

ANALISIS TERMODINAMIKA PEMBAKARAN HYDROCHAR TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT MENGGUNAKAN EKSTRAK BELIMBING WULUH MELALUI PROSES HYDROTHERMAL CARBONIZATION

Muhammad Akbar Maulana¹, Ena Marlina², Akhmad Faruq Alhikami³

¹Teknik Mesin, Universitas Islam Malang, muhammadakbarmaulan026@gmail.com

^{1,2}Agro-Renew Centre for Energy Water, and Environment Technologies, Universitas Islam Malang, enamarlina@unisma.ac.id

^{1,3}Agro-Renew Centre for Energy Water, and Environment Technologies, Universitas Islam Malang, alhikami@unisma.ac.id

ABSTRAK

Kebutuhan energi terbarukan terus meningkat sepanjang tahun seiring berkurangnya ketergantungan pada bahan bakar fosil dan meningkatnya tuntutan reduksi emisi karbon. Biomassa tandan kosong kelapa sawit (TKKS) merupakan satu kandidat sumber energi terbarukan yang melimpah, namun dari segi karakteristik termalnya yang kurang stabil membatasi pemanfaatannya pada proses konversi energi. Modifikasi biomassa melalui penambahan ekstrak belimbing wuluh menjadi alternatif untuk meningkatkan kestabilan termal melalui mekanisme dehidrasi, penurunan volatil, dan penguatan struktur karbon. Penelitian ini menganalisis perilaku termodinamika pembakaran pada sampel RAW TKKS, HTC 180, dan HTC 210 yang dianalisis menggunakan *Thermogravimetric Analysis* (TGA), dengan memfokuskan pada dua tahap termal, yaitu Stage I dan Stage II. Parameter energi yang dihitung meliputi energi bebas Gibbs (ΔG), entalpi (ΔH), dan entropi (ΔS). Pada Stage I diperoleh nilai ΔG sebesar (124,45 kJ/mol), nilai ΔH sebesar (55,951 kJ/mol), dan nilai ΔS sebesar (-0,1211 kJ/mol), sedangkan pada Stage II nilai ΔG memiliki nilai sebesar (161,003 kJ/mol), nilai ΔH (44,062 kJ/mol), dan nilai ΔS sebesar (-0,2067 kJ/mol). Peningkatan pada nilai ΔG , ΔH , dan ΔS menunjukkan adanya peningkatan kestabilan termal biomassa setelah modifikasi, sehingga TKKS hasil perlakuan memiliki potensi lebih besar untuk aplikasi energi dan konversi termal.

Kata Kunci: TKKS, TGA, Energi Bebas Gibbs, Entalpi, Entropi

ABSTRACT

The demand for renewable energy continues to increase each year as dependence on fossil fuels decreases and the need for carbon-emission reduction intensifies. Empty fruit bunch (EFB) biomass from oil palm is one abundant renewable energy candidate; however, its relatively unstable thermal characteristics limit its utilization in energy-conversion processes. Biomass modification through the addition of bilimbi (belimbing wuluh) extract offers an alternative to improve thermal stability through mechanisms such as dehydration, reduction of volatiles, and strengthening of the carbon structure. This study analyzes the thermodynamic combustion behavior of RAW EFB, HTC 180, and HTC 210 samples using Thermogravimetric Analysis (TGA), focusing on two thermal stages: Stage I and Stage II. The evaluated energy parameters include Gibbs free energy (ΔG), enthalpy (ΔH), and entropy (ΔS). In Stage I, the values obtained were ΔG (124.45 kJ/mol), ΔH (55.951 kJ/mol), and ΔS (-0.1211 kJ/mol). In Stage II, ΔG increased to 161.003 kJ/mol, ΔH to 44.062 kJ/mol, and ΔS to -0.2067 kJ/mol. The increase in ΔG , ΔH , and ΔS indicates an improvement in the thermal stability of the biomass after modification. Therefore, the treated EFB shows greater potential for energy applications and thermal-conversion processes.

Keyword: TKKS, TGA, Gibbs Free Energy, Enthalpy, Entropy

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi berkelanjutan mendorong pengembangan sumber energi alternatif yang mampu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan menekankan emisi karbon. Salah satu biomassa yang melimpah di Indonesia adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS), yang merupakan limbah lignoselulosa dengan potensi energi cukup besar [1][2]. Namun, pemanfaatan TKKS secara langsung sebagai bahan bakar padat masih terkendala oleh tingginya kadar volatil, rendahnya densitas energi, dan kestabilan termal yang kurang baik. Karakteristik tersebut menyebabkan proses pembakaran biomassa menjadi kurang efisien dan tidak stabil sehingga diperlukan upaya peningkatan kualitas termal melalui proses termokimia [3][4].

Hydrothermal Carbonization (HTC) merupakan salah satu metode termokimia yang efektif untuk meningkatkan reaksi dehidrasi, depolimerisasi, dan penyusunan ulang struktur karbon. Variasi suhu HTC terutama pada rentang 180°C dan 210°C diketahui berpengaruh signifikan terhadap pembentukan hidrokarbon aromatik serta peningkatan stabilitas termal. Selain itu kondisi proses dalam penggunaan katalis juga dapat mempercepat reaksi dan mendorong terjadinya modifikasi struktur lignoselulosa [5][6]. Ekstrak belimbing wuluh yang kaya akan senyawa asam organik berpotensi menjadi katalis alami yang mampu menurunkan energi aktivasi, mempercepat reaksi dehidrasi, serta memperbaiki karakteristik termal biomassa [7]. Sejauh ini, penelitian mengenai TKKS yang dicampur dengan ekstrak belimbing wuluh masih terbatas, terutama terkait evaluasi parameter termodinamika pembakarannya seperti energi bebas Gibbs (ΔG), entalpi (ΔH), dan entropi (ΔS). Parameter ini sangat penting untuk mengetahui sifat spontanitas reaksi, kebutuhan energi,

serta tingkat keteraturan sistem selama proses pembakaran [8][9]. Pada analisis termodinamika pembakaran dari hasil TGA memungkinkan evaluasi detail terhadap dua tahap utama degradasi biomassa yaitu Stage I (dehidrasi dan awal devolatilisasi) dan Stage II (devolatilisasi utama dan pembentukan residu karbon). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku termodinamika pembakaran pada sampel RAW TKKS, HTC 180, dan HTC 210 yang di proses dengan ekstrak belimbing wuluh. Melalui pengukuran ΔG , ΔH , dan ΔS pada kedua tahap degradasi massa, penelitian ini memberikan gambaran mengenai pengaruh modifikasi biomassa terhadap kestabilan termal dan kelayakan sebagai bahan bakar biomassa berkelanjutan.

TINJAUAN PUSTAKA

Biomassa tandan kosong kelapa sawit (TKKS) merupakan limbah lignoselulosa yang melimpah dan memiliki potensi besar sebagai sumber energi terbarukan. TKKS tersusun atas selulosa, hemiselulosa, dan lignin, yang masing-masing memberikan kontribusi terhadap perilaku degradasi termalnya. Selulosa dan hemiselulosa cenderung terdegradasi pada suhu sedang dengan rentang (200-350°C), sementara lignin memiliki rentang degradasi lebih luas yang berkontribusi pada kestabilan termal biomassa [10]. Namun demikian, tingginya kadar volatil, rendahnya densitas energi, dan kestabilan termal yang kurang baik membuat TKKS membutuhkan proses praperlakuan sebelum digunakan sebagai bahan bakar biomassa yang efisien [11].

Salah satu metode peningkatan kualitas biomassa yang banyak digunakan adalah *Hydrothermal Carbonization* (HTC). Proses ini berlangsung pada kondisi air subkritis, umumnya pada suhu 180-210°C, yang memicu reaksi dehidrasi, depolimerisasi, dan kondensasi [12]. Reaksi-reaksi tersebut menghasilkan *hydrochar*

dengan kandungan karbon lebih tinggi, kadar volatil lebih rendah, serta struktur yang lebih aromatik dibandingkan bahan mentahnya [13]. Variasi suhu dalam proses HTC, misalnya 180°C dan 210°C dapat menghasilkan perubahan signifikan pada karakteristik termal dan kimia biomassa. Oleh karena itu penting untuk memahami pengaruh suhu HTC terhadap peningkatan stabilitas termal hasil pengolahannya.

Untuk mengevaluasi perilaku termal TKKS, *thermogravimetri analysis* (TGA) digunakan sebagai metode analisis utama. TGA memungkinkan pengamatan perubahan massa biomassa akibat pemanasan bertahap, memberikan gambaran mengenai proses dehidrasi, devolatilisasi utama, dan pembentukan residu karbon [14]. Melalui kurva TGA dan DTG, dinamika degradasi dapat diidentifikasi berdasarkan tahapan-tahapannya. Selain itu data TGA dapat digunakan untuk menghitung parameter termodinamika pembakaran seperti energi bebas Gibbs (ΔG), entalpi (ΔH), dan entropi (ΔS) guna memahami sifat energi dan keteraturan molekul selama proses pembakaran [15].

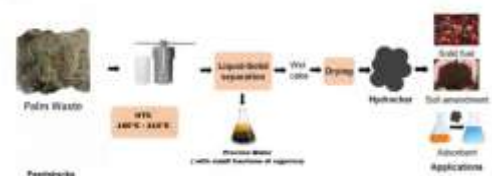
Nilai ΔG berkaitan dengan spontanitas reaksi, ΔH menggambarkan energi apa yang dibutuhkan atau dilepaskan, sedangkan ΔS menunjukkan tingkat perubahan keteraturan struktural. Analisis ketiga parameter ini sangat penting untuk mengevaluasi kelayakan biomassa sebagai bahan bakar. Dalam konteks ini, penggunaan ekstrak belimbing wuluh menjadi menarik karena kandungan asam organiknya berpotensi sebagai katalis alami yang dapat mempercepat reaksi dehidrasi, menurunkan energi aktivasi, serta membentuk struktur karbon yang lebih stabil [16][17]. meskipun memiliki potensi tersebut, penelitian mengenai pengaruh ekstrak belimbing wuluh terhadap karakteristik termal dan termodinamika TKKS masih terbatas, sehingga studi yang lebih mendalam

diperlukan untuk memahami kontribusi secara ilmiah.

METODE

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik termodinamika pembakaran biomassa TKKS dalam bentuk RAW, HTC 180 dan HTC 210 yang di campur dengan ekstrak belimbing wuluh. Seluruh metode disusun secara sistematis agar hasil penelitian dapat direplikasi serta memberikan gambaran yang komprehensif terhadap perilaku termal biomassa. Bahan TKKS yang digunakan terlebih dahulu dibersihkan dari kotoran, dikeringkan untuk menghilangkan kadar air dan residu lainnya, kemudian digiling hingga mencapai ukuran partikel yang seragam. Ekstrak belimbing wuluh diperoleh melalui proses penghancuran dan penyaringan hingga menghasilkan larutan asam organik alami, yang kemudian dicampurkan dengan TKKS sesuai komposisi dengan perbandingan 1:10 (1 gram biomassa TKKS dan 10 mL ekstrak belimbing wuluh) sebelum masuk ke tahap *Hydrothermal Carbonization* (HTC).

Instalasi Penelitian



Gambar 1. Skema instalasi *hydrothermal carbonization* (HTC)

Proses HTC dilakukan dalam reaktor tertutup pada dua variasi suhu yaitu 180°C dan 210°C, dengan kondisi air subkritis yang memungkinkan terjadinya reaksi dehidrasi, depolimerisasi, dan kondensasi. Setelah proses berlangsung selama waktu 8 jam pengovenan, hydrochar yang terbentuk dipisahkan, dikeringkan, dan di simpan sebagai sampel HTC 180 dan HTC 210. Selanjutnya seluruh sampel diuji menggunakan *Thermogravimetri Analysis* (TGA) untuk mengidentifikasi perubahan massa akibat pemanasan

bertahap. Sampel ditempatkan dalam crucible TGA dan dipanaskan dari suhu 30°C hingga 1000°C dengan laju pemanasan konstan. Data TGA dan DTG yang diperoleh digunakan untuk mengamati dua tahap degradasi utama yaitu Stage I (dehidrasi dan awal devolatilisasi) dan Stage II (devolatilisasi utama serta pembentukan residu karbon). Berdasarkan data TGA tersebut, dilakukan perhitungan yang meliputi parameter termodinamika pembakaran yaitu, energi bebas Gibbs (ΔG), entalpi (ΔH), dan entropi (ΔS). Perhitungan ini bertujuan memberikan pemahaman mengenai spontanitas reaksi, kebutuhan energi, dan tingkat keteraturan sistem selama proses pembakaran biomassa.

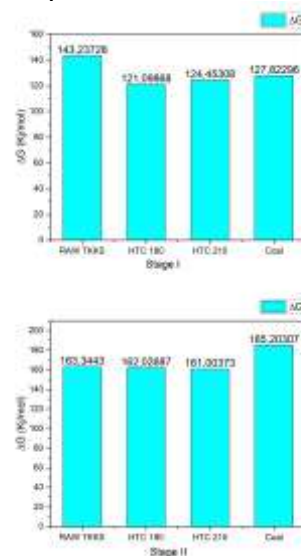
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis TGA menunjukkan bahwa RAW TKKS, HTC 180, dan HTC 210 memiliki pola degradasi termal yang berbeda sebagai akibat dari perlakuan HTC dan penambahan ekstrak belimbing wuluh, pada kurva DTG, sampel RAW TKKS memperlihatkan penurunan massa yang lebih tajam pada tahap devolatilisasi menandakan tingginya kandungan volatil dan rendahnya stabilitas termal. Sebaliknya sampel HTC 180 dan HTC 210 menunjukkan penurunan volatil yang lebih landai serta pembentukan residu karbon yang lebih stabil, menandakan bahwa proses HTC berhasil memperbaiki struktur biomassa.

a. Gibbs Free Energy (ΔG)

pada tahap pertama (Stage I) mempresentasikan proses dekomposisi volatil ringan seperti air, zat ekstraktif, serta sebagian hemiselulosa nilai ΔG pada setiap sampel menunjukkan nilai yang bervariasi pada sampel RAW TKKS memiliki nilai yang cukup tinggi sebesar 143,23 kJ/mol, menunjukkan bahwa biomassa mentah masih memiliki molekul yang memerlukan energi yang relatif lebih besar untuk melepas komponen volatil yang masih kompleks dari struktur material dan juga

masih memiliki kelembapan yang tinggi. Sementara pada sampel HTC 180 dan HTC 210 memiliki nilai sebesar 121,09 kJ/mol dan 124,45 kJ/mol, di mana hal ini mengindikasikan bahwa perlakuan HTC telah menurunkan energi aktivasi pada pembakaran awal. Penurunan ini terjadi karena proses HTC mengakibatkan degradasi awal hemiselulosa, dan sebagian selulosa, serta membentuk struktur karbon yang lebih terorganisir dengan gugus fungsional, oksigen yang lebih sedikit, sehingga material menjadi lebih mudah terdekomposisi.



Gambar 2. Grafik Gibbs Free Energy

Pada tahap kedua (Stage II) mempresentasikan dekomposisi tahap lanjut dari lignin, karbon padat, dan senyawa aromatik hasil dekomposisi, pada seluruh sampel menunjukkan nilai peningkatan ΔG yang hampir sama. Hal ini menunjukkan bahwa proses dekomposisi lanjutan memerlukan energi yang lebih besar karena melibatkan pemutusan ikatan C-C dan C-O yang lebih kuat. Sampel RAW TKKS memiliki nilai ΔG sebesar 163,34 kJ/mol, sampel HTC 180 memiliki nilai sebesar 162,02 kJ/mol, dan sampel HTC 210 memiliki nilai sebesar 161,003 kJ/mol. Penurunan kecil dari sampel HTC 180 dan 210 memperlihatkan bahwa hasil proses HTC memiliki

kestabilan termal yang meningkat tetapi lebih mudah terdegradasi. Nilai yang rendah ini menandakan biomassa hasil dari HTC dapat mengalami pembakaran awal yang lebih cepat, sehingga berpotensi digunakan sebagai bahan *co-firing* agen dalam sistem pembakaran batu bara.

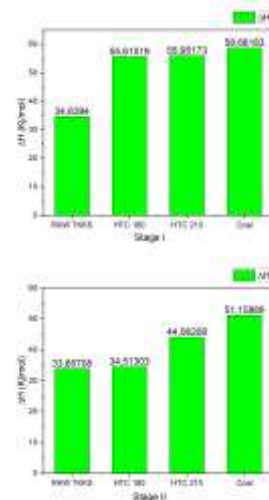
Berdasarkan hasil analisis ΔG dapat disimpulkan bahwa proses HTC pada variasi suhu 180°C dan 210°C mampu mengoptimalkan kestabilan termal biomassa TKKS dan meningkatkan efisien pembakaran meskipun belum stabil secara termodinamika. Dari segi karakteristik energi bebas Gibbs yang lebih rendah pada sampel HTC menjadikan bahan bakar padat alternatif yang reaktif dan potensial untuk substisusi parsial dalam sistem pembangkit berbasis *co-firing*.

b. Entalpi (ΔH)

pada tahap pertama nilai ΔH pada sampel RAW TKKS sebesar 34,63 kJ/mol kemudian meningkat pada HTC 180 sebesar 55,61 kJ/mol, diikuti dengan HTC 210 dengan nilai 55,95 kJ/mol. Peningkatan nilai entalpi ini menunjukkan bahwa proses HTC mampu meningkatkan kebutuhan energi panas selama proses devolatilisasi awal, di awal struktur biomassa hasil HTC memiliki ikatan yang lebih besar dibandingkan dengan bahan mentah (RAW TKKS) sehingga memerlukan energi lebih untuk memutuskan ikatan kimia dan melepaskan volatil.

Pada tahap kedua yang berkaitan dengan proses dekomposisi lanjut dari komponen seperti lignin, karbon tetap (fixed carbon) serta senyawa aromatik yang telah terbentuk, nilai ΔH pada RAW TKKS lebih rendah dibandingkan dengan tahap awal yaitu 33,85 kJ/mol, sedangkan pada HTC 180 memiliki nilai 34,51 kJ/mol, kemudian meningkat pada sampel HTC 210 sebesar 44,06 kJ/mol. Nilai ΔH pada setiap sampel memperlihatkan bahwa semakin tinggi suhu proses HTC, semakin besar energi

yang dibutuhkan untuk reaksi termal tahap lanjut. Hal ini menunjukkan bahwa struktur karbon pada HTC 210 telah berkembang menuju karakteristik bahan bakar padat dengan kestabilan termal yang lebih tinggi mendekati sifat batu bara.



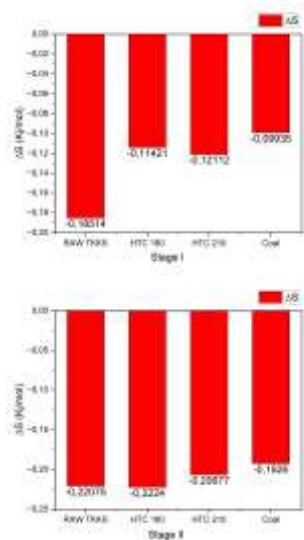
Gambar 3. Grafik Entalpi

Secara keseluruhan, hasil analisis entalpi memperlihatkan bahwa perlakuan HTC memberikan dampak positif terhadap efisien termal biomassa. Proses ini memperbaiki karakteristik energi dengan meningkatkan kekuatan ikatan internal struktur karbon, hal ini mendukung pemanfaatan hydrochar sebagai bahan campuran *co-firing* dengan batu bara, selain untuk menurunkan emisi karbon juga dapat mempercepat reaksi pembakaran awal berkat komponen volatil yang lebih reaktif.

c. Entropi (ΔS)

pada tahap pertama (Stage I) yang berkaitan dengan dekomposisi senyawa volatil ringan seperti hemiselulosa dan sebagian selulosa, nilai ΔS pada sampel RAW TKKS sebesar -0,81514 kJ/mol, kemudian pada sampel HTC 180 sebesar -0,11421 kJ/mol, dan pada sampel HTC 210 memiliki nilai sebesar -0,12112 kJ/mol. Peningkatan nilai ΔS (ke arah nol) menunjukkan bahwa perlakuan HTC mengubah struktur biomassa menjadi lebih terorganisir secara termal. Hal ini disebabkan oleh hilangnya gugus

hidroksil dan karbositat selama proses HTC berlangsung yang mengurangi kompleksitas molekul dan meningkatkan keteraturan sistem yang lebih stabil dengan tingkat entropi yang lebih rendah.



Gambar 4. Diagram Entropi

Sedangkan pada tahap kedua (Stage II) yang berhubungan dengan dekomposisi lanjut dari lignin, ikatan aromatik, dan pembentukan karbon tetap (*fixed carbon*), nilai ΔS menunjukkan pola serupa namun dengan nilai yang lebih rendah lagi. Pada sampel RAW TKKS mencatat nilai -0,22075 kJ/mol, HTC 180 dengan nilai -0,2224 kJ/mol, dan pada HTC 210 sebesar -0,2067 kJ/mol, hasil nilai ΔS yang rendah pada biomassa menunjukkan bahwa proses pembentukan fase padat karbon telah terjadi disertai dengan peningkatan keteraturan sistem yang signifikan, di mana komponen organik kompleks mengalami kondensasi menjadi struktur karbon aromatik.

Kecenderungan penurunan absolut nilai ΔS setelah proses HTC menunjukkan bahwa biomassa hasil karbonisasi mengalami transformasi menuju struktur karbon yang lebih stabil dan terorganisir, menyerupai karakteristik batu bara. Proses ini memperlihatkan bahwa HTC mampu menginduksi reaksi dehidrasi dan aromatisasi yang menghasilkan

penurunan ketidakaturan molekul dan meningkatkan efisiensi pembakaran. Dengan demikian nilai ΔS yang lebih rendah sampel HTC 210 dibandingkan dengan sampel RAW TKKS menjadi indikasi bahwa sistem telah mencapai keseimbangan termodinamika yang lebih stabil, sesuai dengan pembentukan *fixed carbon* yang berperan dalam mempertahankan laju pembakaran yang konstan dan efisien.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, menunjukkan hasil bahwa HTC yang dicampur dengan ekstrak belimbing wuluh mampu memberikan peningkatan signifikan terhadap termal biomassa tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Proses HTC pada suhu 180°C dan 210°C terbukti mampu menurunkan kandungan volatil, memperbaiki struktur karbon, serta mampu meningkatkan ketahanan biomassa terhadap degradasi termal. Hal ini dapat dilihat dari adanya peningkatan nilai energi bebas Gibbs (ΔG) dan entalpi (ΔH) pada kedua tahap degradasi, yang menunjukkan bahwa struktur biomassa pasca perlakuan memiliki ikatan yang lebih kuat dan memerlukan energi yang lebih besar untuk mengalami pemutusan ikatan. Selain itu, penurunan nilai entropi (ΔS) mengindikasikan bahwa proses HTC menghasilkan struktur internal biomassa yang lebih teratur, terutama pada perlakuan suhu tinggi. Kombinasi HTC dan penambahan ekstrak belimbing wuluh terbukti efektif dalam mempercepat proses dehidrasi dan membentuk struktur karbon aromatik yang lebih stabil. Secara keseluruhan, sampel HTC 210 merupakan perlakuan dengan kinerja termal terbaik dan memiliki potensi paling tinggi untuk dikembangkan sebagai bahan bakar biomassa berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. Sisuthog, N. Prasongthum, A. Suemanotham, and Y. Thanmongkhon, "Indonesian

- Journal of Science & Technology High-Porosity Hydrochar From Oil Palm Empty Fruit Bunches Via Single-Step Hydrolytic Agent-Assisted Hydrothermal Carbonization,” vol. 9, pp. 709–720, 2024.
- [2] C. K. Fanezouné, A. Dhahak, J. Peixinho, and H. El Bari, “Thermogravimetric analysis and kinetic modeling for empty fruit bunch date palm pyrolysis,” *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 27, no. April, 2024, doi: 10.1016/j.biteb.2024.101916.
- [3] H. J. Kim, C. Park, R. Nepal, and S. C. Oh, “Hydrothermal treatment of empty fruit bunches to enhance fuel characteristics,” *Energies*, vol. 14, no. 5, 2021, doi: 10.3390/en14051467.
- [4] A. Jain, R. Balasubramanian, and M. P. Srinivasan, “Hydrothermal conversion of biomass waste to activated carbon with high porosity: A review,” *Chem. Eng. J.*, vol. 283, pp. 789–805, 2016, doi: 10.1016/j.cej.2015.08.014.
- [5] D. Sangaré *et al.*, “Hydrothermal carbonization of cocoa shell: hydrochar characterization, kinetic triplets, and thermodynamic aspects of the process,” *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 14, no. 1, pp. 93–108, 2024, doi: 10.1007/s13399-022-02314-6.
- [6] S. Başakçılardan Kabakcı and S. S. Baran, “Hydrothermal carbonization of various lignocellulosics: Fuel characteristics of hydrochars and surface characteristics of activated hydrochars,” *Waste Manag.*, vol. 100, pp. 259–268, 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2019.09.021.
- [7] B. M. Patil, S. K. Shinde, A. A. Jagdale, S. D. Jadhav, and S. S. Patil, “Fruit Extract of Averrhoa bilimbi: A Green Neoteric Micellar Medium for Isoxazole and Biginelli-Like Synthesis,” *Res. Chem. Intermed.*, vol. 47, no. 10, pp. 4369–4398, 2021, doi: 10.1007/s11164-021-04539-y.
- [8] L. Xinjie, S. Singh, H. Yang, C. Wu, and S. Zhang, “A thermogravimetric assessment of the tri-combustion process for coal, biomass and polyethylene,” *Fuel*, vol. 287, no. October 2019, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119355.
- [9] Q. Lang *et al.*, “Combustion characteristics, kinetic and thermodynamic analyses of hydrochars derived from hydrothermal carbonization of cattle manure,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 10, no. 1, p. 106938, 2022, doi: 10.1016/j.jece.2021.106938.
- [10] R. P. Nikula, S. Ahmadi, V. B. Kimbi Yaah, H. Haq, V. Tuomi, and M. Ruusunen, “Identification and control of hydrothermal carbonisation process with energy consumption assessment,” *Energy Convers. Manag. X*, vol. 24, p. 100808, 2024, doi: 10.1016/j.ecmx.2024.100808.
- [11] B. Ercan, K. Alper, S. Ucar, and S. Karagoz, “Comparative studies of hydrochars and biochars produced from lignocellulosic biomass via hydrothermal carbonization, torrefaction and pyrolysis,” *J. Energy Inst.*, vol. 109, no. March, p. 101298, 2023, doi: 10.1016/j.joei.2023.101298.
- [12] 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.

- [13] D. Prasetyo, A. F. Alhikami, and M. Margianto, "Analisis luas permukaan dan struktur pori pada permukaan hydrochar menggunakan teknik hydrothermal carbonization dari limbah tandan kosong sawit," *J. Tek. Mesin*, vol. 22, no. 2, pp. 28–32, 2025.
- [14] K. H. Setiawan, E. Marlina, and A. Raharjo, "EFEKTIVITAS KENAIKAN KONSENTRASI NaOH AKTIVASI HYDROCHAR BATOK KELAPA TERHADAP KINETIKA MODEL DEKOMPOSISI CO-FIRING BATUBARA SUB-BITUMINOUS," *J. Tek. Mesin*, vol. 22, no. 6, pp. 6–14, 2025.
- [15] D. R. Abi Sukma, F. Alhikami, and C. Yazirin, "Analisis Termodinamika Pembakaran Pada Campuran Bahan Bakar Batubara Sub-Bituminous Dengan Limbah Tandan Kosong Sawit," *J. Tek. Mesin*, vol. 22, no. 6, pp. 41–52, 2025.
- [16] M. A. Abdelrahman, A. F. Alhikami, and E. Marlina, "A study of structural and elemental properties characterization of hydrochar derived from empty fruit bunches through hydrothermal carbonization," pp. 81–87.
- [17] M. Ilham, A. Habibi, M. R. Aldiansyah, and N. Ahmad, "A Study Of Bio-Oil Derived From Rice Husk Using Pyrolysis As A Potential Gasoline Additive," vol. 8, no. 01, pp. 1–9, 2025, doi: 10.25299/rem.2025.vol8(01).20239.