

**PENGARUH VARIASI CO-SOLVENT DALAM PROSES
HYDROTHERMAL CARBONIZATION CAMPURAN LIMBAH TANDAN KOSONG
KELAPA SAWIT DAN BATU BARA SUB-BITUMINOUS TERHADAP
KARAKTERISTIK DAN KINETIKA PEMBAKARAN**

Dimas Ananta Prasetya¹, Ena Marlina^{1,2}, Akhmad Faruq Alhikami^{1,2}

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Islam Malang

²Agro-Renew Center for Energi Water and Environment Technologies, Universitas Islam Malang

e-mail: dimasanantaprasetyatpm2@gmail.com

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

e-mail: alhikami@unisma.ac.id

Jl. MT. Haryono 193 Malang 65114, Indonesia

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi co-solvent citric acid 0,5 M dan NaOH 0,5 M pada proses Hydrothermal Carbonization (HTC) campuran tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dan batubara sub-bituminous terhadap karakteristik dan kinetika pembakaran. Analisis dilakukan menggunakan TGA-DTG untuk menentukan temperatur penyalan, temperatur puncak, temperatur burnout, laju degradasi massa, dan indeks pembakaran. Energi aktivasi dihitung menggunakan metode Coats–Redfern. Hasil penelitian menunjukkan bahwa citric acid-TKKS memiliki temperatur penyalan terendah sebesar 223,94 °C, sedangkan NaOH-TKKS sebesar 251,30 °C dan batubara sebesar 280,25 °C. Nilai combustion index citric acid-TKKS, NaOH-TKKS, dan batubara berturut-turut sebesar 32,43; 27,63; dan 47,59. Hasil kinetika menunjukkan energi aktivasi berbeda pada setiap tahap dekomposisi, yang menunjukkan bahwa variasi co-solvent memengaruhi karakteristik dan reaktivitas pembakaran hydrochar.

Kata kunci: TKKS, Hydrothermal Carbonization, co-solvent, TGA-DTG, Coats–Redfern.

ABSTRACT

This study aims to analyze the effect of varying co-solvents, namely 0.5 M citric acid and 0.5 M NaOH, during the Hydrothermal Carbonization (HTC) process of a mixture of empty fruit bunches (EFB) and sub-bituminous coal on combustion characteristics and kinetics. TGA-DTG analysis was performed to determine ignition temperature, peak temperature, burnout temperature, mass degradation rate, and combustion index. Activation energy was calculated using the Coats–Redfern method. The results showed that citric acid-EFB had the lowest ignition temperature of 223.94 °C, followed by NaOH-EFB at 251.30 °C and coal at 280.25 °C. The combustion indices of citric acid-EFB, NaOH-EFB, and coal were 32.43, 27.63, and 47.59, respectively. The kinetic analysis showed different activation energies at each decomposition stage, indicating that co-solvent variation affects the combustion characteristics and reactivity of hydrochar.

Keywords: EFB, Hydrothermal Carbonization, co-solvent, TGA-DTG, Coats–Redfern.

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi dunia terus mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk, perkembangan teknologi, serta aktivitas industri yang semakin pesat. Bahan bakar fosil seperti

minyak bumi, gas alam, dan batu bara masih menjadi sumber energi utama untuk memenuhi kebutuhan energi global. Batubara masih banyak digunakan sebagai bahan bakar utama pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), termasuk di Indonesia [10][14].

Batubara juga digunakan pada berbagai sektor industri seperti semen, metalurgi, dan manufaktur. Penggunaan batubara secara terus-menerus menimbulkan berbagai permasalahan lingkungan akibat emisi yang dihasilkan selama proses pembakaran. Emisi tersebut meliputi karbon dioksida (CO_2), karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), sulfur dioksida (SO_2), serta partikulat yang dapat menurunkan kualitas udara dan berkontribusi terhadap perubahan iklim global [12]. Di Indonesia, PLTU masih menjadi tulang punggung penyediaan energi listrik dengan kapasitas terpasang mencapai sekitar 54,68 GW pada tahun 2024, sehingga menjadikan Indonesia sebagai salah satu negara dengan kapasitas PLTU batubara terbesar di dunia [6][15].

Proses karbonisasi hidrotermal (HTC) adalah salah satu teknologi konversi termokimia yang paling banyak digunakan saat ini. HTC bekerja dengan menggunakan air sebagai media reaksi dalam kondisi subkritis. Selama proses ini, struktur biomassa yang awalnya kaya akan gugus oksigen dan hidrogen secara bertahap berubah menjadi hydrochar, yang merupakan material padat yang kaya karbon [3][16],[17]. Hydrochar lebih baik daripada biomassa mentah karena memiliki kandungan karbon yang lebih tinggi, kadar air yang lebih rendah, densitas energi yang lebih tinggi, kandungan abu yang lebih rendah, dan stabilitas penyimpanan yang lebih baik. Studi yang dilakukan oleh [9][18] menunjukkan bahwa hydrochar yang dihasilkan melalui proses HTC memiliki sifat fisik dan kimia yang berbeda dari biomassa awal. Karena telah mengalami perlakuan termal, hydrochar memiliki kandungan karbon tetap (fixed carbon) yang lebih tinggi, sehingga rasio H/C dan O/C menurun. Dengan densitas energi yang lebih tinggi dan kandungan abu yang lebih rendah, hydrochar sangat cocok untuk digunakan sebagai bahan bakar padat, bahan baku gasifikasi, atau bahan campuran dalam sistem pembakaran bersama batubara [1]. Teknologi HTC adalah salah satu metode yang sangat menjanjikan untuk meningkatkan nilai guna biomassa, khususnya tandan kosong kelapa sawit (TKKS), karena memiliki sifat yang lebih mirip dengan bahan bakar fosil dan lebih cocok untuk aplikasi energi yang lebih efisien dan berkelanjutan [2][16][19].

Penggunaan co-solvent pada proses Hydrothermal Carbonization (HTC) diketahui mampu meningkatkan kualitas hydrochar yang dihasilkan dari

biomassa. Penambahan co-solvent berperan dalam mempercepat dan mengoptimalkan berbagai reaksi kimia selama proses HTC, seperti hidrolisis, dehidrasi, dekarboksilasi, dan aromatisasi, yang pada akhirnya mempengaruhi karakteristik fisik, kimia, dan termal hydrochar. Co-solvent asam, seperti asam sitrat, banyak digunakan karena mampu mempercepat penguraian komponen lignoselulosa sehingga meningkatkan kandungan karbon, menurunkan rasio O/C dan H/C, serta menghasilkan hydrochar dengan nilai kalor yang lebih tinggi [7]. Penggunaan asam sitrat pada proses HTC dapat meningkatkan sifat fisik dan termal produk karbon yang dihasilkan [4]. Co-solvent basa seperti natrium hidroksida (NaOH) dan kalium hidroksida (KOH) digunakan untuk memodifikasi struktur hydrochar melalui proses aktivasi kimia yang mampu meningkatkan porositas, luas permukaan, dan kualitas material karbon. Penelitian [5] melaporkan bahwa aktivasi menggunakan KOH menghasilkan hydrochar dengan karakteristik fisik yang lebih baik serta berpotensi meningkatkan performa pembakaran. Meskipun berbagai penelitian telah membuktikan efektivitas penggunaan co-solvent asam maupun basa dalam meningkatkan kualitas hydrochar, penelitian yang membandingkan pengaruh kedua jenis co-solvent tersebut terhadap karakteristik kinetika pembakaran hydrochar dari limbah tandan kosong kelapa sawit masih relatif terbatas.

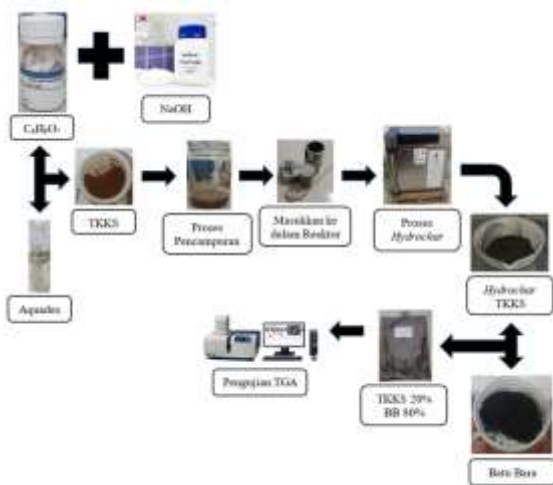
Asam sitrat ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) adalah senyawa asam organik yang banyak digunakan karena sifatnya yang ramah lingkungan, mudah larut dalam air, relatif aman, dan mampu berinteraksi dengan komponen lignoselulosa pada biomassa. Hidrotermal karbonisasi (HTC) juga dapat dilakukan melalui proses aktivasi kimia. Dibandingkan dengan hydrochar tanpa perlakuan aktivasi, asam sitrat meningkatkan luas permukaan, porositas, dan reaktivitas termal dengan mempercepat reaksi dehidrasi dan membantu mengurai struktur organik biomassa [10]. Peningkatan luas permukaan dan volume pori sangat penting karena memungkinkan peningkatan area kontak selama proses pembakaran, yang menghasilkan reaksi oksidasi yang lebih cepat dan stabil [11]. Menemukan bahwa dengan menggunakan agen kimia selama proses HTC, porositas hydrochar dapat meningkat secara signifikan. Salah satu cara yang mungkin untuk menghasilkan bahan bakar padat dengan kualitas yang lebih baik, lebih reaktif, dan dengan karakteristik yang

lebih sesuai untuk digunakan bersama batubara sub-bituminus pada sistem pembakaran maupun co-firing adalah dengan menggunakan asam sitrat ($C_6H_8O_7$) sebagai aktivator pada hydrochar tandan kelapa sawit yang kosong.

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi ilmiah terkait pemahaman pengaruh aktivasi asam sitrat terhadap perilaku pembakaran hydrochar, mengoptimalkan pemanfaatan limbah TKKS sebagai sumber energi alternatif, serta mendukung pengembangan teknologi co-firing yang lebih efisien dan berkelanjutan guna mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil di sektor pembangkitan listrik Indonesia.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium dengan pendekatan komparatif untuk menganalisis pengaruh variasi co-solvent berupa citric acid 0,5 M dan NaOH 0,5 M pada proses Hydrothermal Carbonization (HTC) biomassa batok kelapa. Hydrochar yang dihasilkan kemudian dicampurkan dengan batu bara sub-bituminous pada rasio 20:80 (hydrochar: batu bara) dan dianalisis menggunakan Thermogravimetric Analysis (TGA). Karakteristik dan kinetika pembakaran dianalisis menggunakan metode Coats–Redfern.



Gambar 1. Skema Instalasi Penelitian

Metode Analisis

Penelitian ini menggunakan metode perbandingan eksperimental sebagai pendekatan analisis data. Metode tersebut dilakukan dengan membandingkan hasil pengujian TGA dan DTG dari variasi penggunaan co-solvent, yaitu asam sitrat 0,5 M dan NaOH 0,5 M, dalam proses Hydrothermal

Carbonization (HTC) pada Tandan Kosong Kelapa sawit. Hydrochar yang diperoleh kemudian dicampur dengan batu bara sub-bituminous dengan perbandingan 20:80 (hydrochar : batu bara). Parameter yang dibandingkan meliputi profil laju degradasi (TGA dan DTG), profil karakteristik pembakaran (T_i , T_p , T_b , DTG max, Di, S), Energi Aktivasi. Laju Kehilangan Massa DTG

1. Menghitung turunan pertama DTG

$$DTG = \frac{dm}{dt}$$

2. Plot data TGA dan DTG dalam satu grafik.

Karakteristik Pembakaran

- a. Ignition temperature (T_i)
 1. Identifikasi bagian awal dari kurva TGA (awal kehilangan massa signifikan).
 2. Pada kurva DTG tarik garis singgung di awal kenaikan yang signifikan.
 3. Gambarkan garis singgung kedua pada puncak DTG.
 4. Titik perpotongan kedua garis singgung adalah T_i .
- b. Peak temperature (T_p)
 1. Pada kurva DTG cari puncak maksimum.
 2. Gunakan fitur analysis.
 3. Pada software origin akan menampilkan suhu T_p .
- c. Burnout temperature (T_b)
 1. Pada kurva TGA identifikasi titik dimana konversi mencapai 99%.
 2. Suhu dimana perubahan massa hampir 0 (steady state) adalah T_b .
 3. Gunakan marker di kurva TGA untuk menentukan nilai suhu.

Kinetika Reaksi Pembakaran

Menghitung energi aktivasi menggunakan metode *coats redfern* dengan menggunakan model kinetika reaksi orde pertama.

1. Masukkan data TGA.
2. Menghitung tingkat konversi α menggunakan rumus.

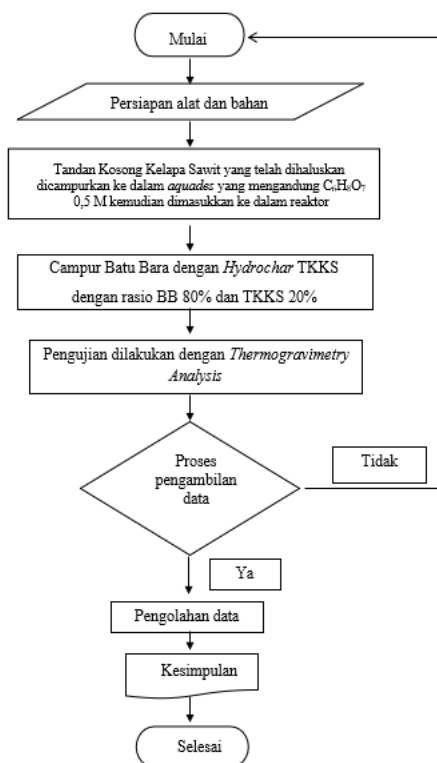
$$\alpha = \frac{m_0 - m_t}{m_0 - m_{residu}}$$

3. Menghitung parameter tambahan lain seperti T , $1/T$ dan T^2 .
4. Membuat plot linier *Coats–Redfern* dengan menempatkan nilai $\ln(\frac{g(\alpha)}{T^2})$ pada sumbu Y dan nilai $1/T$ pada sumbu X. Persamaan linear yang diperoleh digunakan untuk menentukan energi aktivasi (E_a) dari nilai kemiringan (*slope*) garis
5. Menghitung energi aktivasi dengan rumus

$$\ln(\frac{g(\alpha)}{T^2}) = \ln(\frac{AR}{\beta E_a}) - \frac{E_a}{RT}$$

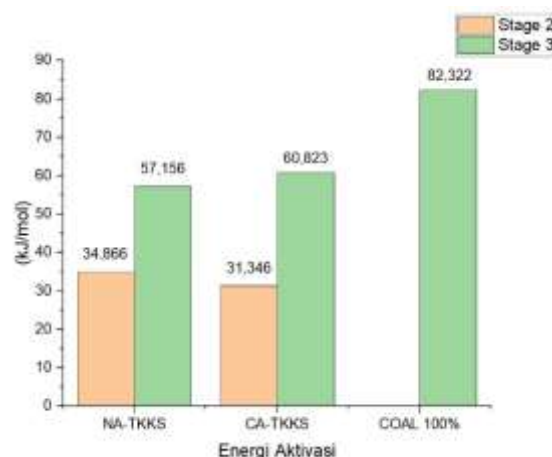
6. Menggunakan Temperatur Kelvin

DIAGRAM ALIR PENELITIAN



HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Energi Aktivasi



Gambar 1. Energi Aktivasi

Berdasarkan analisis Coats–Redfern, energi aktivasi (E_a) menunjukkan perbedaan kebutuhan energi pada setiap sampel dan tahap dekomposisi. NA-TKKS memiliki E_a sebesar 34,86 kJ/mol pada Stage 2 dan 57,15 kJ/mol pada Stage 3. CA-TKKS menunjukkan nilai 31,34 kJ/mol dan 60,82 kJ/mol. Batubara 100% hanya menunjukkan Stage 3 dengan E_a sebesar 82,32 kJ/mol. Nilai E_a yang lebih rendah pada CA-TKKS, NA-TKKS menunjukkan hambatan kinetika yang lebih kecil dan kecenderungan reaktivitas pembakaran yang lebih tinggi dibandingkan batubara murni. Nilai E_a terendah pada Stage 2 CA-TKKS mengindikasikan adanya perubahan karakteristik kinetika akibat pencampuran yang berpotensi menghasilkan efek sinergis pada proses devolatilisasi. Sebaliknya, tingginya E_a batubara murni menunjukkan stabilitas termal dan hambatan degradasi yang lebih tinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa aktivasi NaOH dan pencampuran TKKS dengan batubara dapat meningkatkan kemudahan dekomposisi termal, sejalan dengan penelitian terdahulu mengenai co-combustion biomassa–batubara [8].

KESIMPULAN

Hasil penelitian mengenai pengaruh variasi co-solvent pada proses Hydrothermal Carbonization (HTC) campuran limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dan batu bara sub-bituminus terhadap karakteristik dan kinetika pembakaran hydrochar, yang dianalisis menggunakan metode Thermogravimetric Analysis (TGA), Derivative Thermogravimetric Analysis (DTG), serta analisis kinetika Coats–Redfern, menunjukkan bahwa variasi co-solvent memberikan pengaruh yang nyata terhadap

tiga aspek utama, yaitu profil degradasi massa, karakteristik pembakaran, dan energi aktivasi hydrochar yang dihasilkan. Maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Profil degradasi massa menunjukkan bahwa penambahan hydrochar teraktivasi NaOH maupun asam sitrat meningkatkan intensitas devolatilisasi pada Fase II dibandingkan batu bara murni, sementara batu bara murni justru mendominasi kehilangan massa pada tahap dekomposisi utama pada Fase III dan menghasilkan residu akhir paling rendah. Karakteristik pembakaran kedua jenis hydrochar teraktivasi terbukti menurunkan suhu penyalan (ignition temperature) dibandingkan batu bara murni dibandingkan dengan CA-TKKS menunjukkan kemudahan penyalan paling baik di antara seluruh sampel. Batu bara murni tetap unggul dalam intensitas dan kestabilan pembakaran setelah penyalan berlangsung yang ditunjukkan oleh laju degradasi massa maksimum serta indeks pembakaran yang lebih tinggi dibandingkan kedua sampel hydrochar, sehingga hydrochar teraktivasi lebih tepat diposisikan sebagai penginisiasi penyalan (ignition promoter) ketimbang penentu utama intensitas pembakaran. Aktivasi menggunakan NaOH 0,5 M terbukti menurunkan energi aktivasi hydrochar dibandingkan batu bara murni, dan penurunan tersebut semakin besar hydrochar dicampurkan dengan batu bara pada rasio 20:80 mengindikasikan adanya efek sinergis antara biomassa dan batu bara dalam mempermudah tahap devolatilisasi, sedangkan batu bara murni memiliki energi aktivasi tertinggi akibat struktur karbonnya yang lebih stabil terhadap pemanasan. Temuan-temuan tersebut menegaskan bahwa aktivasi NaOH khususnya bila dikombinasikan dengan pencampuran batu bara pada sistem co-firing mampu meningkatkan reaktivitas termal dan mempermudah penyalan hydrochar, sekalipun intensitas dan kestabilan pembakaran secara keseluruhan tetap dipengaruhi oleh karakteristik batu bara sub-bituminus.

SARAN

Berdasarkan penelitian yang diperoleh dari rangkaian eksperimen ini, rekomendasi yang dapat diajukan sebagai arah pengembangan penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Disarankan agar penelitian berikutnya menerapkan variasi konsentrasi aktivator NaOH dan asam sitrat yang lebih luas, guna mengidentifikasi konsentrasi optimum yang mampu meningkatkan karakteristik pembakaran sekaligus menurunkan energi aktivasi hydrochar dari Tandan Kosong Kelapa Sawit.
2. Eksplorasi terhadap variasi rasio blending hydrochar dan batu bara perlu diperluas melampaui konfigurasi 20:80, dengan tujuan menetapkan formulasi co-firing yang menghasilkan kinerja pembakaran paling unggul, terutama dalam konteks augmentasi parameter DTG max, ignition index (Di), dan combustion index (S) yang teridentifikasi masih rendah pada sampel hydrochar tunggal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abdelrahman, M. A., Alhikami, A. F., & Marlina, E. (2025). A study of structural and elemental properties characterization of hydrochar derived from empty fruit bunches through hydrothermal carbonization. *Jurnal Teknik Mesin*, 22(3), 81–87. <https://jim.unisma.ac.id/index.php/jts/article/view/27684>
- [2] Andreas Bagus Laksana Putra, Ena Marlina, & Akhmad Faruq Alhikami. (2026). EFEKTIVITAS KENAIKAN KONSENTRASI NaOH AKTIVASI HYDROCHAR BATOK KELAPA TERHADAP THERMODINAMIKA PEMBAKARAN CO-FIRING BATU BARA SUB-BITUMINOUS.
- [3] Azizi1, M. W., Marlina2, E., & Robbi3, N. (n.d.). PENGARUH CO-FIRING TONGKOL JAGUNG PADA BATUBARA TERHADAP EFISIENSI BOILER.
- [4] Faradilla, R. F., Lucia, L., & Hakovirta, M. (2020). Remarkable physical and thermal properties of hydrothermal carbonized nanoscale cellulose observed from citric acid catalysis and acetone rinsing. *Nanomaterials*, 10(6), 1–13. <https://doi.org/10.3390/nano10061049>
- [5] Gan, Y. X., Yusuf, M., & Ibrahim, H. (2024). Preparation and characterization of potassium hydroxide activated hydrochar. *Materials Letters*, 376(May), 137328. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.137328>
- [6] Global Energy Monitor. (2025). Boom and Bust Coal 2025 Tracking the Global Coal Plant

- Pipeline. April.
- [7] Guo, S., Dong, X., Liu, K., Yu, H., & Zhu, C. (2015). Chemical, energetic, and structural characteristics of hydrothermal carbonization solid products for lawn grass. *BioResources*, 10(3), 4613–4625. <https://doi.org/10.15376/biores.10.3.4613-4625>
- [8] Lu, H., Xu, F. Y., Liu, H., Wang, J., Campbell, D. E., & Ren, H. (2019). Emergy-based analysis of the energy security of China. *Energy*, 181(August), 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.170>
- [9] Prifti, K., Basso, D., Pavanetto, R., & Manenti, F. (2021). Improving hydrothermal carbonization (HTC) processes by hydrochar gasification. *Chemical Engineering Transactions*, 86(March), 925–930. <https://doi.org/10.3303/CET2186155>
- [10] Rangga, D., Sukma, A., Faruq Alhikami, A., & Yazirin, C. (n.d.). Analisis Termodinamika Pembakaran Pada Campuran Bahan Bakar Batubara Sub-Bituminous Dengan Limbah Tandan Kosong Sawit.
- [11] Sisuthog, W., Prasongthum, N., Suemanotham, A., Thanmongkhon, Y., Attanatho, L., Jantasee, S., Mens, W., & Chaiya, C. (2024). High-Porosity Hydrochar From Oil Palm Empty Fruit Bunches Via Single-Step Hydrolytic Agent-Assisted Hydrothermal Carbonization. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 9(3), 709–720. <https://doi.org/10.17509/ijost.v9i3.74551>
- [12] Sukor, M. Z., Daud, A. R. M., Jamaludin, S. I. S., Muhamad, S. H. A., Samah, N. A. A., Sanusi, S. N. A., & Annur, N. H. R. (2023). Biomass Wastes Hydrothermal Carbonization: A Mini-Review on Hydrochar Properties and Combustion Performance. *Chemical Engineering Transactions*, 106(June), 451–456. <https://doi.org/10.3303/CET23106076>
- [13] Yi, B., Chen, M., Gao, Y., Cao, C., Wei, Q., Zhang, Z., & Li, L. (2023). Investigation on the co-combustion characteristics of multiple biomass and coal under O₂/CO₂ condition and the interaction between different biomass. *Journal of Environmental Management*, 325, 1–28. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116498>
- [14] IEA Bioenergy, “Biomass Combustion,” 2021.
- [15] 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, Mar. 2022, doi: 10.14710/jebt.2022.13367.
- [16] D. Ryu, J. Lee, D. Kim, K. Jang, J. Lee, and D. Kim, “Enhancement of the Biofuel Characteristics of Empty Fruit Bunches through Hydrothermal Carbonization by Decreasing the Inorganic Matters,” *Energies*, vol. 15, no. 21, 2022, doi: 10.3390/en15218154.
- [17] M. Heidari, A. Dutta, B. Acharya, and S. Mahmud, “A review of the current knowledge and challenges of hydrothermal carbonization for biomass conversion,” *J. Energy Inst.*, vol. 92, no. 6, pp. 1779–1799, 2019, doi: 10.1016/j.joei.2018.12.003.
- [18] J. González-Arias, M. E. Sánchez, J. Cara-Jiménez, F. M. Baena-Moreno, and Z. Zhang, “Hydrothermal carbonization of biomass and waste: A review,” *Environ. Chem. Lett.*, vol. 20, no. 1, pp. 211–221, 2022, doi: 10.1007/s10311-021-01311-x.
- [19] H. E. Putra *et al.*, “Hydrothermal treatment of empty fruit bunches for enhanced solid fuel production using palm oil mill effluent as a liquid stream,” *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 25, no. February, p. 101761, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.biteb.2024.101761.
- [20] A. Funke and F. Ziegler, “Chemical Mechanisms for Process Engineering,” *Biofuels, Bioprod. Biorefining*, vol. 4, no. 2, pp. 2–3, 2020.