

**ANALISIS TERMODINAMIKA PEMBAKARAN PADA
CAMPURAN BAHAN BAKAR BATUBARA SUB-BITUMINOUS
DENGAN LIMBAH TANDAN KOSONG SAWIT**

SKRIPSI

*Diajukan sebagai salah satu persyaratan memperoleh gelar sarjana strata
satu (S-1) Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Islam
Malang*



Disusun Oleh:

DEAZ RANGGA ABI SUKMA

22001052082

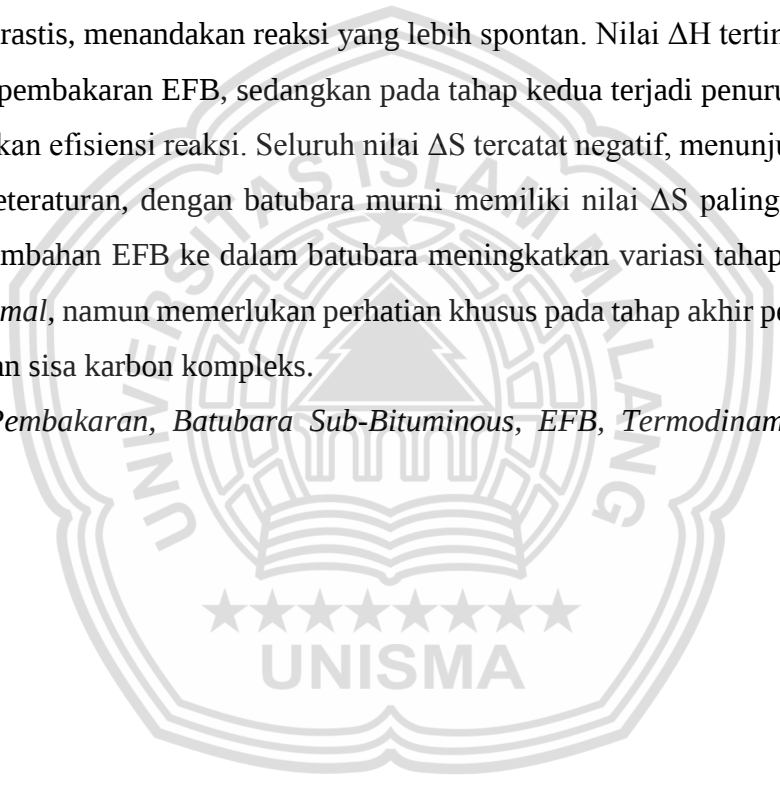
**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM MALANG**

2024

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik termodinamika pembakaran campuran batubara *sub-bituminous* dengan limbah tandan kosong kelapa sawit (EFB) menggunakan metode *thermogravimetric analysis* (TGA). Sampel yang digunakan terdiri dari batubara murni (COAL 100%), campuran EFB 20%, dan EFB 40%. Analisis dilakukan terhadap parameter degradasi massa, perubahan *Free Gibbs Energy* (ΔG), *enthalpy* (ΔH), dan *entropy* (ΔS) pada masing-masing tahap degradasi *thermal*. Hasil menunjukkan bahwa campuran EFB 20% memiliki tingkat kehilangan massa tertinggi, mengindikasikan kemudahan degradasi *thermal* yang lebih baik. Penambahan EFB menyebabkan peningkatan ΔG pada tahap awal pembakaran, namun pada tahap kedua justru menurun drastis, menandakan reaksi yang lebih spontan. Nilai ΔH tertinggi terjadi pada tahap awal pembakaran EFB, sedangkan pada tahap kedua terjadi penurunan tajam yang mencerminkan efisiensi reaksi. Seluruh nilai ΔS tercatat negatif, menunjukkan arah reaksi menuju keteraturan, dengan batubara murni memiliki nilai ΔS paling negatif di tahap awal. Penambahan EFB ke dalam batubara meningkatkan variasi tahap degradasi dan efisiensi *thermal*, namun memerlukan perhatian khusus pada tahap akhir pembakaran karena keberadaan sisa karbon kompleks.

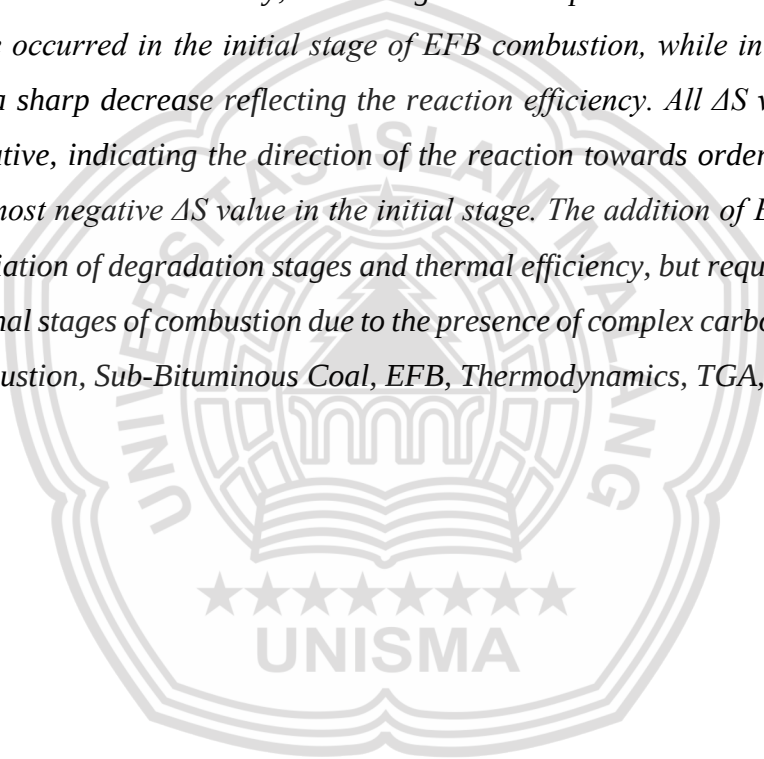
Kata kunci : *Pembakaran, Batubara Sub-Bituminous, EFB, Termodinamika, TGA, Cofiring.*



ABSTRACT

This study aims to analyze the thermodynamic characteristics of the combustion of a mixture of sub-bituminous coal with oil palm empty fruit bunches (EFB) using the thermogravimetric analysis (TGA) method. The samples used consisted of pure coal (COAL 100%), a mixture of 20% EFB, and 40% EFB. Analysis was carried out on the mass degradation parameters, Gibbs free energy change (ΔG), enthalpy (ΔH), and entropy (ΔS) at each stage of thermal degradation. The results showed that the 20% EFB mixture had the highest mass loss rate, indicating better thermal degradation ease. The addition of EFB caused an increase in ΔG in the initial stage of combustion, but in the second stage it decreased drastically, indicating a more spontaneous reaction. The highest ΔH value occurred in the initial stage of EFB combustion, while in the second stage there was a sharp decrease reflecting the reaction efficiency. All ΔS values were recorded as negative, indicating the direction of the reaction towards order, with pure coal having the most negative ΔS value in the initial stage. The addition of EFB to coal increases the variation of degradation stages and thermal efficiency, but requires special attention in the final stages of combustion due to the presence of complex carbon residues.

Keywords: Combustion, Sub-Bituminous Coal, EFB, Thermodynamics, TGA, Cofiring.



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemanfaatan energi biomassa semakin menarik minat karena kekhawatiran tentang keamanan pasokan bahan bakar fosil di masa depan, konsumsi bahan bakar fosil yang berlebihan dan harga yang terus meningkat. Selain itu, CO₂ yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil menyebabkan pemanasan global dan perubahan iklim yang mengancam dunia (Yousaf dkk., 2017). Saat ini, Kebutuhan energi masih didominasi dengan sumber daya energi fosil. Diantara bahan bakar fosil, emisi karbon batubara merupakan yang paling tinggi dan pelepasan unsur-unsur yang mencemari lingkungan selama pembakaran batubara berpotensi menyebabkan gangguan kesehatan (Yousaf dkk., 2017).

Indonesia memiliki lebih dari 60% pembangkit listrik masih menggunakan batubara dan ini akan terus bertambah mengingat masih banyak daerah yang defisit listrik (Arinaldo & Adiatama, 2019). Di level internasional, Indonesia tercatat sebagai salah satu konsumen energi terbesar dunia, sektor penggunaan energi Indonesia menyumbang 35% dari total emisi gas rumah kaca (GRK) di seluruh dunia (IRENA, 2017)(Wijaya dkk., 2017). Dalam kegiatan *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC), Indonesia melalui *Nationally Determined Contribution* (NDC) berjanji untuk menurunkan emisi nya sebesar 29% (atau 41% dengan bantuan internasional) pada tahun 2030 yaitu dengan mempromosikan bauran pasokan energi baru dan terbarukan (EBT) telah dinyatakan sebagai salah satu strategi untuk mencapai target (KLHK, 2016). Diantara beberapa sumber energi terbarukan yang tersedia, Indonesia diproyeksikan akan bergantung pada *bioenergy* (51% dari total konsumsi energi) pada tahun 2030 (KLHK, 2016). Untuk mewujudkan komitmen NDC, Pemerintah Indonesia menerbitkan Peraturan tentang Kebijakan Energi Nasional yang menargetkan setidaknya 23% energi baru dan terbarukan pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050 (PP No. 79, 2014).

Selain itu, Indonesia mempunyai luasan lahan sawit sebesar 14,456 juta hektare (BPS, 2020). Dengan luas lahan tersebut, dapat menghasilkan tandan buah segar 20 ton tandan buah segar (TBS)/hektar setiap tahunnya. Dengan persentase tandan kosong kelapa sawit (TKKS) terhadap tandan buah segar sekitar 22% dengan kandungan kadar air sekitar 65% (Abu Bakar dkk., 2008). Potensi biomassa TKKS kering yang dapat

dihasilkan oleh lahan sawit tersebut diperkirakan 22.262 juta ton per tahun dari rumus perhitungan oleh Gabungan Pengusaha Kelapa Sawit Indonesia (GAPKI, 2017). TKKS memiliki nilai kalor sekitar 14,8 MJ/kg atau 3535 kcal/kg (Wahyudi dkk., 2020) (Iryani dkk., 2019)(Madhiyanon dkk., 2012). sehingga potensi energi yang dapat dihasilkan mencapai 3,294X10⁸ MJ/tahun. TKKS merupakan residu industri perkebunan kelapa sawit yang belum maksimal dimanfaatkan sampai saat ini. Sehingga sangat potensial apabila dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif karena ketersediaannya yang melimpah, dapat diperbarui, dan kemungkinan konversi ke produk bernilai tambah lebih tinggi (Wahyudi dkk., 2020). Selain itu, tandan kosong kelapa sawit (TKKS) merupakan bahan bakar netral CO₂, karena beberapa peneliti berpendapat bahwa pohon yang tumbuh menyerap CO₂ yang dipancarkan selama pembakaran menciptakan lingkaran karbon tertutup (Yildiz dkk., 2016).

Sekitar 1 dekade terakhir ini banyak perhatian mengenai pembakaran bersama batubara dan biomassa dengan konsentrasi tertentu atau sering disebut metode *cofiring* karena tidak hanya dapat mengurangi emisi polutan, tetapi juga secara efektif meminimalisasi pembentukan terak (Lu dkk., 2017). Penggunaan teknologi *cofiring* merupakan pilihan yang relatif lebih murah dan tidak memerlukan investasi pembangkit listrik baru. Analisis termogravimetri merupakan metode yang dipandang paling mudah dan efektif untuk mengamati profil pembakaran bahan bakar (Yousaf dkk., 2017)(Cong dkk., 2019)(Otero dkk., 2002).

Analisis termogravimetri yang dilakukan oleh Wang dkk dan Mundike dkk (P. Wang dkk., 2018)(Mundike dkk., 2018) menemukan bahwa penambahan biomassa pada pembakaran batubara dapat menurunkan temperatur pengapian. Wang dkk melakukan penelitian tentang karakteristik *co-combustion* dan perilaku kinetik dari bubuk batubara antrasit dan arang cangkang kelapa sawit. Pembuatan cangkang kelapa sawit melalui proses devolatilisasi di bawah temperatur 600 °C. Hasil uji termogravimetri menunjukkan arang cangkang kelapa sawit lebih reaktif daripada batubara antrasit karena urutan struktur kristal dan derajat grafitisasinya yang lebih rendah, struktur pori yang lebih berkembang dengan baik, dan kandungan oksida logam alkali yang lebih tinggi. Campuran bubuk arang cangkang kelapa sawit dapat meningkatkan reaktivitas pembakaran batubara antrasit. Sedangkan Mundike melakukan studi terkait *co-firing* 3 jenis batubara dengan arang torefaksi pohon tembelek dan arang torefaksi mimosa pigra. Torefaksi dilakukan dengan dua variasi temperatur yaitu 300 °C dan 500 °C. Mundike dkk melakukan analisis termogravimetri dan performa pembakaran. hasil penelitian

menunjukkan arang biomassa kedua bahan memiliki reaktivitas pembakaran lebih tinggi di bandingkan batubara. Hasil uji performa pembakaran memberikan hasil bahwasanya adanya biomassa torefaksi dalam sistem *co-firing* telah menurunkan temperatur pembakaran. Semakin tinggi proses torefaksi juga menurunkan temperatur pembakaran.

Jayaraman dkk (Jayaraman dkk., 2017) juga melakukan analisis termogravimetri batubara *bituminous* dan biomassa. Biomassa yang digunakan yaitu *poplar wood* dan kulit kemiri. Campuran biomassa yang digunakan yaitu 0%, 25%, 50%, 75% dan 100%. Hasil penelitian menunjukkan ketika persentase biomassa meningkat dalam campuran batubara-biomassa, laju kehilangan massa maksimum meningkat yang menunjukkan reaktivitas sampel yang lebih tinggi. Ini mengonfirmasi bahwa penambahan biomassa pada pembakaran batubara dapat meningkatkan laju kehilangan massa.

Berdasarkan data-data penelitian diatas dan beberapa referensi, penelitian ini bermaksud menyelidiki karakteristik termodinamika pembakaran batubara *sub-bituminous B* (BB-SBB) dengan tandan kosong kelapa sawit (TKKS) pada ruang bakar serbuk (*Pulverized Coal*). Hasil kesimpulan penelitian ini diharapkan dapat memberikan sumbangsih dalam dunia penelitian dan referensi teoritik untuk pembakaran bersama BB-SBB yang merupakan jenis batubara terbanyak di Indonesia dan TKKS dalam aplikasi industri, sehingga tidak perlu investasi untuk pembangunan unit baru dan dapat mengurangi penggunaan batubara dan dapat mengurangi emisi CO₂, SO₂ dan NO_x.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan latar belakang diatas, permasalahan yang dibahas dalam penyusunan skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi pembakaran 20% dan 40% bersama biomassa tandan kosong terhadap profil laju degradasi massa?
2. Bagaimana pengaruh variasi pembakaran 20% dan 40% bersama biomassa tandan kosong terhadap *Gibbs Free Energy*?
3. Bagaimana pengaruh variasi pembakaran 20% dan 40% bersama biomassa tandan kosong terhadap *Enthalpy* dan *Entropy*?

1.3 Batasan Masalah

Agar pembahasan tidak terlalu luas dan tidak menyimpang, maka perlu adanya batasan masalah dalam menyelesaikan analisis ini. Maka batasan masalah ini adalah: Perhitungan termodinamika reaksi menggunakan metode TGA dengan teori *Coats-Redfern*.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan penjelasan latar belakang diatas, tujuan penelitian skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui pengaruh variasi pembakaran 20% dan 40% bersama biomassa tandan kosong terhadap profil laju degradasi massa.
2. Untuk mengetahui pengaruh variasi pembakaran 20% dan 40% bersama biomassa tandan kosong terhadap *Gibs Free Energy*.
3. Untuk mengetahui pengaruh variasi pembakaran 20% dan 40% bersama biomassa tandan kosong terhadap *Enthalpy* dan *Enthropy*.

1.5 Manfaat Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas, tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penggunaan biomassa limbah tandan kosong kelapa sawit secara efisien dapat membantu reduksi sampah organik dan meningkatkan adanya ketersediaan sumber energi terbarukan.
2. Dengan hasil pembakaran thermal campuran sub-bituminous coal dan biomassa tandan kosong kelapa sawit, penelitian ini berkontribusi pada diversifikasi sumber energi terbarukan, mengurangi konsumsi penggunaan bahan bakar batubara.
3. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan baru yang berguna untuk penelitian selanjutnya tentang penggunaan limbah biomassa pada bahan bakar campuran untuk menghasilkan kalor yang hampir sama dengan sumber energi tidak terbarukan.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis termogravimetri dan perhitungan termodinamika, dapat disimpulkan bahwa penambahan limbah *Empty Fruit Bunch* (EFB) dalam campuran bahan bakar batubara *sub-bituminous* berpengaruh signifikan terhadap karakteristik pembakaran sebagai berikut :

1. Dari aspek degradasi massa, campuran dengan EFB 20% menunjukkan kehilangan massa tertinggi (99%), mengindikasikan bahwa material ini paling mudah terdegradasi. Sementara EFB 40% menghasilkan pola degradasi lebih kompleks dengan munculnya tahap ketiga, yang menunjukkan karakter pembakaran yang lebih bertahap.
2. Dari sudut pandang *Gibbs Free Energy* (ΔG), penambahan EFB meningkatkan nilai ΔG pada tahap awal, yang berarti proses awal pembakaran menjadi lebih tidak spontan. Namun pada tahap kedua, nilai ΔG menurun drastis untuk semua jenis bahan bakar, terutama pada campuran EFB, menunjukkan bahwa pembakaran utama berlangsung lebih spontan dibandingkan batubara murni. Tahap ketiga yang hanya terlihat pada EFB 40% menunjukkan nilai ΔG yang mulai meningkat kembali, mengindikasikan reaksi akhir yang kurang spontan karena sisa karbon kompleks.
3. Dalam hal *Enthalpy* (ΔH), pada tahap awal, campuran dengan EFB (terutama 20%) membutuhkan energi lebih besar untuk memulai pembakaran karena komposisi senyawa organiknya. Namun pada tahap kedua, nilai ΔH turun tajam, menunjukkan bahwa reaksi pembakaran berlangsung lebih efisien karena senyawa yang lebih mudah terbakar mulai terurai. Nilai ΔH yang tinggi kembali muncul pada EFB 40% di tahap akhir, menunjukkan bahwa masih terdapat komponen stabil yang memerlukan energi tinggi untuk terbakar.
4. Dari sisi *Entropy* (ΔS), semua nilai tercatat negatif, yang berarti seluruh reaksi bersifat menuju keteraturan. Batubara murni menunjukkan nilai ΔS paling negatif di tahap awal, menunjukkan keteraturan sistem yang tinggi saat pembakaran dimulai. Namun pada campuran EFB, terutama EFB 40%, nilai ΔS menjadi semakin kurang negatif pada tahap akhir, mengindikasikan meningkatnya

ketidakteraturan dalam sistem akibat sisa senyawa kompleks seperti sisa karbon yang sulit terbakar.

5. Berdasarkan hasil termodinamika, campuran batubara *sub-bituminous* dengan EFB 20% menunjukkan performa pembakaran yang paling seimbang, baik dari sisi efisiensi degradasi massa, kestabilan reaksi, hingga keteraturan sistem. Oleh karena itu, disarankan untuk mengutamakan penggunaan campuran dengan kadar EFB 20% dalam implementasi *co-firing* skala industri, guna mencapai efisiensi energi yang maksimal tanpa mengorbankan kestabilan proses pembakaran.

5.2. Saran

1. Karena EFB memiliki kandungan mineral dan *volatile* yang tinggi, disarankan agar penelitian selanjutnya tidak hanya fokus pada aspek energi dan termodinamika, tetapi juga memperhatikan karakter abu dan komposisi emisi gas buang. Hal ini penting untuk memastikan bahwa pemanfaatan EFB sebagai bahan bakar campuran tidak menimbulkan dampak lingkungan baru.
2. Mengingat karakteristik degradasi massa dan termodinamika EFB yang berbeda dari batubara murni, sistem pembakaran seperti *burner* atau *furnace* perlu disesuaikan agar mampu mengakomodasi volatilitas tinggi dan tahapan pembakaran bertingkat yang ditimbulkan oleh biomassa. Desain ruang bakar yang mendukung pembakaran bertahap akan meningkatkan efisiensi dan menurunkan potensi pembentukan emisi yang tidak diinginkan.
3. Melihat potensi EFB sebagai bahan bakar alternatif yang terbarukan dan terjangkau, disarankan agar teknologi *co-firing* batubara-biomassa terus dikembangkan dan diterapkan secara lebih luas pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), terutama sebagai upaya dekarbonisasi sektor energi dan pengurangan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil.

Dengan kesimpulan dan saran ini, diharapkan penelitian dapat memberikan kontribusi nyata terhadap pengembangan teknologi pembakaran berbasis *co-firing*. Khususnya dalam memanfaatkan limbah EFB (*Empty Fruit Bunch*) sebagai bahan bakar alternatif yang efisien dan ramah lingkungan

DAFTAR PUSTAKA

- Chen, C., Bi, Y., Huang, Y., & Huang, H. (2021). Review on slagging evaluation methods of biomass fuel combustion. In *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* (Vol. 155). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105082>
- Coats, A. W., & Redfern, J. P. (1963). Thermogravimetric analysis. A review. *The Analyst*, 88(1053), 906–924. <https://doi.org/10.1039/AN9638800906>
- Deng, J., Song, J. J., Zhao, J. Y., Zhang, Y. N., Zhang, Y. X., & Shu, C. M. (2019). Gases and thermal behavior during high-temperature oxidation of weathered coal. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138(2), 1573–1582. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08103-0>
- Emery, I., & Mosier, N. (2015). Direct emission of methane and nitrous oxide from switchgrass and corn stover: Implications for large-scale biomass storage. *GCB Bioenergy*, 7(4), 865–876. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12196>
- Garcia, E., Ejim, I. F., & Liu, H. (2022). Thermogravimetric analysis of co-combustion of a bituminous coal and coffee industry by-products. *Thermochimica Acta*, 715. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2022.179296>
- Gil, M. V., & Rubiera, F. (2018). Coal and biomass cofiring. In *New Trends in Coal Conversion: Combustion, Gasification, Emissions, and Coking* (pp. 117–140). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102201-6.00005-4>
- Guo, F., & Zhong, Z. (2018). Co-combustion of anthracite coal and wood pellets: Thermodynamic analysis, combustion efficiency, pollutant emissions and ash slagging. *Environmental Pollution*, 239, 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.004>
- klačnik, G., Medved, jožef, & Mrvar, P. (2010). *Differential thermal analysis (DTA) and differential scanning calorimetry (DSC) as a method of material investigation Diferenčna termična analiza (DTA) in diferenčna vrstična kalorimetrija (DSC) kot metoda za raziskavo materialov* (Vol. 57, Issue 1).
- Li, B. Y., Tee, M. Y., Nge, K. S., Ng, A. K. L., Chong, W. W. F., Ng, J. H., & Mong, G. R. (2023). Comparison Kinetic Analysis between Coats-Redfern and Criado's Master Plot on Pyrolysis of Horse Manure. *Chemical Engineering Transactions*, 106, 1273–1278. <https://doi.org/10.3303/CET23106213>
- Maryudi. (2014). *Karakteristik Torrefaksi dan Densifikasi Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit*. 1(2), 77–84.

- Ndibe, C., Grathwohl, S., Paneru, M., Maier, J., & Scheffknecht, G. (2015). Emissions reduction and deposits characteristics during cofiring of high shares of torrefied biomass in a 500 kW pulverized coal furnace. *Fuel*, 156, 177–189. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.017>
- Qiu, S., Reddy, R. G., Huang, X., Yin, C., & Zhang, S. (2022). Relationships between Combustion Behavior in Air and the Chemical Structure of Bituminous Coal during Combustion Processes. *Energies*, 15(14). <https://doi.org/10.3390/en15145154>
- Raza, M., Abu-Jdayil, B., Al-Marzouqi, A. H., & Inayat, A. (2022). Kinetic and thermodynamic analyses of date palm surface fibers pyrolysis using Coats-Redfern method. *Renewable Energy*, 183, 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.065>
- Roni, M. S., Chowdhury, S., Mamun, S., Marufuzzaman, M., Lein, W., & Johnson, S. (2017). Biomass co-firing technology with policies, challenges, and opportunities: A global review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 78, pp. 1089–1101). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.023>
- Shi, L., Liu, Q., Guo, X., Wu, W., & Liu, Z. (2013). Pyrolysis behavior and bonding information of coal — A TGA study. *Fuel Processing Technology*, 108, 125–132. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.06.023>
- Si, F., Zhang, H., Feng, X., Xu, Y., Zhang, L., Zhao, L., & Li, L. (2024). Thermodynamics and synergistic effects on the co-combustion of coal and biomass blends. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149(14), 7749–7761. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13310-5>
- SINTESIS DAN KARAKTERISASI BORON KARBIDA DARI ASAM BORAT, ASAM SITRAT DAN KARBON AKTIF. (n.d.).
- The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. (n.d.).
- Tumuluru, J. S., Hess, J. R., Boardman, R. D., Wright, C. T., & Westover, T. L. (2012). Formulation, pretreatment, and densification options to improve biomass specifications for Co-firing high percentages with coal. In *Industrial Biotechnology* (Vol. 8, Issue 3, pp. 113–132). <https://doi.org/10.1089/ind.2012.0004>
- Xiao, R., Yang, W., Cong, X., Dong, K., Xu, J., Wang, D., & Yang, X. (2020). Thermogravimetric analysis and reaction kinetics of lignocellulosic biomass pyrolysis. *Energy*, 201. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117537>
- Xinjie, L., Singh, S., Yang, H., Wu, C., & Zhang, S. (2021). A thermogravimetric assessment of the tri-combustion process for coal, biomass and polyethylene. *Fuel*,

287. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119355>

Xue, Z., Zhong, Z., & Lai, X. (2020). Investigation on gaseous pollutants emissions during co-combustion of coal and wheat straw in a fluidized bed combustor. *Chemosphere*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124853>

