

Analisis Termodinamika Bahan Bakar *Bio-char* Campuran *Arabica* Dan Zeolit 10% Dengan Proses Pirolisis

Dafa Farel Refansah¹, Ena Marlina², Akhmad Faruq Alhikami³

¹Teknik Mesin, Universitas Islam Malang, 21901052041@unisma.ac.id

²Teknik Mesin, Universitas Islam Malang, ena.marlina@unisma.ac.id

³ Teknik Mesin, Universitas Islam Malang, alhikami@unisma.ac.id

ABSTRAK

Peningkatan kebutuhan energi global serta keterbatasan sumber daya fosil mendorong pengembangan bahan bakar alternatif berbasis biomassa. Limbah ampas kopi arabika berpotensi dimanfaatkan sebagai energi terbarukan, namun kadar air yang tinggi dapat menurunkan efisiensi konversi termalnya. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik degradasi massa dan parameter termodinamika pembakaran *bio-char* hasil pirolisis ampas kopi *arabica* dengan penambahan zeolit 10% serta membandingkannya dengan batu bara *sub-bituminous* (COAL 100%). Proses pirolisis dilakukan menggunakan pemanas *microwave*, sedangkan karakterisasi termal dianalisis menggunakan *Thermogravimetric Analysis* (TGA/DTG) dengan laju pemanasan 10 °C/menit hingga 1000 °C dalam atmosfer nitrogen. Parameter termodinamika yang dikaji meliputi energi bebas Gibbs (ΔG), entalpi (ΔH), dan entropi (ΔS). Hasil menunjukkan bahwa *bio-char* kopi *arabica* berzeolit 10% memiliki degradasi massa yang lebih stabil dan dekomposisi termal yang lebih terkendali, sehingga berpotensi sebagai bahan bakar alternatif yang lebih stabil secara termal.

Kata kunci: *bio-char*, kopi *arabica*, Katalis zeolit, pirolisis, (TGA/DTG), termodinamika pembakaran.

ABSTRACT

The increasing global energy demand and the limited availability of fossil resources have driven the development of biomass-based alternative fuels. Spent Arabica coffee grounds show strong potential as a renewable energy source; however, their high moisture content can reduce thermal conversion efficiency. This study analyzes the mass degradation behavior and thermodynamic combustion parameters of biochar produced from the pyrolysis of Arabica coffee grounds with the addition of 10% zeolite and compares it with sub-bituminous (COAL 100%). Pyrolysis was conducted using microwave heating, while thermal characterization was performed through Thermogravimetric Analysis (TGA/DTG) at a heating rate of 10 °C/min up to 1000 °C under a nitrogen atmosphere. The evaluated thermodynamic parameters included Gibbs free energy (ΔG), enthalpy (ΔH), and entropy (ΔS). The results indicate that zeolite-assisted coffee biochar exhibits more stable mass degradation and a more controlled thermal decomposition range than sub-bituminous coal, demonstrating its potential as a thermally stable alternative fuel.

Keywords: Biochar, Arabica coffee, Catalyst Zeolite, Pyrolysis, Thermogravimetric analysis (TGA/DTG), Combustion, thermodynamic.

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi global terus meningkat seiring pertumbuhan populasi dan aktivitas industri, sementara ketergantungan pada energi fosil menimbulkan keterbatasan sumber daya serta dampak lingkungan berupa emisi gas rumah kaca dan pemanasan global [1]. Kondisi ini mendorong pengembangan energi terbarukan, salah satunya biomassa limbah ampas kopi yang jumlahnya melimpah dan memiliki nilai kalor relatif tinggi [2].

Ampas kopi merupakan biomassa lignoselulosa dengan kandungan selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang berpotensi dikonversi menjadi energi melalui proses termokimia. Namun, sifat higroskopis dan kadar air yang tinggi masih menjadi kendala utama, sehingga diperlukan perlakuan awal sebelum proses konversi dilakukan [3].

Pirolisis merupakan proses konversi termokimia yang menghasilkan tiga fraksi utama, padatan (*char*), cairan (*bio-oil*), dan gas [4]. Penelitian ini difokuskan pada pemanfaatan produk *char* sebagai bahan bakar padat yang dihasilkan dari biomassa melalui proses pirolisis [5]. Penambahan katalis dalam proses pirolisis dilaporkan memberikan pengaruh signifikan terhadap distribusi produk, khususnya menurunkan *yield* fraksi cair (*bio-oil*), di mana peningkatan konsentrasi katalis menyebabkan penurunan *yield liquid* yang dihasilkan [6]. Kondisi ini menunjukkan bahwa katalis berperan dalam mengarahkan reaksi dekomposisi biomassa menuju pembentukan produk padat yang lebih stabil. Oleh karena itu, penambahan katalis dalam proses pirolisis diharapkan dapat menjadi solusi untuk meningkatkan pemanfaatan limbah ampas kopi sebagai biomassa alternatif pengganti batu bara,

Analisis termodinamika diperlukan untuk memahami energi yang terlibat dalam berbagai proses konversi

energi, seperti pembakaran, perubahan fase, dan degradasi termal material. Parameter termodinamika yang meliputi energi bebas *Gibbs* (ΔG), entalpi (ΔH), dan entropi (ΔS) [7]. memberikan informasi penting mengenai spontanitas reaksi, kebutuhan energi, serta tingkat keteraturan sistem, sehingga proses energi dapat dianalisis dan dioptimalkan untuk aplikasi industri dan teknologi energi. Dalam konteks ini, *Thermogravimetric Analysis* (TGA) [8] merupakan metode yang efektif untuk mengevaluasi perubahan massa material akibat proses dekomposisi termal, evaporasi senyawa volatil, maupun reaksi oksidasi dan adsorpsi selama pemanasan.

Sejumlah penelitian terdahulu menunjukkan bahwa *bio-char* hasil pirolisis memiliki performa pembakaran yang lebih stabil, suhu pengapian lebih tinggi, serta reaktivitas yang lebih rendah dibandingkan biomassa mentah, sehingga lebih efisien secara energi karena laju pembakaran yang terkendali. Namun demikian, masih terdapat kesenjangan ilmiah dalam pengembangan teknologi pirolisis, khususnya terkait penggunaan pelarut dan katalis yang ramah lingkungan. Sebagian besar penelitian masih mengandalkan bahan kimia sintetis seperti asam sulfat dan asam fosfat yang meskipun efektif, bersifat korosif, berpotensi menghasilkan limbah berbahaya, serta meningkatkan biaya pengolahan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini mengusulkan pendekatan inovatif melalui pemanfaatan zeolit sebagai pelarut alami sekaligus katalis dalam proses pirolisis [9]. Kandungan silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) pada zeolit berpotensi menurunkan energi aktivasi, mempercepat reaksi pirolisis, serta

membantu pelepasan *moisture*, sehingga dapat meningkatkan rendemen dan mutu bio-briket tanpa menghasilkan residu berbahaya. Selain karakterisasi *fisikokimia*, penelitian ini juga menelaah aspek termodinamika pembakaran melalui analisis parameter ΔG , ΔH , dan ΔS untuk mengevaluasi efisiensi energi, spontanitas reaksi, dan kestabilan termal produk yang dihasilkan.

THERMOGRAVIMETRI ANALYSIS (TGA)

Thermogravimetri Analysis (TGA) adalah metode yang digunakan untuk mempelajari perubahan massa bahan saat dipanaskan dalam kondisi tertentu. Metode ini sangat berguna untuk membentuk karakteristik bahan bakar seperti batu-bara dan biomassa karena dapat menunjukkan proses dekomposisi, pengurangan massa, dan fase perubahan selama pemanasan.

TERMODINAMIKA PEMBAKARAN

Termodinamika pembakaran adalah cabang ilmu yang mempelajari proses energi yang terjadi saat bahan bakar terbakar, termasuk konversi energi kimia menjadi energi panas dan kerja. Proses ini melibatkan reaksi kimia antara bahan bakar dan oksigen, menghasilkan produk pembakaran seperti gas panas, karbon dioksida, dan uap air, serta pelepasan energi dalam bentuk panas termodinamika tersusun dari tiga pokok utama yaitu *gibbs free energy*, *enthalpy* dan *entropy*.

Gibbs Free Energi

Energi bebas *gibbs* merupakan fungsi termodinamika yang menunjukkan suatu reaksi berlangsung secara spontan dan tidak spontan pada kondisi temperatur dan tekanan tertentu untuk menyatakan energi maksimum yang tersedia dalam suatu sistem untuk

melakukan kerja pada kondisi suhu dan tekanan konstan.

$$\Delta G = E_a - R \times T_p \times \ln \left(\frac{k_b \times t_p}{h_A} \right)$$

Enthalpy

Entalpi merupakan reaksi untuk mempresentasikan jumlah panas yang dilepas atau diserap selama proses yang berlangsung. Untuk reaksi pembakaran sempurna nilai ΔH selalu negatif menandakan bahwa energi dilepas secara spontan saat proses pembakaran terjadi.

$$\Delta H = E_a - R \times T_p$$

Entropy

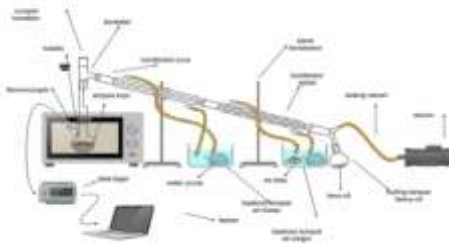
Entropy menggambarkan derajat ke tidak beraturan sistem dalam reaksi pembakaran terjadi peningkatan karena perubahan fase dan kenaikan jumlah molekul gas hasil reaksi, terutama ketika bahan bakar padat atau cair dikonversi menjadi gas seperti CO_2 dan H_2O . Peningkatan entropi mengindikasikan bahwa sistem menjadi lebih tidak teratur dan mendukung arah spontan reaksi.

$$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T_p}$$

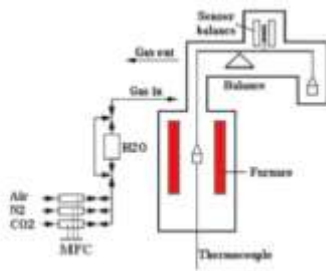
METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah *experimental*. Dilakukan pengamatan pada benda yang di uji secara aktual terhadap kopi arabika dengan campuran zeolit. Data dihasilkan dalam penelitian ini berupa produk pirolisis, di analisis dengan teknik termodinamika pembakaran kemudian menyimpulkan dan menentukan hasil penelitian yang telah dilakukan.

SKEMA INSTALASI PENELITIAN



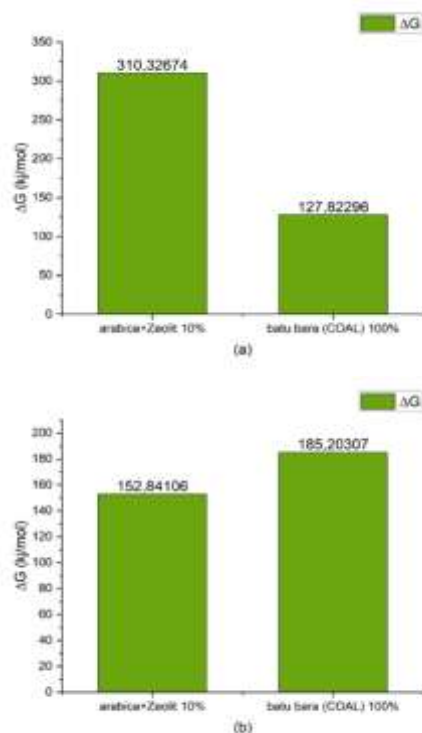
Gambar 1. Skema instalasi microwave proses pirolisis



Gambar 2. Skema instalasi TGA

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gibbs free energi

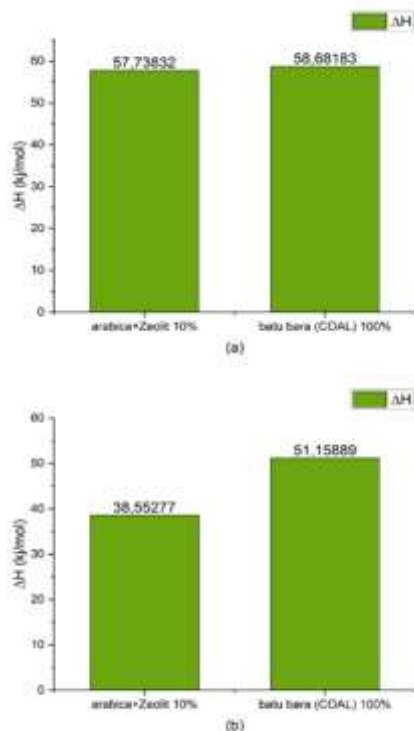


Gambar 3. Gibbs free energi, Arabica Zeolit10% dan Batu Bara *sub-bituminous* 100%.

Pada Gambar 3 menampilkan grafik yang menggambarkan nilai gibbs free energi : Pada *stage I*, campuran *arabica* + zeolit 10% memiliki nilai ΔG yang jauh lebih tinggi, yaitu 310,33 kJ/mol, dibandingkan batu bara *sub-bituminous* 100% yang hanya mencapai 127,82 kJ/mol. Nilai ΔG yang besar pada campuran *arabica* + zeolit 10% bahwa proses degradasi awal membutuhkan energi lebih tinggi dan bersifat kurang spontan, yang kemungkinan disebabkan oleh efek penyerapan zeolit terhadap uap air dan senyawa volatil ringan. Sementara itu, nilai ΔG yang rendah pada batu bara menunjukkan bahwa proses pelepasan *moisture* dan volatilitas awal berlangsung lebih mudah dan tidak memerlukan energi aktivasi yang besar.

Pada *stage II*, kecenderungan terbalik. Nilai ΔG batu bara meningkat menjadi 185,20 kJ/mol, lebih tinggi dibandingkan campuran *arabica* + zeolit 10% yang hanya sebesar 152,84 kJ/mol. Peningkatan ΔG pada batu bara *sub-bituminous* 100% mengindikasikan bahwa struktur karbon aromatik dan matriks hidrokarbon kompleks memerlukan energi lebih besar untuk terdegradasi pada tahap pirolisis utama, sehingga reaksi berlangsung kurang spontan. Sebaliknya, nilai ΔG yang lebih rendah pada campuran *arabica* + zeolit 10% menunjukkan bahwa keberadaan zeolit berperan sebagai katalis *adsorptif* yang menurunkan energi *aktivasi*, sehingga proses pemutusan ikatan organik berlangsung lebih mudah dan lebih reaktif pada tahap dekomposisi utama. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa campuran *arabica* + zeolit 10% memiliki hambatan energi tinggi pada pemanasan awal, namun menjadi lebih efisiensi pada tahap pirolisis utama; sementara batu bara *sub-bituminous* 100% bersifat lebih reaktif pada awal pemanasan tetapi membutuhkan energi lebih besar pada proses dekomposisi lanjutan.

Campuran *arabica* + zeolit 10 % dan batu bara *sub-bituminous* 100% menunjukkan perilaku termal yang berbeda. Campuran *arabica* + zeolit 10% memiliki hambatan energi lebih tinggi pada tahap awal sehingga proses degradasi kurang spontan, sedangkan batu bara *sub-bituminous* 100% lebih mudah terdegradasi pada tahap ini. Namun, pada tahap pirolisis utama campuran *arabica* + zeolit 10% menjadi lebih reaktif dan efisien karna peran zeolit yang menurunkan hambatan energi, sementara batu bara justru membutuhkan energi lebih besar. Dengan demikian, *arabica* + zeolit 10% *Enthalpy*



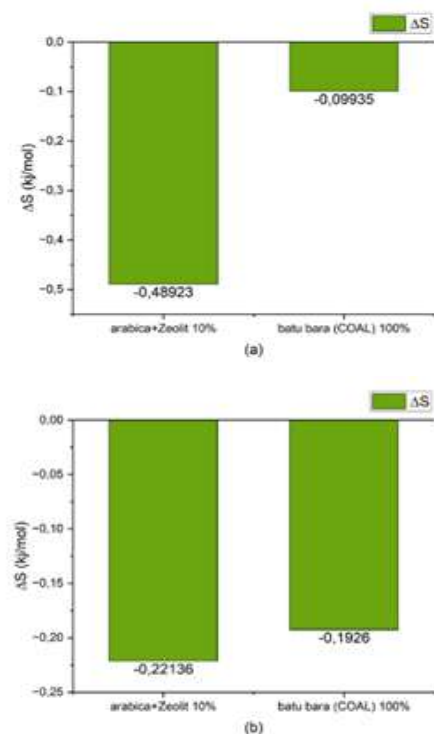
Gambar 4. *Enthalpy*, *Arabica* Zeolit 10% dan Batu Bara *sub-bituminous* 100%.

Pada Gambar 4 menampilkan grafik yang menggambarkan nilai *enthalpy* ; Pada *Stage I*, nilai ΔH sampel *arabica* + zeolit 10% (57,74 kJ/mol) hampir setara dengan batu bara *sub-bituminous* 100% (58,68 kJ/mol), menunjukkan bahwa kebutuhan energi untuk memulai dekomposisi awal yang

didominasi oleh pelepasan *moisture* relatif serupa meskipun karakter material berbeda. Hal ini mengindikasikan kemiripan karakteristik *aktivasi* termal awal antara biomassa termodifikasi zeolit 10% dan batu bara *sub-bituminous* 100%.

Pada *Stage II*, perbedaan ΔH menjadi lebih signifikan, di mana *arabica* + zeolit 10% memiliki nilai lebih rendah (38,55 kJ/mol) dibandingkan batu bara *sub-bituminous* 100% (51,16 kJ/mol). Nilai ΔH yang lebih rendah pada biomassa menunjukkan peran zeolit sebagai katalis termal yang menurunkan kebutuhan energi selama dekomposisi lanjutan dan pembentukan karbon residu. Secara keseluruhan, *arabica* + zeolit 10% memiliki kebutuhan energi awal yang sebanding dengan batu bara, namun lebih efisien secara termal pada tahap dekomposisi lanjutan.

Entropy



Gambar 5. *Entropy*, *Arabica* Zeolit 10% dan Batu Bara *sub-bituminous* 100%.

Pada Gambar 5 menampilkan grafik yang menggambarkan nilai *entropy* : Pada *Stage I*, kedua sampel menunjukkan nilai ΔS negatif, yaitu campuran *arabica* + zeolit 10% ($-0,0489$ kJ/mol) dan batu bara *sub-bituminous* 100% ($-0,0994$ kJ/mol), yang menandakan penurunan ketidakteraturan sistem selama dekomposisi awal. Nilai ΔS yang lebih negatif pada campuran *arabica* + zeolit menunjukkan proses degradasi yang lebih terarah akibat interaksi biomassa zeolit.

Pada *Stage II*, nilai ΔS tetap negatif namun dengan magnitudo lebih kecil, yaitu $-0,2214$ kJ/mol untuk campuran *arabica* + zeolit 10% dan $-0,1926$ kJ/mol untuk batu bara, mengindikasikan terbentuknya struktur residu yang lebih stabil. Secara keseluruhan, campuran *arabica* + zeolit 10% menunjukkan proses degradasi yang lebih terkontrol dibandingkan batu bara *sub-bituminous* 100%.

KESEIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis termal dan termodinamika pembakaran, *bio-char* hasil pirolisis dari kopi *arabica* +zeolit 10% dan batu bara *sub-bituminous* 100% sebagai berikut;

1. Dari sisi laju degradasi massa, *bio-char* kopi arabika dan zeolit mengalami penurunan massa yang lebih rendah dan lebih stabil pada rentang suhu tinggi, yang mengindikasikan terbentuknya struktur karbon aromatik yang lebih teratur serta menurunnya kandungan zat terbang akibat peran katalitik zeolit selama proses pirolisis. Sebaliknya, batu bara *sub-bituminous* 100% menunjukkan degradasi massa yang lebih besar akibat sifat reaktivitas termalnya yang masih tinggi.
2. Ditinjau dari energi bebas *Gibbs* (ΔG), *bio-char* kopi *arabica* berzeolit memiliki nilai ΔG yang lebih rendah

dan cenderung negatif pada suhu pembakaran, yang menandakan bahwa proses reaksi berlangsung lebih spontan dan membutuhkan *energy* aktivasi yang lebih kecil dibandingkan batu bara *sub-bituminous* 100%. Hal ini menunjukkan efisiensi termodinamik yang lebih baik serta kestabilan reaksi pembakaran pada *bio-char* hasil pirolisis.

3. Sementara itu, analisis entalpi (ΔH) dan entropi (ΔS) menunjukkan bahwa *bio-char* kopi *arabica* berzeolit memiliki perubahan entalpi yang lebih rendah serta perubahan entropi yang lebih terkendali, mencerminkan proses reaksi yang lebih teratur dan stabil secara termal. Batu bara *sub-bituminous* 100%, di sisi lain, memperlihatkan perubahan entalpi dan entropi yang lebih tinggi akibat pelepasan energi dan tidak teratur struktur yang lebih besar selama proses degradasi termal. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa *bio-char* kopi *arabica* dengan penambahan zeolit 10% berpotensi sebagai bahan bakar padat alternatif yang lebih stabil, efisien, dan ramah lingkungan dibandingkan batu bara *sub-bituminous* 100%.

SARAN

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengkaji variasi persentase zeolit dan kondisi pirolisis (suhu, waktu, dan daya) guna memperoleh performa *bio-char* yang lebih optimal.
2. Perlu dilakukan analisis lanjutan terhadap sifat pembakaran dan emisi gas buang agar kelayakan *bio-char* sebagai bahan bakar alternatif dapat dievaluasi secara menyeluruh.
3. Disarankan menggunakan metode karakterisasi tambahan selain TGA/DTA untuk memperkuat analisis stabilitas termal dan efisiensi energi *bio-char*

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. E. A. International and E. Agency, "INTERNATIONAL ENERGY AGENCY," 2023.
- [2] Lutfi, "PIROLISIS CAMPURAN BIOMASSA LIMBAH AMPAS KOPI DAN LIMBAH PLASTIK POLYPROPYLENE," vol. 05, pp. 42–55, 2025.
- [3] L. Istiqomah, S. Laili, H. Zayadi, F. Abiotik, and V. Kopi, "Estimasi Karbon pada Tegakan Varietas Kopi Arabika (*Coffea arabica*) Di Lahan Agroforestri Precet Wilayah Resort Pemangkuan Hutan Wagir KPH Malang," *J. Ilm. sains alami(known natrure)*, vol. 5, 2022.
- [4] N. D. M. dan N. I. Azkiya, "PEMANFAATAN AMPAS TAHU PADA PEMBUATAN BRIKET SEBAGAI BAHAN BAKAR ALTERNATIF," vol. 10, no. 9, pp. 641–652, 2024.
- [5] S. Joseph, A. L. Cowie, and L. Van Zwieten, "How biochar works , and when it doesn ' t: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar," no. June, pp. 1731–1764, 2021, doi: 10.1111/gcbb.12885.
- [6] N. M. Lukmana, E. Marlina, and N. Robbi, "Pengaruh Penambahan Katalis Tanah Merah Pada Biomassa Kopi Arabica Terhadap Hasil Produksi Microwave Assisted Pyrolysis," pp. 29–32, 2025.
- [7] D. Rangga, "Analisis Termodinamika Pembakaran Pada Campuran Bahan Bakar Batubara Sub- Bituminous Dengan Limbah Tandan Kosong Sawit Deaz," 2025.
- [8] W. Chaeruni, "Karakteristik Pembakaran Campuran Batubara dan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) Menggunakan Analisis Termogravimetri Deferensial Temperatur (TG-DTA)," vol. 8, no. 3, pp. 1629–1638, 2024.
- [9] S. Novita, S. Ulfa, N. Sciences, U. N. Surabaya, and Z. Alam, "PEMANFAATAN KATALIS ZEOLIT ALAM TERAKTIVASI DALAM SINTESIS BIODIESEL DENGAN METODE ESTERIFIKASI DAN TRANSESTERIFIKASI," vol. 11, no. 3, pp. 165–181, 2022.