

ANALISIS KARAKTERISTIK PEMBAKARAN PADA BATUBARA SUB-BITUMINOUS DAN LIMBAH TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT MENGGUNAKAN *THERMOGRAVIMETRIC*

Moh Alfian Saputra ¹, Akhmad Faruq Alhikami ², Nur Robbi ³

¹²³ Universitas Islam Malang

Email: 22101052018@unisma.ac.id, alhikami@unisma.ac.id, nurrobbi@unisma.ac.id

ABSTRAK

Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) merupakan limbah padat yang memiliki potensi besar sebagai sumber energi terbarukan. Namun memiliki tantangan dalam pemanfaatannya karena kandungan kadar air yang tinggi. Maka penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik pembakaran pada proses *co-firing* batu bara sub-bituminous dengan biomassa tandan kosong kelapa sawit (TKKS) menggunakan metode *Thermogravimetric Analysis* (TGA). Variasi rasio campuran 20% dan 40% TKKS dengan batu bara, diuji untuk mengetahui pengaruh terhadap suhu penyalaan (T_i), suhu puncak pembakaran (T_p), suhu burnout (T_b), serta laju pembakaran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan TKKS meningkatkan kandungan *volatile matter* sehingga mempercepat proses penyalaan, manikkan suhu puncak pembakaran dan suhu akhir pembakaran. Hal ini menegaskan bahwa pencampuran batu bara dan TKKS menghasilkan interaksi sinergis yang berpengaruh langsung terhadap reaktivitas dan kestabilan pembakaran. Campuran 20% TKKS terbukti memberikan performa terbaik dalam hal efisiensi dan kestabilan proses.

Kata kunci: *Co-firing*, Batu bara sub-bituminous, Tandan Kosong Kelapa Sawit, *Thermogravimetric Analysis*, Karakteristik Pembakaran

ABSTRACT

Empty fruit bunches (EFB) are solid wastes that have great potential as a renewable energy source. However, their utilization faces challenges due to their high water content. Therefore, this study aims to analyze the combustion characteristics in the co-firing process of sub-bituminous coal with empty fruit bunches (EFB) biomass using the Thermogravimetric Analysis (TGA) method. Variations in the mixture ratio of 20% and 40% EFB with coal were tested to determine their effects on the ignition temperature (T_i), peak combustion temperature (T_p), complete combustion temperature (T_b), and combustion rate. The results showed that the addition of EFB increased the volatile content, thereby accelerating the ignition process, increasing the peak combustion temperature, and increasing the complete combustion temperature. This confirms that the mixing of coal and EFB produces a synergistic interaction that directly affects the reactivity and combustion stability. The 20% EFB mixture was proven to provide the best performance in terms of efficiency and process stability.

Keywords: *Co-firing*, Sub-bituminous coal, Empty Fruit Bunches, *Thermogravimetric Analysis*, Combustion Characteristics

PENDAHULUAN

Penggunaan energi di Indonesia masih didominasi sumber fosil, terutama minyak bumi dan batubara, dengan lebih dari 60% listrik dihasilkan dari PLTU berbahan bakar batubara [1]. Namun, pembakaran batubara menimbulkan emisi CO₂ serta polutan lain (SO_x, NO_x) yang berdampak negatif terhadap lingkungan. Untuk mencapai target bauran energi 2025, salah satu strategi yang dikembangkan adalah teknologi *co-firing*, yakni pencampuran batu bara dengan biomassa pada PLTU yang sudah ada tanpa perlu infrastruktur baru [2].

Salah satu biomassa potensial adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS), limbah padat dari pengolahan kelapa sawit. Dari 1 ton tandan buah segar (TBS), sekitar 23% berupa TKKS atau ± 230 kg [3], dengan total produksi di Indonesia mencapai 556.671 ton/hari [4]. Melimpahnya TKKS menjadikannya sumber energi alternatif strategis [5].

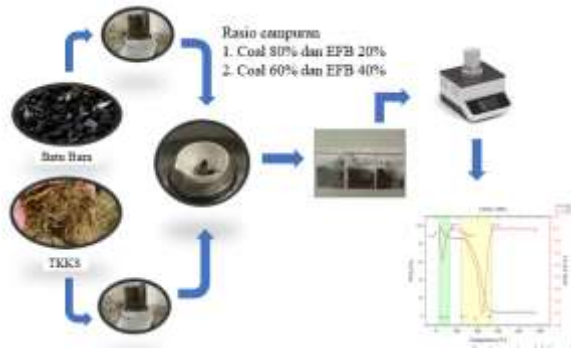
TKKS memiliki *volatile matter* tinggi dan kadar sulfur rendah, sehingga lebih mudah menyala dan lebih ramah lingkungan dibanding batu bara. Namun, tingginya kadar air dan sifat termalnya yang berbeda menimbulkan tantangan dalam kestabilan pembakaran. Oleh karena itu, diperlukan kajian karakteristik pembakaran campuran batu bara-TKKS dengan menggunakan metode *Thermogravimetric Analysis* (TGA). Melalui TGA dapat dianalisis suhu penyalaan (Ti), suhu puncak (Tp), suhu akhir (Tb), *ignition index* (Di), dan *combustion index* (S). Penelitian ini berfokus pada campuran batu bara sub-bituminous dengan variasi 20% dan 40% TKKS untuk menentukan komposisi paling

optimal yang mendukung efisiensi pembakaran sekaligus mendukung transisi energi berkelanjutan.

METODE DAN MATERIAL

Penelitian ini menggunakan dua jenis bahan bakar padat, yaitu batu bara sub-bituminous dan biomassa tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Sampel batu bara diperoleh dari salah satu PLTU di Indonesia, sedangkan TKKS diperoleh dari limbah pabrik kelapa sawit di Kalimantan. Sebelum pengujian, kedua sampel dikeringkan untuk menurunkan kadar air, kemudian digiling dan diayak hingga ukuran partikel ± 200 mesh.

Pengujian dilakukan dengan alat *Thermogravimetric Analyzer* (TGA) Shimadzu DTG-60H. Sekitar 0,5gr sampel dimasukkan ke dalam wadah uji, kemudian dipanaskan dengan laju pemanasan 10 °C/menit dari suhu ruang hingga 1000 °C dan laju aliran gas 60ml/menit. Variasi campuran yang digunakan COAL 100%, campuran COAL-EFB 20%, dan campuran COAL-EFB 40%. Selama pengujian, data penurunan massa sampel direkam secara kontinu sehingga dapat diperoleh kurva TG dan DTG. Analisis difokuskan pada penentuan parameter pembakaran utama, yaitu suhu penyalaan (Ti), Suhu puncak pembakaran (Tp), Suhu *burnout* (Tb), serta *ignition index* (Di), dan *combustion index* (S). Dengan metode ini dapat diketahui pengaruh perbandingan campuran batu bara dan TKKS terhadap reaktivitas termal serta kestabilan proses pembakaran.



Gambar 1. Skema Instalasi Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil studi yang dilakukan selama proses pengambilan data, dapat disajikan dalam bentuk penyajian yang sesuai dengan hasil yang dilakukan sebagai berikut.

Tabel 1. Karakteristik Pembakaran

Material	Ti (°C)	Tp (°C)	Tb (°C)	Di $10^{-6} \text{ wt}\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$	S $10^{-7} \text{ wt}\% \text{ min}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$	Q (Joule)
COAL 100%	289,33	431,78	506,42	52,011	21,736	10,463
EFB 20%	263,90	447,91	527,75	44,803	22,236	10,726
EFB 40%	250,78	432,05	492,20	49,811	28,448	10,480

Dari hasil tabel diatas *Ignition temperature* (Ti) ditentukan dari titik perpotongan kurva DTG dengan garis bantu. Pada material *COAL* 100%, Ti terjadi pada 289,33°C dengan waktu 25,7 menit. Suhu tinggi ini dipengaruhi kandungan fixed carbon yang tinggi sehingga awal dekomposisi lebih lambat. Pada campuran EFB 20%, Ti menurun 8,7% menjadi 263,9°C dengan waktu 23,8 menit. Sedangkan pada EFB 40%, penurunan lebih besar yaitu 13,3% menjadi 250,78°C dengan waktu 22,7 menit. Penurunan suhu ini disebabkan kandungan volatile matter (hemiselulosa dan selulosa) pada EFB yang lebih tinggi, sehingga dekomposisi terjadi lebih cepat.

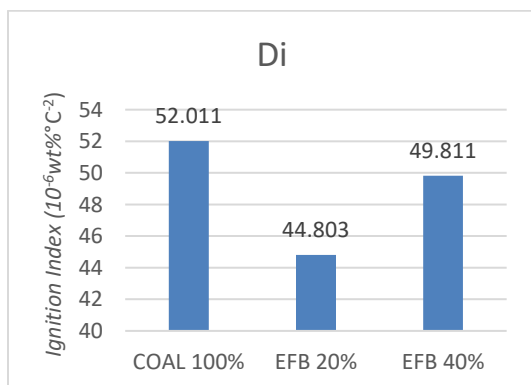
Selanjutnya suhu puncak (Tp) ditentukan dari titik maksimum kurva DTG. Pada *COAL* 100%, Tp terjadi pada 431,78°C dengan waktu 39 menit, dipengaruhi tingginya fixed carbon dan rendahnya volatil sehingga pembakaran fokus pada karbon dan berlangsung stabil. Pada EFB 20%, Tp naik 3,6% menjadi 447,91°C pada 41,7 menit. Kenaikan ini akibat dominasi batu bara yang masih tinggi serta adanya char biomassa yang reaktif, sehingga terjadi pembakaran bersamaan karbon batu bara dan biomassa, membuat proses berlangsung lebih lama dan suhu puncak bergeser lebih tinggi. Sedangkan pada EFB 40%, Tp turun menjadi 432,05°C pada 39,9 menit, hampir sama dengan *COAL* 100%. Penurunan ini menunjukkan karbon reaktif dari EFB sudah habis lebih awal, sehingga pada saat Tp hanya tersisa sedikit karbon batu bara yang terbakar, menyebabkan puncak suhu tidak setinggi campuran 20%.

Dan suhu akhir (Tb) ditentukan saat laju pembakaran turun ke 1wt%/menit. Pada *COAL* 100%, Tb terjadi pada 506,42°C di waktu 48,2 menit. Suhu ini relatif rendah karena sebagian besar karbon batu bara sudah habis terbakar pada Tp, sehingga sisa oksidasi berlangsung cepat. Pada EFB 20%, Tb naik 4% menjadi 527,75°C dengan waktu 50,6 menit. Kenaikan ini dipengaruhi tingginya char batu bara yang kurang reaktif, sehingga pembakaran sisa berlangsung lebih lama hingga mencapai suhu lebih tinggi. Sementara pada EFB 40%, Tb turun 6,7% menjadi 492,2°C pada 46,9 menit. Penurunan ini menunjukkan char dari biomassa lebih cepat habis terbakar, sehingga akhir pembakaran tercapai lebih cepat dengan sisa karbon yang minim.

Selanjutnya terdapat dua indeks yang digunakan untuk menilai kinerja pembakaran baik pada batu bara maupun campuran batu bara dengan biomassa. *Ignition index* (Di) menggambarkan tingkat kemudahan bahan bakar untuk mulai terbakar, sedangkan *Combustion index* (S) mencerminkan karakteristik keseluruhan proses pembakaran. Kedua indeks ini didefinisikan sebagai berikut [6].

$$Di = \frac{DTG_{max}}{T_i \cdot T_p} \quad (1)$$

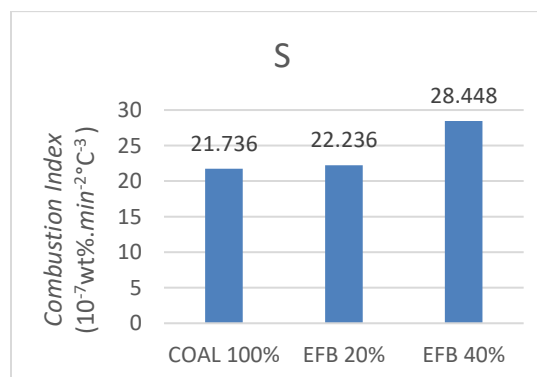
$$S = \frac{DTG_{max} \cdot DTG_{avg}}{T_i^2 \cdot T_b} \quad (2)$$



Gambar 2. Grafik *Ignition Index*

Untuk *Ignition Index* (Di) umumnya digunakan untuk menunjukkan seberapa cepat atau lambat bahan bakar dinyalakan. Berdasarkan grafik terlihat bahwa penambahan TKKS ke dalam campuran batu bara memberikan pengaruh terhadap karakteristik pembakarannya. Nilai (Di) pada COAL 100% yaitu sebesar 52,011 wt%°C⁻², menunjukkan bahwa batu bara murni memiliki kemudahan penyalaan yang lebih baik, karena dipengaruhi oleh laju pembakaran yang tinggi. Pada campuran EFB 20% mengalami penurunan 13,8% dan suhu menurun menjadi 44,803 wt%°C⁻², dan kembali naik pada EFB 40% dengan

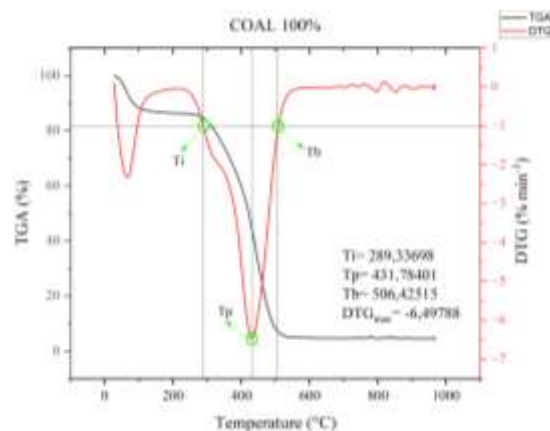
penurunan 4,2% diikuti dengan penurunan nilai suhu menjadi 49,811 wt%°C⁻². Penurunan ini dipengaruhi oleh laju pembakaran yang rendah, mengindikasikan bahwa semakin besar persentase penambahan TKKS, maka kemudahan material untuk menyala juga menurun. Walaupun batu bara memiliki kemudahan menyala lebih baik, tetapi dari data hasil yang sudah ada, EFB 20% yang lebih optimal, dapat dilihat dari suhu Ti yang rendah menandakan suhu awal pembakaran yang mudah menyala, Tp yang paling tinggi menandakan reaktivitas termal dan pelepasan volatil batu bara lebih tuntas, dan Tb yang tinggi dipengaruhi sisa char batu bara tinggi yang terbakar secara tuntas dan sempurna.



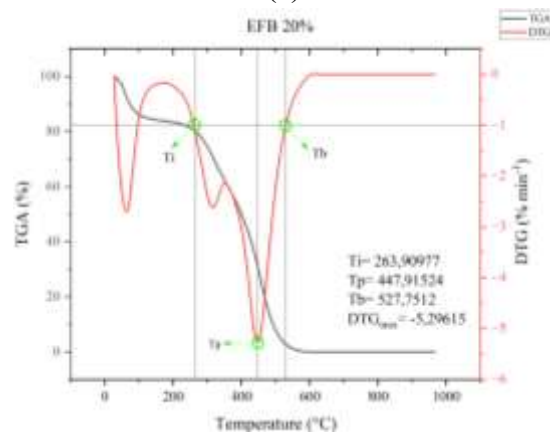
Gambar 3. Grafik *Combustion Index*

Sementara itu, nilai indeks pembakaran (S), pada COAL 100% memiliki nilai sebesar 21,736 wt%min⁻²°C⁻³, karena kandungan karbon padat kurang reaktif yang menyebabkan pembakaran lebih lambat. Sedangkan pada campuran EFB nilai semakin naik karena kandungan EFB yang reaktif mudah terbakar. Pada campuran EFB 20% nilai S mengalami kenaikan nilai menjadi 22,236 wt%min⁻²°C⁻³, dan EFB 40% juga mengalami kenaikan nilai menjadi

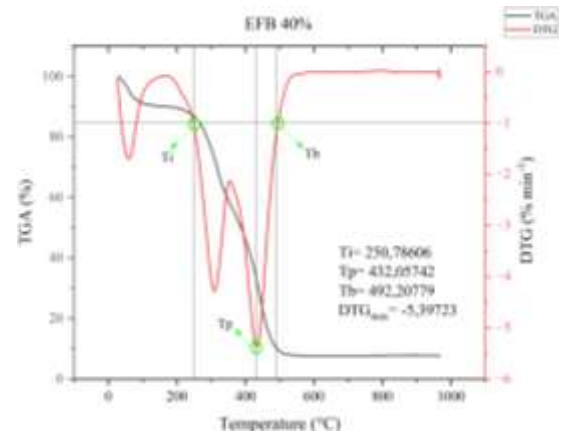
28,448 $wt\%min^{-2}^{\circ}C^{-3}$, yang menandakan semakin besar penambahan biomassa maka meningkatkan kemudahan dan kecepatan pada pembakaran. Jadi campuran EFB 20% lebih optimal dalam karakteristik pembakaran dan pembakarannya masih stabil, dapat dilihat dari suhu T_i rendah yang mudah menyala, T_p yang paling tinggi menandakan reaktivitas termal dan pelepasan volatil batu bara lebih tuntas, dan T_b yang tinggi karena sisa char batu bara yang terbakar secara tuntas dan sempurna. Sedangkan EFB 40% terlalu banyak campuran biomassa, yang menyebabkan pembakaran terlalu cepat dan sisa karbon tidak terbakar secara tuntas.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. Grafik karakteristik pembakaran (a) COAL 100% (b) EFB 20% (c) EFB 40%

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis termogravimetri terhadap karakteristik pembakaran campuran batubara dan tandan kosong kelapa sawit (TKKS/EFB), Campuran EFB 20% dengan batubara sub-bituminous merupakan komposisi yang paling optimal untuk proses pembakaran. Campuran EFB 20% ini memiliki *ignition temperature* yang rendah (mudah menyala), *peak temperature* dan *burnout temperature* yang tinggi (pembakaran aktif dan tuntas), serta nilai *indeks pembakaran* (S) yang lebih stabil dibanding EFB 40%.

Meskipun COAL 100% memiliki nilai Di tertinggi, hal tersebut tidak mencerminkan efisiensi total pembakaran, karena hanya menggambarkan kecepatan reaksi awal saja. Oleh karena itu, penggunaan EFB 20% dalam *co-firing* memberikan keseimbangan terbaik antara performa termal dan efisiensi pembakaran. Jadi, penambahan TKKS mempengaruhi karakteristik pembakaran dengan meningkatkan reaktivitas termal, menurunkan suhu penyalaan, mempercepat

burnout, namun mengurangi kestabilan pembakaran.

10.1016/j.tca.2022.179296.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arinaldo Deon and J. C. Adiatma, “Dinamika Batu Bara Indonesia :,” *Din. Batu Bara Indones. Menuju Transisi Energi yang Adil*, 2019, [Online]. Available: <https://iesr.or.id/wp-content/uploads/2019/04/SPM-bahasa-lowres.pdf>
- [2] G. A. Trianto, “Lewat Co-Firing, 40 PLTU PLN Grup Mampu Turunkan Emisi Hingga 429 Ribu Ton CO₂,” 2023. [Online]. Available: <https://web.pln.co.id/media/siaran-pers/2023/07/lewat-co-firing-40-pltu-pln-grup-mampu-turunkan-emisi-hingga-429-ribu-ton-co2>
- [3] M. F. Praevia, “Analisis Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Cofiring pada PLTU Batubara,” vol. 3, no. 1, pp. 28–37, 2025, doi: 10.14710/jebt.2022.13367.
- [4] N. Hizriani, “JALUJUR : Jurnal Pengabdian Masyarakat Penyuluhan Pembuatan Pupuk Organik Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) di Sekolah,” vol. 2, no. 2, pp. 69–78, 2023.
- [5] R. Wahyudi, A. Amrul, and M. Irsyad, “Karakteristik Bahan Bakar Padat Produk Torefaksi Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Menggunakan Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular,” *INVOTEK J. Inov. Vokasional dan Teknol.*, vol. 20, no. 2, pp. 1–8, 2020, doi: 10.24036/invotek.v20i2.706.
- [6] E. Garcia, I. F. Ejim, and H. Liu, “Thermogravimetric analysis of co-combustion of a bituminous coal and coffee industry by-products,” *Thermochim. Acta*, vol. 715, no. July, p. 179296, 2022, doi: