penurunan keteraturan yang lebih kecil dibandingkan Stage II, karena sebagian besar komponen yang mudah terurai telah terdegradasi. Pada Stage III ini, CA TKKS justru memiliki nilai ΔS paling mendekati nol di antara ketiga sampel, sedikit lebih tinggi dibandingkan NA TKKS, yang mengindikasikan bahwa struktur karbon hasil aktivasi asam sitrat mengalami perubahan susunan molekul yang sedikit lebih dinamis dan fleksibel pada fase pembakaran utama.

KESIMPULAN

Berdasarkan keseluruhan hasil analisis profil laju degradasi massa (TGA/DTG), energi bebas Gibbs (ΔG), entalpi (ΔH), dan entropi (ΔS) terhadap sampel NaOH-TKKS (NA TKKS), asam sitrat-TKKS (CA TKKS), dan batu bara (Coal 100%), dapat disimpulkan bahwa hydrochar TKKS yang diaktivasi dengan co-solvent (NaOH 0,5 M maupun asam sitrat 0,5 M) terbukti memiliki karakteristik termodinamika yang lebih baik dibanding batu bara murni, dengan kebutuhan energi bebas Gibbs (ΔG) dan entalpi (ΔH) yang lebih rendah serta laju degradasi yang lebih cepat, sehingga lebih reaktif secara termal. NaOH-TKKS unggul dari sisi reaktivitas (ΔG dan ΔH lebih rendah), sementara CA-TKKS sedikit lebih unggul dari sisi fleksibilitas struktur karbon (ΔS mendekati nol). Secara umum, hydrochar TKKS berbasis co-solvent berpotensi meningkatkan reaktivitas pembakaran dan menurunkan kebutuhan energi pada aplikasi *co-firing* dengan batu bara sub-bituminus di PLTU.

SARAN

1. Verifikasi ulang data mentah TGA dan hasil perhitungan termodinamika sebelum sidang/laporan akhir, karena ditemukan beberapa perbedaan antara narasi dan data pada diagram.
2. Lengkapi analisis dengan energi aktivasi (E_a) melalui metode kinetika non-isotermal (misalnya Kissinger-Akahira-Sunose atau Flynn-Wall-Ozawa).
3. Lakukan replikasi pengukuran TGA/DTG untuk memastikan konsistensi data.

4. Tambahkan analisis proksimat dan ultimat pada hydrochar untuk memperkuat penjelasan dari sisi komposisi kimia.
5. Uji variasi rasio campuran hydrochar-batubara (selain 20:80) dan variasi konsentrasi co-solvent (selain 0,5 M) untuk menemukan kombinasi paling optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Prasetyo Nuryadi *et al.*, “Simulasi CFD Pengurangan CO₂ pada *Co-firing* Batubara dan Tandan Kosong Kelapa Sawit Menggunakan Model Pembakaran Non-Premixed CFD Simulation of CO₂ Reduction in *Co-firing* of Coal and Palm Oil Empty Fruit Bunches using a Non-Premixed Combustion Model,” *J. Teknol. Lingkung.*, vol. 24, no. 2, pp. 283–291, 2023.
- [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] Andreas Bagus Laksana Putra, E. Marlina, and A. F. Alhikami, “EFEKTIVITAS KENAIKAN KONSENTRASI NaOH AKTIVASI HYDROCHAR BATOK KELAPA TERHADAP THERMODINAMIKA PEMBAKARAN *CO-FIRING* BATU BARA SUB-BITUMINOUS,” *Concept Commun.*, vol. null, no. 23, pp. 301–316, 2019, doi: 10.15797/concom.2019..23.009.
- [4] M. A. Qodir, A. F. Alhikami, and M. Margianto, “Analisis profil degradasi massa pada hydrochar menggunakan teknik Hydrothermal Carbonization dari limbah tandan kosong sawit,” *J. Tek. Mesin*, vol. 22, no. 2, pp. 14–20, 2025.
- [3] S. Legowo, I. A. S. Andayani, and I. B. F. Citarsa, “Analisis *Co-firing* Jenis Bahan Bakar Biomassa Terhadap Efisiensi Boiler,” *Ikraith-Teknologi*, vol. 3, no. 9, p. 10, 2025, [Online]. Available: <https://doi.org/10.37817/ikraith-teknologi.v10i3>
- [4] P. Narputro, Marina Artiyasa, Cahya Laxa Eka Putra, Trisiani Dewi Hendrawati, and Fikri Arif Wicaksana, “Analisis Tekno-

- Ekonomi Penerapan *Co-firing* Biomassa Serbuk Kayu pada PLTU 3×350 MW,” *Scientific Exploration: Journal of Indonesian Academic Research*, vol. 3, no. 1, pp. 1–13, 2025, doi: 10.25134/jiar.v3i1.58.
- [5] M Roganda L Lumban Gaol, Roganda Sitorus, Yanthi S, Indra Surya, and Renita Manurung, “Pembuatan Selulosa Asetat Dari A -Selulosa Tandan Kosong Kelapa Sawit,” *Jurnal Teknik Kimia USU*, vol. 2, no. 3, pp. 33–39, 2013, doi: 10.32734/jtk.v2i3.1447.
- [6] D. D. A. Arsdin, A. Nurwaskito, and S. Bundang, “Analisis Perbedaan Konsumsi Batubara Berdasarkan Karakteristik Batubara dari Supplier pada PLTU Bosowa Energi Provinsi Sulawesi Selatan,” *Journal of Mining Insight*, vol. 2, no. 4, pp. 105–110, 2024, doi: 10.58227/jmi.v2i4.284.
- [7] M. F. Praevia and W. Widayat, “Analisis Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Cofiring pada PLTU Batubara,” *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 3, no. 1, pp. 28–37, 2022, doi: 10.14710/jebt.2022.13367.
- [8] N. L. Tirtasari, “Sifat Pada Gelombang Stationr,” *Indonesian Journal of Chemical Science*, vol. 6, no. 2, pp. 151–155, 2018.
- [9] M. C. Ndoun and S. A. Darko, “Characterization and Evaluation of Carbonaceous Materials from the Hydrothermal Carbonization of Waste Pharmaceuticals,” no. 305, 2023, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2302.06020>
- [10] O. M. Abdeldayem, C. Dupont, D. Ferras, L. G. Ndiaye, and M. Kennedy, “Reconsidering lab procedures for hydrothermal carbonization of biomass: The impact of pre-drying and stirring,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 179, no. March, p. 106459, 2024, doi: 10.1016/j.jaap.2024.106459.
- [11] 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.
- [12] A. Singh *et al.*, “Hydrothermal carbonization: Sustainable pathways for waste-to-energy conversion and biocoal production,” *GCB Bioenergy*, vol. 16, no. 6, pp. 1–25, 2024, doi: 10.1111/gcbb.13150.
- [13] N. Jomtib, C. Prommuak, M. Goto, M. Sasaki, and A. Shotipruk, “Effect of co-solvents on transesterification of refined palm oil in supercritical methanol,” *Engineering Journal*, vol. 15, no. 3, pp. 49–58, 2011, doi: 10.4186/ej.2011.15.3.49.
- [14] E. Książek, “Citric Acid: Properties, Microbial Production, and Applications in Industries,” *Molecules*, vol. 29, no. 1, 2024, doi: 10.3390/molecules29010022.
- [15] H. Riyanto, T. Hardianto, W. Adriansyah, and G. Y. Jeffry, “Studi Termodinamika Pembakaran Kombinasi Batu Bara dan Biomassa Limbah,” *JMPM (Jurnal Material dan Proses Manufaktur)*, vol. 5, no. 2, pp. 82–90, 2022, doi: 10.18196/jmpm.v5i2.13903.
- [16] C. J. Bartel *et al.*, “Physical descriptor for the Gibbs energy of inorganic crystalline solids and temperature-dependent materials chemistry,” *Nat. Commun.*, vol. 9, no. 1, 2018, doi: 10.1038/s41467-018-06682-4.
- [17] B. Nath, G. Chen, L. Bowtell, and E. Graham, “Kinetic mechanism of wheat straw pellets combustion process with a thermogravimetric analyser,” *Heliyon*, vol. 9, no. 10, p. e20602, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e20602.
- [18] M. D’Anna, P. Lubini, H. U. Fuchs, and F. Corni, “A Direct Entropic Approach to the Thermal Balance of Spontaneous Chemical Reactions,” *Entropy*, vol. 26, no. 6, 2024, doi: 10.3390/e26060450.
- [19] H. Struchtrup, “Entropy and the second law of thermodynamics-The nonequilibrium perspective,” *Entropy*, vol. 22, no. 7, 2020, doi: 10.3390/e22070793.

- [20] M. A. Qodir, A. F. Alhikami, and M. Margianto, "Analisis profil degradasi massa pada hydrochar menggunakan teknik Hydrothermal Carbonization dari limbah tandan kosong sawit," *J. Tek. Mesin*, vol. 22, no. 2, pp. 14–20, 2025.
- [21] Andreas Bagus Laksana Putra, E. Marlina, and A. F. Alhikami, "EFEKTIVITAS KENAIKAN KONSENTRASI NaOH AKTIVASI HYDROCHAR BATOK KELAPA TERHADAP THERMODINAMIKA PEMBAKARAN CO-FIRING BATU BARA SUB-BITUMINOUS," *Concept Commun.*, vol. null, no. 23, pp. 301–316, 2019, doi: 10.15797/concom.2019..23.009..