

Analisis Energi Aktivasi pada Proses *Co-Firing* Batu Bara Sub-Bituminous dan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) Menggunakan Metode *Coats-Redfern*

Nurcholis Majid¹, Akhmad Faruq Alhikami², Ena Marlina³

¹ Teknik Mesin, Universitas Islam Malang
e-mail : 22101052021@unisma.ac.id

² Teknik Mesin, Universitas Islam Malang
e-mail : alhikami@unisma.ac.id

³ Teknik Mesin, Universitas Islam Malang
e-mail : ena.marlina@unisma.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh variasi campuran batu bara sub-bituminous dan tandan kosong kelapa sawit (TKKS) terhadap energi aktivasi (E_a) proses pembakaran menggunakan analisis *Thermogravimetric Analysis* (TGA) dan pendekatan kinetika *Coats-Redfern*. Sampel terdiri atas 100% batu bara, campuran 80% batu bara–20% TKKS, dan 60% batu bara–40% TKKS. Hasil penelitian menunjukkan bahwa energi aktivasi rata-rata pada *stage* 1 menurun dari 91,16 kJ/mol (batu bara murni) menjadi 86,69 kJ/mol pada campuran 20% TKKS, kemudian meningkat menjadi 91,64 kJ/mol pada campuran 40% TKKS. Pada *stage* 2, energi aktivasi turun dari 61,88 kJ/mol (batu bara murni) menjadi 48,70 kJ/mol (20% TKKS) sebelum kembali naik menjadi 49,50 kJ/mol pada komposisi 40% TKKS. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan 20% TKKS memberikan efek sinergis pada peningkatan reaktivitas termal, sementara penambahan 40% TKKS menyebabkan kenaikan E_a kembali akibat kompleksitas lignin dan pembentukan lapisan abu. Kesimpulan menunjukkan bahwa rasio *co-firing* paling optimal secara kinetika berada pada campuran 20% TKKS.

Kata Kunci: Energi aktivasi; *Co-firing*; Batu bara sub-bituminous; Tandan kosong kelapa sawit (TKKS); Analisis Termogravimetri (TGA); Metode *Coats-Redfern*; Kinetika pembakaran.

ABSTRACT

This study evaluates the influence of blending sub-bituminous coal with empty fruit bunch (EFB) biomass on the activation energy (E_a) during the combustion process using Thermogravimetric Analysis (TGA) and the Coats-Redfern kinetic approach. Three fuel compositions were examined: pure coal (100%), a mixture of 80% coal–20% EFB, and 60% coal–40% EFB. The results show that the average activation energy in Stage 1 decreased from 91.16 kJ/mol for pure coal to 86.69 kJ/mol for the 20% EFB blend, before increasing again to 91.64 kJ/mol at 40% EFB. In Stage 2, the activation energy decreased from 61.88 kJ/mol (pure coal) to 48.70 kJ/mol (20% EFB), followed by a slight increase to 49.50 kJ/mol (40% EFB). These findings indicate that adding 20% EFB produces a synergistic effect—enhancing thermal reactivity and lowering the energy required for reaction initiation. However, increasing the proportion to 40% EFB raises the activation energy due to the higher lignin content and the formation of ash layers that inhibit diffusion. Overall, the 20% EFB mixture represents the most kinetically favorable ratio for co-firing applications.

Keywords: Activation energy; *Co-firing*; Sub-bituminous coal; Empty fruit bunch (EFB); Thermogravimetric Analysis (TGA); Coats-Redfern method; Combustion kinetics.

PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan tulang punggung ketahanan energi nasional karena berperan besar dalam penyediaan listrik di Indonesia. Sebagai negara berkembang dengan kebutuhan energi yang terus meningkat, Indonesia sangat bergantung pada batu bara sebagai bahan bakar utama PLTU. Hampir separuh konsumsi batu bara domestik digunakan untuk pembangkit listrik, sementara sisanya mendukung kegiatan industri. Hal ini selaras dengan kondisi infrastruktur energi nasional, di mana sekitar 60% kapasitas pembangkit masih berbasis batu bara. Ketergantungan tersebut diperkirakan akan terus meningkat karena masih banyak daerah yang belum memiliki akses listrik memadai [1], [2], [3].

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan tulang punggung ketahanan energi nasional karena berperan besar dalam penyediaan listrik di Indonesia. Sebagai negara berkembang dengan kebutuhan energi yang terus meningkat, Indonesia sangat bergantung pada batu bara sebagai bahan bakar utama PLTU. Hampir separuh konsumsi batu bara domestik digunakan untuk pembangkit listrik, sementara sisanya mendukung kegiatan industri. Hal ini selaras dengan kondisi infrastruktur energi nasional, di mana sekitar 60% kapasitas pembangkit masih berbasis batu bara. Ketergantungan tersebut diperkirakan akan terus meningkat karena masih banyak daerah yang belum memiliki akses listrik memadai. Pemerintah Indonesia menargetkan bauran Energi Baru Terbarukan (EBT) mencapai 23% pada tahun 2025 sesuai RUEN. Salah satu strategi untuk mendukung transisi energi tersebut adalah penerapan teknologi *co-firing*, yaitu pencampuran biomassa dengan batu bara pada PLTU Biomassa seperti TKKS, tempurung kelapa, serbuk gergaji, sekam padi, *wood chip*, dan *wood pellet* memiliki potensi besar sebagai bahan bakar alternatif karena kandungan sulfur yang rendah, nilai kalor yang cukup baik, serta ketersediaannya yang melimpah. Namun, karakteristik biomassa yang berbeda-beda memerlukan analisis khusus untuk memahami pengaruhnya terhadap proses pembakaran. Dengan keunggulan tersebut, biomassa menjadi solusi strategis yang dapat diintegrasikan dalam sistem PLTU melalui teknologi *co-firing* guna mendukung pencapaian target energi nasional [2], [3], [4], [5], [6], [7].

Indonesia memiliki potensi biomassa yang besar, terutama dari limbah kelapa sawit seperti Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS), yang jumlahnya meningkat seiring pertumbuhan industri sawit. TKKS kaya bahan organik dan dapat menjadi bahan bakar alternatif, namun jika tidak dikelola dapat mencemari lingkungan. Biomassa memiliki keunggulan dibanding batu bara, seperti kandungan sulfur rendah dan volatil tinggi, tetapi juga

menimbulkan tantangan teknis seperti slagging dan fouling pada boiler. Untuk memastikan pemanfaatannya pada teknologi *co-firing*, karakteristik termal dan kinetika biomassa perlu dianalisis [8], [9], [10].

Thermogravimetric Analysis (TGA) digunakan untuk memahami perilaku dekomposisi biomassa dan campuran batu bara-biomassa. Analisis ini penting untuk menentukan parameter kinetika seperti energi aktivasi (E_a), faktor pra-eksponensial (A), dan mekanisme reaksi. Metode *Coats-Redfern* merupakan pendekatan umum untuk memperoleh parameter kinetika berbasis data TGA, sementara model DAEM memberikan gambaran lebih kompleks mengenai mekanisme reaksi biomassa. Studi kinetika membantu memahami interaksi sinergis atau inhibisi pada campuran batu bara-biomassa, yang berpengaruh pada pelepasan volatil, pembentukan char, dan efisiensi pembakaran [11], [12], [13], [14].

Berdasarkan konteks tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik termal dan parameter kinetika campuran batu bara dan TKKS menggunakan TGA serta metode *Coats-Redfern* untuk menentukan nilai energi aktivasi dan konstanta laju reaksi selama proses pembakaran.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental berbasis kajian teoritis, dengan pengolahan data dilakukan melalui pendekatan simulasi eksperimental. Pengujian dilakukan secara langsung pada proses pembakaran batu bara sub-bituminous yang dicampur dengan TKKS dalam sistem *co-firing* menggunakan metode *coats-redfern*.

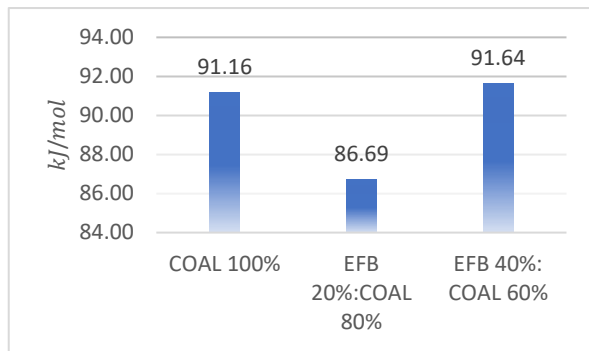
SKEMA INSTALASI PENELITIAN



Gambar 1. Skema Instalasi Proses Pencampuran

Skema ini menunjukkan proses pencampuran biomassa tandan kosong kelapa sawit dan batu bara sub-bituminous.

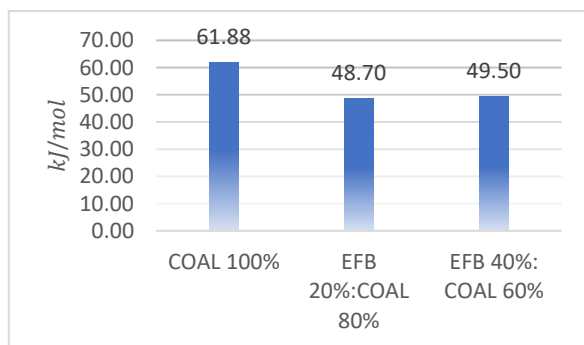
HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 2. Grafik Energi Aktivasi (E_a) stage 1

Berdasarkan nilai energi aktivasi (E_a) yang bisa dilihat pada gambar 2. merupakan rata-rata (*average*) dari seluruh model kinetik yang diuji untuk masing-masing stage reaksi dengan menggunakan metode *Coats-Redfern*. Pemilihan rata-rata lintas model untuk mengurangi bias pemilihan satu model tertentu saat beberapa model juga sama baik. Kemudian pada gambar 2 stage awal umumnya devolatilisasi, penambahan 20% EFB menurunkan E_a dari COAL 100% (91,16 ke 86,69 kJ/mol), menunjukkan peningkatan reaktivitas awal akibat kandungan selulosa, hemiselulosa, dan volatil pada TKKS yang lebih mudah terurai pada temperatur rendah dan pembentukan pori awal yang mempermudah pelepasan gas volatile.

Namun pada 40% EFB, nilai rata-rata E_a menjadi naik (91,64 kJ/mol), yang dapat mencerminkan perubahan mekanisme dominan, misalnya pergeseran kontribusi dari model difusi atau kontraksi geometri, atau pengaruh komposisi abu biomassa yang mulai mengubah jalur reaksi pada rentang konversi tertentu.



Gambar 3. Grafik Energi Aktivasi (E_a) stage 2

Pada stage 2 dari gambar 3. chart energi aktivasi (E_a) menunjukkan energi aktivasi batubara murni relatif tinggi yaitu 61,88 kJ/mol, yang menandakan bahwa pembakaran residu padat batubara membutuhkan energi besar akibat porositas yang rendah dan tidak adanya katalis mineral. Dengan penambahan 20% TKKS, nilai E_a turun drastis menjadi 48,70 kJ/mol, yang konsisten dengan peningkatan porositas char serta adanya mineral alkali (K, Na, Ca) dari abu TKKS yang

berperan menurunkan energi aktivasi dengan mempercepat reaksi oksidasi karbon pada char.

Akan tetapi, pada campuran 40% TKKS, nilai E_a meningkat kembali menjadi 49,50 kJ/mol, meskipun tetap lebih rendah dibanding batubara murni. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa penambahan TKKS hingga 20% memberikan efek sinergis positif, ditandai dengan penurunan energi aktivasi baik pada tahap devolatilisasi maupun oksidasi char. Namun, pada penambahan yang lebih tinggi (40% TKKS), efek sinergis tersebut berkurang karena meningkatnya peran lignin dan pembentukan lapisan abu pada permukaan char.

KESIMPULAN

Nilai energi aktivasi (E_a) berbeda dari setiap sampel. Batu bara murni memiliki E_a rata-rata 91,16 kJ/mol yang menunjukkan kestabilan termal tinggi namun reaktivitas rendah. Pada campuran 20% TKKS, E_a menurun menjadi 86,69 kJ/mol sehingga reaksi lebih mudah terjadi. Sedangkan pada campuran 40% TKKS, E_a Kembali meningkat menjadi 91,64 kJ/mol. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan TKKS memengaruhi energi aktivasi, dengan 20% TKKS paling reaktif, sementara 40% TKKS membutuhkan energi lebih besar karena proses dekomposisi biomassa lebih kompleks.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Gunara, U. Muhammadiyah HAMKA Jl Tanah Merdeka No, K. Rambutan, P. Rebo, and J. Timur, "Potensi Batubara Sebagai Sumber Energi Alternatif Untuk Pengembangan Industri Logam," vol. 2, 2017.
- [2] R. Pahlevi, S. Thamrin, I. Ahmad, and F. B. Nugroho, "Masa Depan Pemanfaatan Batubara sebagai Sumber Energi di Indonesia," *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 5, no. 2, pp. 50–60, Jul. 2024, doi: 10.14710/jebt.2024.22973.
- [3] G. L. a b, Q. A. a, R. W. a, M. U. A. a, H. U. a, R. L. a, C. Z. a Balal Yousaf a b, "Systematic investigation on combustion characteristics and emission-reduction mechanism of potentially toxic elements in biomass- and biochar-coal co-combustion systems," Dec. 2017.
- [4] M. Gunara, "Potensi Batubara Sebagai Sumber Energi Alternatif Untuk Pengembangn Industri Logam. Seminar Nasional TEKNOKA, 2.,," 2017.
- [5] A. Dwi Ariyanto and L. Mustakim, "ANALISIS PENGUJIAN CO-FIRING BIOMASSA PADA PLTU BATUBARA DENGAN BEBERAPA BAHAN BAKAR ALTERNATIF SEBAGAI UPAYA BAURAN ENERGI BARU TERBARUKAN", doi: 10.31604/jpm.v6i1.98-104.

- [6] Z. Maskur, D. A. Nugroho, P. T. Pembangkitan, and J. Bali, "Analisa Karakteristik Biomasa untuk Cofiring pada Pembangkit Batubara di Indonesia."
- [7] R. Trianto Salawali, I. Munzir Zainuddin, and S. Yani, "KINETIKA REAKSI PEMBAKARAN BIOBRIKET CAMPURAN BATUBARA DENGAN BIOMASSA," *Journal Of Chemical Process Engineering*, vol. 02, no. 02, 2017.
- [8] Ministry of Agriculture, *Statistical of national leading estate crops commodity 2021-2023*. 2022.
- [9] H. Gusman, "PENINGKATAN KUALITAS LIMBAH TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT PRODUK TOREFAKSI BASAH SKALA PILOT SEBAGAI BAHAN BAKAR PADAT BERSIH," 2021.
- [10] M. Abdul Qodir and A. Faruq Alhikami, "Analisis profil degradasi massa pada hydrochar menggunakan teknik Hydrothermal Carbonization dari limbah tandan kosong sawit."
- [11] W. Chaeruni, H. Hadiyanto, and C. Cahyadi, "Karakteristik Pembakaran Campuran Batubara dan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) Menggunakan Analisis Termogravimetri Deferensial Temperatur (TG-DTA)," *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, vol. 8, no. 3, pp. 1629–1638, Jul. 2024, doi: 10.33379/gtech.v8i3.4515.
- [12] Cahyadi, "Predicting behavior of coal ignition in oxyfuel combustion. Energy Procedia.," 2013.
- [13] H. Gohar *et al.*, "Investigating the characterisation, kinetic mechanism, and thermodynamic behaviour of coal-biomass blends in co-pyrolysis process," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 163, pp. 645–658, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.psep.2022.05.063.
- [14] F. J. F. Phang *et al.*, "Hydrochars derived via wet torrefaction of empty fruit bunches: Effect of temperature and time, comparison to oil palm trunks counterpart, and their pyrolysis behavior," *J Anal Appl Pyrolysis*, vol. 179, May 2024, doi: 10.1016/j.jaap.2024.106441.