

Analisis Termodinamika Pembakaran *Bio-char* Kopi Arabika Tanah Merah 10% Melalui Proses Pirolisis

Cristian Leonardo¹, Ena Marlina², Akhmad Faruq Alhikami³.

¹ Teknik Mesin, Universitas Islam Malang, 21901052064@unisma.ac.id

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

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

ABSTRAK

Peningkatan kebutuhan energi dan ketergantungan bahan bakar fosil mendorong pengembangan sumber energi alternatif berbasis Biomassa. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik termodinamika pembakaran *Bio-char* kopi Arabika dengan katalis Tanah Merah 10% melalui proses pirolisis, serta membandingkannya dengan Batu Bara Sub-Bituminus 100%. Hasil produk pirolisis berupa *char* di analisis menggunakan *Thermogravimetric Analysis* (TGA/DTG) untuk menentukan parameter termodinamika meliputi, laju degradasi massa, energi bebas gibbs (ΔG), entalpi (ΔH), dan entropi (ΔS). Hasil analisis menunjukkan bahwa *Bio-char* Arabika dengan katalis Tanah Merah mengalami tahapan degradasi termal yang jelas dan memiliki karakteristik pembakaran yang kompetitif dibandingkan Batu Bara Sub-Bituminus. Nilai ΔG yang diperoleh menunjukkan kecenderungan reaksi berlangsung spontan pada suhu tertentu, sedangkan nilai ΔH dan ΔS mengindikasikan bahwa proses pembakaran bersifat endotermik dengan peningkatan ketidakteraturan sistem selama reaksi berlangsung. Penambahan katalis tanah merah berperan dalam meningkatkan performa termal serta efisiensi reaksi pirolisis.

Kata kunci: Energi alternatif, Biomassa, Termodinamika, Kopi arabika, Katalis tanah merah.

ABSTRACT

The increasing energy needs and dependence on fossil fuels encourage the development of alternative energy sources based on biomass. This study aims to analyze the thermodynamic characteristics of the combustion of Arabica coffee Bio-char with 10% Red Soil catalyst through the pyrolysis process, and compare it with 100% Sub Bituminous Coal. The pyrolysis product in the form of char was analyzed using Thermogravimetric Analysis (TGA/DTG) to determine thermodynamic parameters including, mass degradation rate, Gibbs free energy (ΔG), enthalpy (ΔH), and entropy (ΔS). The results of the analysis show that Arabica Bio-char with Red Soil catalyst undergoes clear thermal degradation stages and has competitive combustion characteristics compared to Sub-Bituminous Coal. The ΔG value obtained indicates a tendency for the reaction to occur spontaneously at a certain temperature, while the ΔH and ΔS values indicate that the combustion process is endothermic with increased system irregularity during the reaction. The addition of red soil catalyst plays a role in improving the thermal performance and efficiency of the pyrolysis reaction.

Keywords: Alternative energy, Biomass, Thermodynamics, Arabica coffee, Red soil catalyst.

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi di Indonesia terus meningkat seiring pertumbuhan populasi, sementara ketersediaan bahan bakar fosil semakin menurun sehingga ketergantungan terhadap energi fosil menjadi permasalahan serius. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan sumber energi alternatif yang berkelanjutan [1]. Salah satu potensi energi alternatif yang dapat dikembangkan adalah biomassa kopi arabika, yang pemanfaatannya di Indonesia masih belum optimal [2].

Limbah ampas kopi merupakan sumber lignoselulosa yang melimpah, namun tingkat pemanfaatannya masih sangat rendah, yakni sekitar 2% atau 7.640 ton dari total 382.000 ton limbah yang dihasilkan. Apabila tidak dikelola dengan baik, limbah ini berpotensi mencemari lingkungan [3]. Secara karakteristik, kopi arabika memiliki potensi sebagai bahan bakar padat dengan nilai kalor sebesar 5084 kal/g, kadar air 10%, kadar abu rendah 1,46%, serta karbon terikat sekitar 65%, sehingga berpotensi menjadi biomassa berkualitas [4]. Kandungan lignoselulosa pada kopi arabika berperan penting dalam produksi *bio-char*, *bio-oil*, dan gas melalui proses pirolisis, yang memiliki keunggulan berupa pemanasan cepat, efisien, dan merata dibandingkan proses lainnya [2].

Pirolisis merupakan proses dekomposisi termal biomassa yang berlangsung tanpa kehadiran oksigen atau dalam atmosfer gas *inert*, sehingga oksidasi tidak terjadi selama proses berlangsung. Pada proses ini, bahan baku yang berasal dari sumber daya terbarukan dikonversi menjadi tiga fraksi utama, yaitu bahan bakar padat (*char*), bahan bakar cair (*bio-oil*), dan bahan bakar gas [5]. Penambahan katalis berperan dalam meningkatkan efektivitas proses dekomposisi serta

memengaruhi volume dan massa *char* yang dihasilkan. Katalis juga memiliki kemampuan mengikat air, sehingga dapat meningkatkan proses penguapan air dari biomassa dan menghasilkan *char* dengan kadar air lebih rendah. Dengan demikian, penambahan katalis pada proses pirolisis berpotensi menghasilkan produk *char* dengan kualitas yang lebih baik serta meningkatkan pemanfaatan limbah kopi sebagai bahan bakar alternatif pengganti batu bara [6].

Analisis termodinamika pembakaran diperlukan untuk mengevaluasi performa, efisiensi, dan spontanitas reaksi hasil pirolisis. Parameter termodinamika seperti perubahan energi bebas Gibbs (ΔG), entalpi (ΔH), dan entropi (ΔS) digunakan untuk menentukan kebutuhan energi dan kecenderungan berlangsungnya reaksi pembakaran. Selain itu, analisis Thermogravimetric Analysis (TGA) diperlukan untuk mengkaji perubahan massa material akibat kenaikan suhu [7].

THERMOGRAVIMETRI ANALYSIS (TGA)

Thermogravimetri Analysis (TGA) merupakan teknik analisis termal dimana massa suatu zat diamati sebagai fungsi suhu atau waktu ketika sampel mengalami suhu terkontrol dan lingkungan atmosfer. TGA dapat digunakan pada proses pirolisis mempunyai manfaat tambahan yang dapat digunakan seperti mengamati karakteristik pirolisis dan perilaku termal bahan baku yang digunakan. TGA juga bisa dapat digunakan untuk mengembangkan parameter kinetik yang berguna untuk membantu memahami mekanisme reaksi [8].

TERMODINAMIKA PEMBAKARAN

Termodinamika adalah cabang ilmu yang mempelajari tentang energi dan perubahan, hubungan perubahan tersebut dengan berbagai sifat sistem, termodinamika adalah *lingua franca* bagi peneliti lintas bidang untuk mengenai diskusi energi dan perubahannya termodinamika tersusun dari tiga pokok utama yaitu *gibbs free energy*, *enthalpy* dan *entropy* [9].

Gibbs Free Energy

Energi bebas Gibbs merupakan bentuk dari potensial pada termodinamika yang berguna untuk menghitung besar maksimum kerja *reversible* yang terdapat pada sistem termodinamika, kondisi berupa suhu, dan tekanan tetap.

$$\Delta G = E_a + R \times T_p \times \ln \left(\frac{K_b \times T_p}{hA} \right)$$

Enthalpy

Entalpi merupakan besaran termodinamika yang mempersentasikan total energi suhu pada sistem, yaitu energi gabungan antara energi internal dan yang digunakan, entalpi biasanya dinyatakan dalam bentuk perubahan entalpi (ΔH) untuk mengukur energi yang terlibat pada suatu proses.

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

Entropy

Entropi merupakan besaran termodinamika berupa gambaran ketidakteraturan sistem dan energi didalam yang tidak tersedia dalam temperatur tertentu.

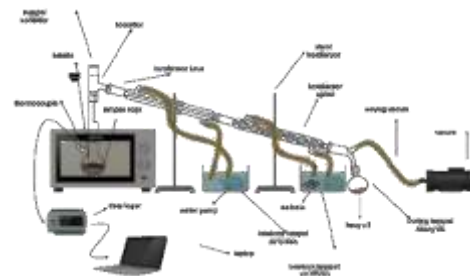
$$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T_p}$$

METODE PENELITIAN

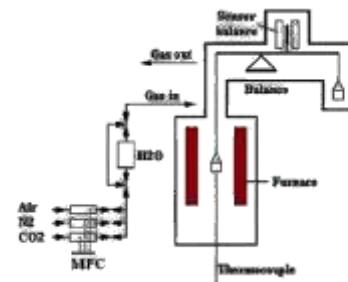
Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimental. Dilakukan pengamatan pada benda yang di uji secara aktual terhadap kopi arabika

dengan campuran tanah merah. Data hasil penelitian berupa produk pirolisis, di analisis dengan teknik termodinamika pembakaran kemudian menyimpulkan dan menentukan hasil penelitian yang telah dilakukan.

SKEMA INSTALASI PENEITIAN



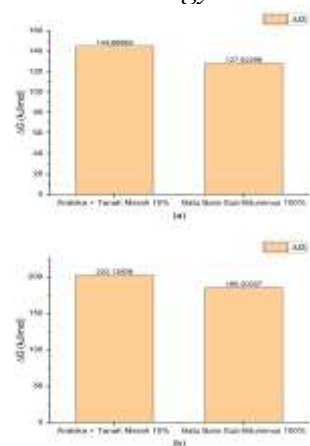
Gambar 1. Skema alat *microwave asissisted pyrolysis*



Gambar 2. Skema instalasi alat TGA

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gibbs Free Energy



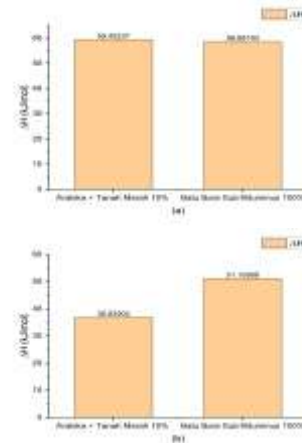
Gambar 3. *Gibbs Free Energy*, Arabika Tanah Merah 10% dan Batu Bara Sub-Bituminus 100%.

Pada Gambar 3 menampilkan grafik yang menggambarkan nilai *Gibbs Free Energy* (ΔG) pada dua tahapan proses degradasi thermal untuk dua jenis material : Arabika Tanah Merah 10% dan Batu Bara Sub-Bituminus 100%.

pada *Stage I*, diperoleh bahwa sampel Arabika Tanah Merah 10% memiliki nilai ΔG sebesar 144,69 kJ/mol, sedangkan Batu Bara Sub-Bituminus 100% menunjukkan nilai ΔG sebesar 127,82 kJ/mol. Nilai ΔG yang lebih tinggi pada campuran Arabika Tanah Merah 10 % mengindikasikan bahwa tahap awal degradasi termal pada material ini memerlukan energi yang lebih besar dibandingkan Batu bara Sub-Bituminus 100%.

Pada *Stage II*, nilai ΔG mengalami peningkatan signifikan pada kedua sampel. Campuran Arabika Tanah Merah 10% menunjukkan nilai ΔG sebesar 202,14 kJ/mol, sedangkan Batu Bara Sub-Bituminus 100% sebesar 185,20 kJ/mol. Peningkatan ini menunjukkan bahwa tahap degradasi lanjutan membutuhkan energi yang lebih besar, yang berkaitan dengan pemutusan struktur karbon yang lebih kompleks dan lebih stabil. Nilai ΔG yang tinggi pada campuran Arabika Tanah Merah mengindikasikan bahwa keberadaan tanah merah berperan dalam meningkatkan stabilitas termal material, memperkuat struktur dan menghambat difusi panas. Sedangkan pada Batu Bara Sub-Bituminus 100% menunjukan bahwa reaksi lanjutan pada karbon lebih mudah berlangsung, hal ini disebabkan oleh struktur karbon yang lebih matang dan aromatik, kandungan mineral yang bersifat katalik, serta sifat karbon yang lebih reaktif pada suhu tinggi.

Entropy



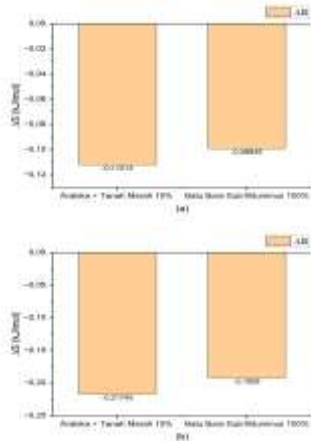
Gambar 4. *Entropy*, Arabika Tanah Merah 10% dan Batu Bara Sub-Bituminus 100%.

Pada Gambar 4 menampilkan grafik yang menggambarkan nilai *Entropy* (ΔH) pada dua tahapan proses degradasi thermal untuk dua jenis material : Arabika Tanah Merah 10% dan Batu Bara Sub-Bituminus 100%.

Pada *Stage I*, nilai ΔH pada sampel Arabika Tanah Merah 10% sebesar 59,45 kJ/mol, sedangkan Batu Bara Sub-Bituminus 100% menunjukkan nilai sedikit lebih rendah yaitu 58,68 kJ/mol. Perbedaan ini relatif kecil, namun mengindikasikan bahwa campuran Arabika dengan penambahan Tanah Merah memerlukan energi panas yang sedikit lebih besar untuk memulai proses degradasinya dibandingkan Batu bara Sub-Bituminus 100%.

pada *Stage II*, terjadi perubahan pola yang signifikan. Nilai ΔH sampel Arabika Tanah Merah 10% menurun menjadi 36,84 kJ/mol, sedangkan Batu Bara Sub-Bituminus 100% justru menunjukkan peningkatan menjadi 51,16 kJ/mol. Penurunan drastis pada campuran Arabika mengindikasikan bahwa struktur utama material telah mengalami degradasi pada tahap sebelumnya, sehingga sisa material yang terdekomposisi pada *Stage II* membutuhkan energi yang lebih rendah.

Entropy



Gambar 5. *Entropy*, Arabika Tanah Merah 10% dan Batu Bara Sub-Bituminus 100%.

Pada Gambar 5 menampilkan grafik yang menggambarkan nilai *Entropy* (ΔS) pada dua tahapan proses degradasi thermal untuk dua jenis material : Arabika Tanah Merah 10% dan Batu Bara Sub-Bituminus 100%.

Pada *Stage I*, hasil perhitungan menunjukkan bahwa kedua jenis bahan mengalami perubahan entropi yang bernilai negatif. Nilai ΔS untuk sampel Arabika Tanah Merah 10% adalah $-0,11213$ kJ/mol, sedangkan untuk Batu Bara Sub-Bituminus 100% adalah $-0,09935$ kJ/mol. Nilai ΔS yang negatif mengindikasikan bahwa proses yang berlangsung cenderung menurunkan tingkat ketidakteraturan sistem, atau dengan kata lain menghasilkan keadaan akhir yang lebih teratur dibandingkan keadaan awal. Kondisi ini umum dijumpai pada proses adsorpsi, pembentukan ikatan baru, dan restrukturisasi material selama pemanasan.

Pada *Stage II*, nilai perubahan entropi menunjukkan tren penurunan yang lebih besar dibandingkan Stage I. Arabika Tanah Merah 10% mencatat nilai ΔS sebesar $-0,21745$ kJ/mol, sedangkan Batu Bara Sub-Bituminus 100% sebesar $-0,1926$ kJ/mol. Keduanya kembali

menunjukkan nilai negatif, yang menandakan bahwa proses lanjutan pada tahap ini menghasilkan material yang lebih terstruktur dan stabil secara termodinamika.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan mengenai analisis Termodinamika pembakaran *Bio-Char* Kopi Arabika Tanah Merah 10% melalui proses Pirolisis, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Analisis profil laju degradasi massa, sampel Arabika Tanah Merah 10% dengan menambahkan tanah merah terbukti dapat meningkatkan difusi termal pada tahap awal tetapi pada tahap kedua mengalami degradasi massa lebih cepat di banding Batu Bara Sub-Bituminus 100% yang memiliki stabilitas struktur tinggi sehingga mampu mempertahankan sebagian massanya hingga temperature tinggi.
2. Analisis termodinamika pembakaran, memperlihatkan bahwa nilai energi bebas gibbs (ΔG) pada *bio-char* kopi Arabika Tanah Merah 10% lebih besar dibandingkan Batu Bara Sub-Bituminus 100%. Hal ini menunjukkan bahwa proses degradasi termal pada Arabika Tanah Merah 10% berlangsung kurang spontan dan memerlukan energi aktivasi yang lebih besar, keberadaan Tanah Merah dapat meningkatkan stabilitas termal memperkuat struktur tetapi menghambat difusi panas.
3. Analisis termodinamika pembakaran, memperlihatkan bahwa nilai energi bebas gibbs (ΔG) pada *bio-char* kopi Arabika Tanah Merah 10% lebih besar dibandingkan Batu Bara Sub-Bituminus 100%. Hal ini menunjukkan bahwa proses degradasi

termal pada Arabika Tanah Merah 10% berlangsung kurang spontan dan memerlukan energi aktivasi yang lebih besar, keberadaan Tanah Merah dapat meningkatkan stabilitas termal memperkuat struktur tetapi menghambat difusi panas.

4. Perubahan Entropi (ΔS), menunjukkan bahan baku Biomassa memiliki dinamika struktur yang lebih aktif dan berpotensi lebih unggul dalam aplikasi yang membutuhkan modifikasi struture seperti *bio-char*, karbon aktif atau material lainnya.

SARAN

1. Melakukan analisis lebih lanjut terhadap karakteristik hasil dari pirolisis, seperti analisis FTIR (*Fourier Transform Infrared*), supaya mengetahui secara detail komponen senyawa, perubahan struktur dan sifat kimia pada *Bio-char*.
2. Perlu adanya penelitian lebih lanjut yang membandingkan biomassa dengan jenis biomassa lainnya, agar mengetahui hasil peforma dan efisiensi bahan bakar biomassa.
3. Penelitian ini diharapkan mampu menjadi dasar bahwa energi alternatif mampu mengurangi limbah yang ada di dunia terutama di indonesia, serta mendukung pembangunan SDGs terutama pada aspek energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Fitriani Tumba Danun, G. Priajidno Pasak, B. Megi Simak, and J. Andi Lolo, "POTENSI PENGEMBANGAN BIOMASSA SEBAGAI ALTERNATIF ENERGI TERBARUKAN," 2022.
- [2] N. M. Lukmana, E. Marlina, and N. Robbi, "Pengaruh Penambahan Katalis Tanah Merah Pada Biomassa Kopi Arabica Terhadap Hasil Produksi Microwave Assisted Pyrolysis," 2025.
- [3] D. D. Abhinaya, L. R. Fitria, S. F. Asgasatya, and A. Budiharjo, "Pengembangan Beras Putih Tinggi Protein Rendah Glikemik (RASPUTIN) untuk Penderita Diabetes Berbasis CRISPR/Cas9," *Curr. Biochem.*, vol. 12, no. 1, pp. 41–60, Jun. 2025, doi: 10.29244/cb.12.1.3.
- [4] Abimas, "PEMBUATAN BIOPELET BRIKET DARI LIMBAH KULIT KOPI ARABIKA (*Coffea Arabica*) DENGAN PEREKAT MAIZENA," 2023.
- [5] R. N. Yanti, A. T. Ratnaningsih, and H. Ikhsani, "Pembuatan bio-briket dari produk pirolisis *biochar* cangkang kelapa sawit sebagai sumber energi alternatif," *J. Ilm. Pertan.*, vol. 19, no. 1, pp. 11–18, Mar. 2022, doi: 10.31849/jip.v19i1.7815.
- [6] W. Wijayanti, "Efek Zeolit untuk Produksi Tar dan *Char* pada Pirolisis Rotary Kiln," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 12, no. 1, p. 51, May 2021, doi: 10.21776/ub.jrm.2021.012.01.6.
- [7] D. Rangga, A. Sukma, A. Faruq Alhikami, and C. Yazirin, "Analisis Termodinamika Pembakaran Pada Campuran Bahan Bakar Batubara Sub-Bituminous Dengan Limbah Tandan Kosong Sawit," 2025.
- [8] J. Escalante *et al.*, "Pyrolysis of lignocellulosic , algal , plastic , and other biomass wastes for biofuel production and circular bioeconomy: A review of

thermogravimetric analysis (TGA) approach,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 169, no. September, p. 112914, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112914.

- [9] 2023 Hakim & Press, “Termodinamika Kimia. Universitas Brawijaya Press. <https://books.google.co.id/books?id=hAX8EAAAQBAJ>,” 2023.