

Analisis Torefaksi Campuran Biomassa Limbah Sawit untuk Aplikasi *Co-Firing* pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap Menggunakan *Reaktor Fixed Bed*

Ade Sana Ruhiyat¹, Moch Zulfikar Eka Prayoga², Muhidin³

Prodi Teknik Elektro

Universitas Ibn Khaldun Bogor

Jalan Sholeh Iskandar km.2, Kedungbadak, Tanah Sareal, Kota Bogor 16164, Indonesia

email: ades009@brin.go.id

Abstrak

Peningkatan kebutuhan energi pada sektor ketenaga listrikan mendorong pemanfaatan biomassa sebagai bahan bakar alternatif dalam co-firing PLTU. Penelitian ini mengevaluasi karakteristik energi biomassa campuran tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dan pelepah sawit melalui proses torefaksi menggunakan oven tipe *fixed bed*. Sampel berbentuk padat (ER) dan serbuk (EP) dipanaskan pada suhu 200°C, 225°C, dan 250°C selama 15, 30, dan 60 menit dalam kondisi inert. Hasil menunjukkan nilai kalor meningkat dari 18,0 MJ/kg (raw) hingga 22,0 MJ/kg pada 250°C selama 60 menit. Namun, *energy yield* menurun signifikan hingga 8% pada kondisi ekstrem tersebut. Kondisi optimal diperoleh pada 225°C selama 15–30 menit dengan *energy yield* tertinggi 89,1%. Sampel EP mengalami degradasi lebih cepat akibat luas permukaan yang besar. Torefaksi terbukti efektif meningkatkan kualitas energi biomassa, namun perlu pengaturan suhu dan waktu untuk menjaga keseimbangan antara efisiensi energi dan rendemen **massa**. **Keywords: Torefaksi, Biomassa, Nilai Kalor, Co-firing, Konversi Energi**

Abstract

The increasing energy demand in the electricity sector encourages the use of biomass as an alternative fuel in the co-firing of coal-fired power plants (PLTU). This study evaluated the energy characteristics of mixed biomass of oil palm empty fruit bunches (EFB) and palm fronds through a torrefaction process using a fixed-bed oven. Solid (ER) and powder (EP) samples were heated at 200°C, 225°C, and 250°C for 15, 30, and 60 minutes under inert conditions. The results showed that the calorific value increased from 18.0 MJ/kg (raw) to 22.0 MJ/kg at 250°C for 60 minutes. However, the energy yield decreased significantly by up to 8% under these extreme conditions. The optimal condition was obtained at 225°C for 15–30 minutes with the highest energy yield of 89.1%. The EP sample experienced faster degradation due to its large surface area. Torrefaction has been proven effective in improving the energy quality of biomass, but temperature and time are required to maintain a balance between energy efficiency and mass yield.

Keywords: Torrefaction, Biomass, Calorific Value, Co-firing, Energy Conversion

I. LATAR BELAKANG

Kebutuhan listrik Indonesia pada tahun 2023 adalah 1.285 kWh dan meningkat menjadi 1.048 kWh pada tahun 2024. Disamping itu, data PT PLN mencatat pertumbuhan penjualan listrik sebesar 6,17% pada tahun 2024, mencapai 17,78 tWh [1]. Pembangkit listrik berbahan bakar fosil di Indonesia masih mendominasi sebanyak 85% dengan total kapasitas terpasang 79,7 GW pada tahun 2024. PLTU merupakan yang paling tinggi 53%, PLTG 27%, PLTD 5 % dan sebagian bersal dari pembangkit EBT 15% [2] [3]. Dalam upaya penurunan pembangkit bersumber bahan bakar fosil dan bentuk komitmen transisi energi, pemerintah Indonesia melalui Peraturan Presiden No. 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), menetapkan target peningkatan porsi EBT dalam bauran energi nasional sebesar 23% pada tahun 2025 [4]. Salah satu pendekatan teknis yang dikembangkan adalah penerapan *co-firing* biomassa pada PLTU, yaitu mencampurkan biomassa dengan batubara untuk mengurangi emisi karbon tanpa mengubah infrastruktur utama pembangkit [5]. Biomassa, khususnya dari limbah pertanian dan kehutanan, dinilai memiliki potensi besar sebagai bahan bakar alternatif. Potensi energi biomassa di Indonesia mencapai 470 GJ per tahun, dengan produksi biomassa diperkirakan mencapai 146,7 juta ton/tahun [6].

Biomassa merupakan bahan organik yang berasal dari organisme hidup seperti tumbuhan dan hewan. Berbeda dengan bahan bakar fosil, biomassa tidak membutuhkan waktu yang lama untuk dapat digunakan [7]. Biomassa yang berasal dari tanaman, secara umum terdiri atas 80% air dan 20% komponen kering (*dry matter*) lain yang tersimpan dari ujung akar hingga daun [8]. Unsur yang tersimpan dalam senyawa organik pada limbah biomassa memiliki pengaruh negatif dalam pemanfaatan sebagai bahan bakar campuran di PLTU. Kandungan klorin dan unsur alkali yang terdapat dalam abu biomassa menyebabkan terjadinya *slagging* dan *fouling*, serta korosi [9]. *Slagging* maupun *fouling* merupakan suatu kondisi penumpukan abu hasil pembakaran pada permukaan pipa penukar panas yang terjadi dalam boiler dan mengakibatkan penurunan efisiensi pembangkit dan menyebabkan kerusakan parah pada boiler [10].

Dalam upaya mencegah terjadinya hal tersebut, maka diperlukan suatu perlakuan khusus terhadap biomassa sehingga unsur pengganggu tersebut bisa dikurangi atau dihilangkan sebelum dimanfaatkan sebagai bahan bakar pendamping (*co-firing*) batubara [10]. Indonesia merupakan produsen minyak sawit terbesar dan menghasilkan produk samping berupa limbah tandan kosong sawit (TKKS) [11]. Limbah TKKS dapat dimanfaatkan sebagai bahan campuran bahan bakar karena potensi nilai kalornya yang tinggi [12]. Namun, limbah TKKS perlu dilakukan persiapan awal sebelum digunakan. Metode torefaksi adalah salahsatu yang dapat digunakan.

Torefaksi merupakan proses pemanasan suatu material pada yang diatur pada kondisi tertentu sehingga mendapatkan produk yang mempunyai karakteristik nilai kalori lebih tinggi dan kadar kelembaban rendah [3]. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui peningkatan kandungan energi pada biomassa TKKS dan pelepah sawit melalui percobaan torefaksi. Sehingga didapatkan data awal kualitas sampel untuk campuran bahan bakar pada proses *co-firing* di PLTU. Metode ini diklaim cukup efektif dalam meningkatkan kualitas biomassa ditinjau dari sisi kandungan energi.

Namun tidak cukup efektif untuk menurunkan resiko pembakaran yang disebabkan oleh abu yang dihasilkan [13]. Pengujian ini fokus pada dua jenis limbah yang berasal dari kelapa sawit, yaitu TKKS dan pelepah. Biomassa yang digunakan berasal dari limbah perkebunan kelapa sawit yang didapatkan dari daerah Kalimantan Timur, yang berupa tandan kosong dan pelepah. Tandan kosong merupakan sisa hasil pengolahan tandan buah segar yang telah melalui proses perebusan sampai pemerasan untuk diambil minyak yang tersimpan di dalam buah sawit.

Penelitian sebelumnya mengenai torefaksi dari biomassa yang berasal dari limbah sawit telah dilakukan oleh Hidayat (2020), torefaksi ini menggunakan Reaktor *Counter-Flow Multi Baffle* (COMB) hasilnya menunjukkan peningkatan kualitas pelet dengan nilai kalor pelet torefaksi meningkat 13,15% dari 15,82 MJ/kg menjadi 17,90 MJ/kg [14]. Wahyudi (2020) melakukan penelitian torefaksi dengan bahan limbah TKKS menggunakan reaktor tipe kontinu tubular hasilnya menunjukkan nilai HHV (*higher heating value*) terhadap produk padatan hasil torefaksi menunjukkan nilai kalor berkisar antara 16357.23 – 21083.98 kJ [15]. Penelitian torefaksi menggunakan reaktor putar dilakukan oleh Purnomo (2022) hasilnya menunjukkan torefaksi limbah tandan kosong sawit menurunkan kadar air dan kandungan selulosa pelet [16]. Maryenti (2017) melakukan penelitian torefaksi menggunakan bahan pelepah sawit dengan memvariasikan suhu dan waktu hasilnya menunjukkan peningkatan kalor hasil torefaksi $18152,26 \pm 24064,32$ kJ/kg [17]. Penelitian serupa menunjukkan belum adanya pengujian torefaksi dengan bahan limbah tandan kosong sawit menggunakan reaktor *fixed bed* dengan parameter pengujian tetap dan variabel. Pada penelitian ini pengujian dilakukan dengan menggunakan *reaktor fixed bed* dengan variasi suhu dan durasi pemanasan.

II. METODE PENELITIAN

Torefaksi dilakukan pada campuran tandan kosong kelapa sawit dan pelepah lolos ayakan 60 *mesh* dengan komposisi 50:50. Bahan campuran tersebut diberi kode ER untuk sampel dalam bentuk padatan dan kode EP untuk sampel bentuk serbuk.



Gambar 1. Tandan sawit



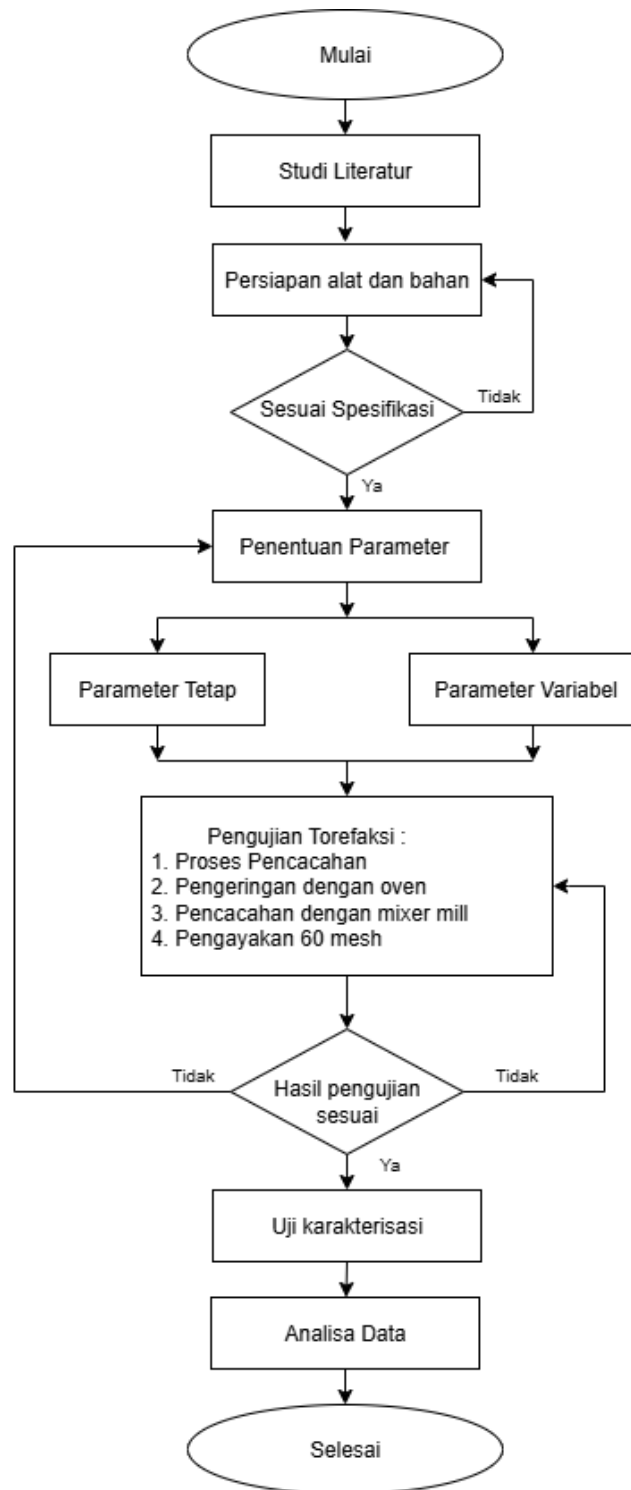
Gambar 2. Batang sawit



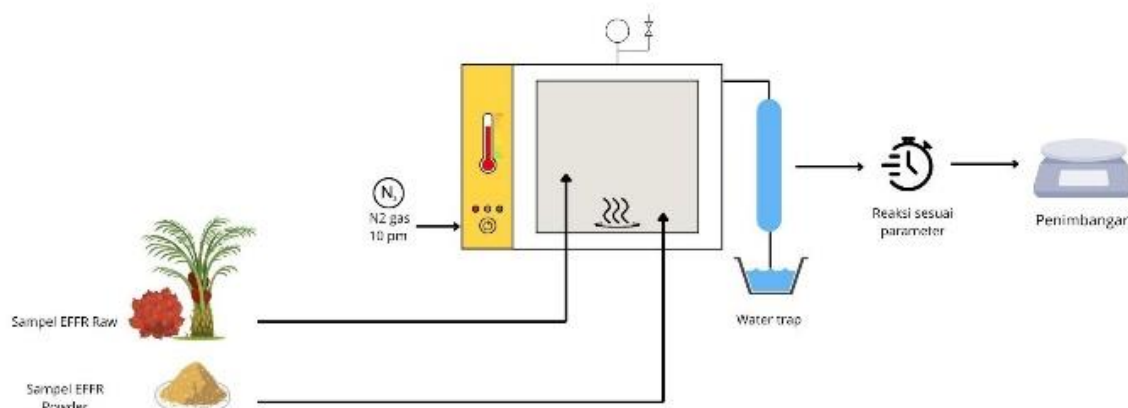
Gambar 3. Campuran tandan sawit kosong dan batang sawit dalam bentuk serbuk

Proses torefaksi dilakukan menggunakan sistem *fixed bed reactor* berbentuk *oven*, di mana bahan diletakkan pada sebuah wadah atau loyang dan dimasukkan ke dalam ruang pemanas berbentuk kubus yang terdiri dari beberapa rak. Oven torefaksi yang digunakan memiliki kapasitas 70 liter, pemanas menggunakan listrik dengan suhu pemanasan maksimal hingga 300 °C, serta elemen pemanas bertipe *finned element* dengan daya maksimum 6000-watt yang disuplai oleh listrik 3 fasa. Sensor suhu tipe RTD digunakan untuk memastikan suhu dalam ruang hingga 650 °C. Diagram alur penelitian ini ditunjukkan oleh gambar 4.

Dalam pengujian ini, parameter yang digunakan dibagi menjadi dua, yaitu parameter tetap dan parameter variabel. Parameter tetap meliputi: proses torefaksi dilakukan dalam kondisi tanpa oksigen (*inert*), sehingga sebelum dimulai dilakukan proses *flushing* menggunakan gas nitrogen selama kurang lebih 10 menit; laju alir nitrogen dijaga sebesar 10 liter per menit; dan setelah proses selesai, nitrogen kembali dialirkan ke dalam *oven* hingga suhu ruang pemanas turun sampai 100 °C. Parameter variabel yang digunakan terdiri atas variasi suhu pemanasan yaitu 200, 225, dan 250 °C, serta variasi durasi pemanasan selama 15, 30, dan 60 menit. Metode torefaksi pada penelitian ini ditunjukkan oleh gambar 5.



Gambar 4. Diagram Alir Penelitian



Gambar 5. Metode Torefaksi Yang Digunakan

III. Hasil Dan Pembahasan

Tabel 1 menunjukkan karakteristik dari sampel yang digunakan pada penelitian ini. Setiap sampel di uji menggunakan enam parameter untuk mengetahui komposisi kimianya. Pengujian *Total moisture* bertujuan untuk mengukur kandungan air sedangkan *inherent moisture* untuk mengukur kandungan air yang terikat secara kimiawi. *Ash content* adalah uji yang mengukur kadar abu atau kandungan zat organik yang tersisa setelah proses pembakaran dan volatil adalah uji yang mengukur senyawa organik yang menguap pada suhu tinggi [18].

Tabel 1. Karakteristik Sampel Raw Dan Uji

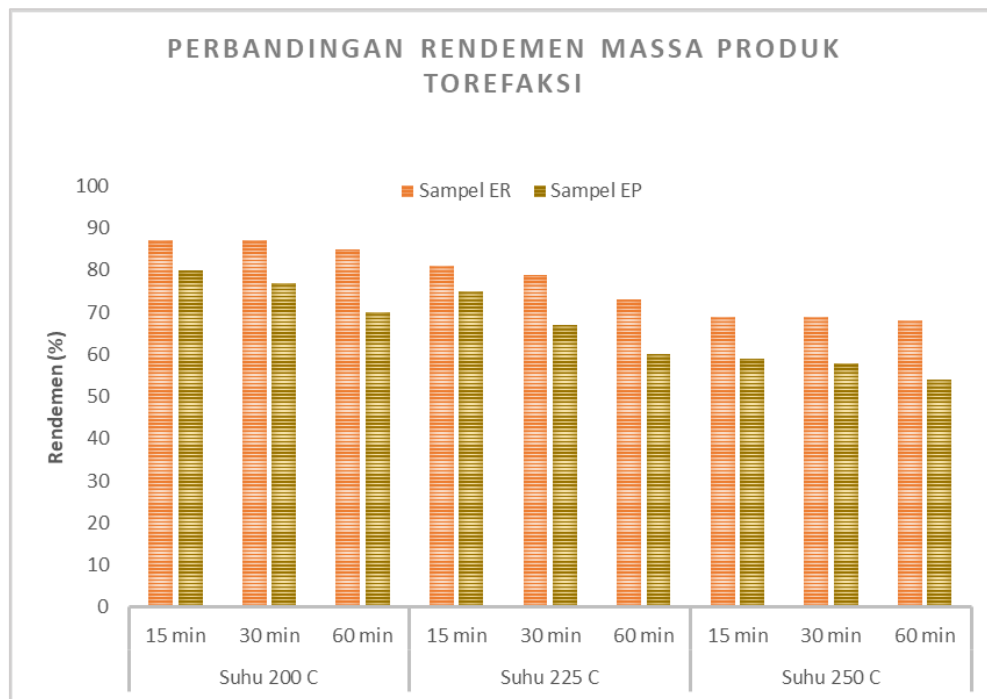
Parameter	Unit	Basis	Sampel		
			Raw	ER	EP
Total Moisture	%	ar	16.73	6.62	6.56
Inherent Moisture	%	adb	6.86	1.62	1.56
Ash Content	%	adb	4.89	4.04	6.21
Volatile Matter	%	adb	69.91	75.16	68.13
Fixed Carbon	%	adb	18.34	19.18	24.1
GCV	kcal/kg	adb	4052	4397	4490
GCV	kcal/kg	ar	3623	4174	4262
GCV	kcal/kg	db	4350	4469	4561

Gambar 6 menunjukkan perbandingan rendemen massa antara dua jenis sampel ER dan EP pada tiga variasi suhu 200°C, 225°C, dan 250°C serta tiga waktu pemanasan yaitu 15, 30, dan 60 menit. Rendemen massa adalah proses torefaksi yang menunjukkan seberapa besar massa padatan yang tersisa setelah proses termal. Secara umum, grafik menunjukkan rendemen menurun seiring dengan meningkatnya suhu dan waktu torefaksi [19]. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya degradasi termal komponen volatil yang mudah terurai pada suhu 200–250°C. Seiring waktu dan

kenaikan suhu, senyawa volatil akan lebih banyak keluar dalam bentuk gas dan tar, sehingga mengurangi massa padatan yang tersisa [19].

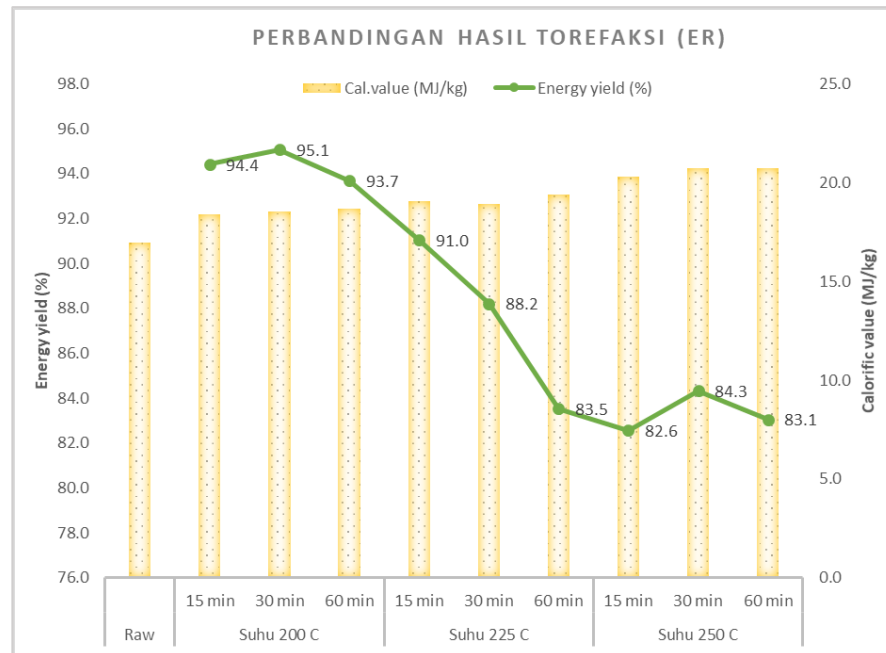
Sampel ER memiliki rendemen yang lebih tinggi dibandingkan Sampel B di semua kondisi perlakuan. Hal ini disebabkan oleh karakteristik awal kedua sampel. Analisa proksimat menunjukkan *volatile matter* EP (68.13%) lebih rendah dari ER (75.16%), yang mengindikasikan bahwa EP telah mengalami degradasi sebelum torefaksi dilakukan [19]. *Ash content* EP (6.21%) lebih tinggi dari ER (4.04%), yang berarti kandungan bahan anorganik dalam EP lebih besar, dan ini dapat memengaruhi kestabilan termal sampel. Fixed carbon EP lebih tinggi (24.1%) dibanding ER (19.18%) menunjukkan menandakan B menyimpan karbon padat lebih banyak sejak awal. Namun demikian, meskipun EP memiliki *fixed carbon* yang lebih tinggi, bentuk serbuk menyebabkan proses degradasi berlangsung lebih cepat karena luas permukaan lebih besar. Serbuk memiliki kecepatan perpindahan panas yang lebih tinggi sehingga lebih mudah mengalami pirolisis ringan selama torefaksi [20].

Kondisi suhu 200°C menghasilkan rendemen tertinggi (>80%) untuk kedua sampel. Suhu 225°C menunjukkan penurunan rendemen, terutama pada waktu 60 menit. Penurunan drastis terjadi pada suhu 250°C dan waktu 60 menit, di mana rendemen EP turun hingga mendekati 60%, sedangkan ER masih lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa bentuk dan ukuran partikel sangat memengaruhi ketahanan biomassa terhadap dekomposisi termal [21].



Gambar 6. Perbandingan rendemen sampel

Perbandingan hasil torefaksi sampel ER terhadap sampel raw ditunjukkan oleh gambar 7.

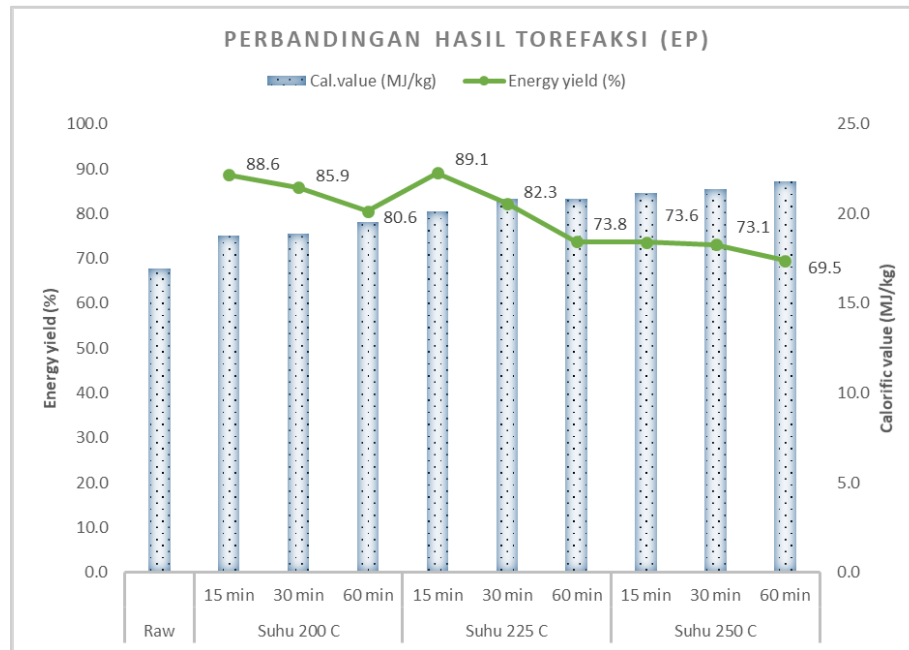


Gambar 7. Profil rendemen energi ER

Secara umum, gambar 7 menunjukkan peningkatan suhu dan waktu torefaksi, nilai kalor meningkat namun rendemen energi menurun. Nilai kalor bahan meningkat dari 19 MJ/kg pada sampel ER menjadi lebih dari 20 MJ/kg setelah torefaksi pada suhu 250°C selama 30–60 menit. Hal ini menunjukkan bahwa kandungan karbon meningkat dan biomassa [22]. Namun, peningkatan nilai kalor tersebut disertai dengan penurunan *energy yield* yang signifikan, dari 94% pada kondisi awal menjadi 8% pada suhu 250°C selama 60 menit. Penurunan ini disebabkan oleh kehilangan massa sebagai akibat dari volatilisasi zat-zat organik yang tidak stabil pada suhu tinggi [19]. Perbandingan hasil torefaksi sampel EP terhadap sampel raw ditunjukkan oleh gambar 5. Nilai kalor (calorific value) mengalami peningkatan signifikan seiring peningkatan suhu dan waktu torefaksi. Pada kondisi awal sampel raw nilai kalor 18,0 MJ/kg meningkat bertahap hingga mencapai 22,0 MJ/kg pada suhu 250°C selama 60 menit. Kenaikan nilai kalor ini menunjukkan torefaksi berhasil menurunkan kandungan air dan senyawa volatil, serta meningkatkan konsentrasi karbon tetap dalam sampel [21].

Sementara itu, *energy yield* yang menggabungkan hasil rendemen massa dan nilai kalor, menunjukkan tren sebaliknya. Nilai energi yield tertinggi tercatat pada suhu 225°C selama 15 menit sebesar 89,1%, yang menandakan efisiensi energi optimum. Namun, pada suhu yang lebih tinggi (250°C), meskipun nilai kalor meningkat, *energy yield* menurun secara signifikan hingga mencapai 69,5% pada 60 menit. Penurunan ini menunjukkan bahwa sebagian besar massa bahan telah hilang akibat dekomposisi termal, sehingga total energi yang dipertahankan dari bahan awal

menjadi rendah [19]. Faktor bentuk partikel serbuk sampel ER berkontribusi terhadap penurunan *energy yield* pada suhu tinggi. Luas permukaan yang besar mempercepat perpindahan laju panas dan reaksi pirolisis ringan, sehingga mempercepat penguapan senyawa volatil dan kehilangan massa [20]



Gambar 8. Profil Rendemen Energi EP

IV.KESIMPULAN

Sampel ER memiliki volatile matter yang lebih tinggi dan ash content yang lebih rendah dibandingkan EP yang memberikan ketahanan termal lebih baik selama proses torefaksi. Rendemen massa menurun seiring peningkatan suhu dan waktu torefaksi, dengan penurunan paling signifikan terjadi pada suhu 250°C selama 60 menit akibat volatilisasi senyawa organik. Nilai kalor meningkat seiring peningkatan suhu, dari 18,0 MJ/kg pada sampel raw menjadi 22,0 MJ/kg setelah torefaksi.

Peningkatan nilai kalor ini disertai dengan penurunan energy yield yang cukup signifikan, menandakan bahwa efisiensi energi optimum tercapai pada suhu sedang (225°C, 15 menit) dengan energy yield tertinggi sebesar 89,1%. Bentuk fisik serbuk. pada sampel EP mempercepat transfer panas dan laju degradasi, sehingga memperbesar kehilangan massa dan menurunkan energy yield pada suhu tinggi. Berdasarkan hal itu, proses torefaksi efektif meningkatkan kualitas energi biomassa, tetapi perlu dilakukan evaluasi terhadap suhu dan waktu untuk menjaga keseimbangan antara nilai kalor dan rendemen energi. Suhu 225°C selama 15–30 menit merupakan kondisi yang optimal dalam proses torefaksi biomassa tandan kosong kelapa sawit, khususnya dalam bentuk serbuk.

V. REFERENSI

- [1] Dirjen Ketenaga Listrik, “Road to GTCS ITS,” *Kementrian ESDM*, Jakarta, 2024.
- [2] PT PLN, “Statistik PLN 2024,” *Statistik PLN 2024*, 2024. [Online]. Available: <https://web.pln.co.id/statics/uploads/2025/02/Statistik-PLN-2024-Unaudited-28.2.25.pdf>. [Accessed: 02-Jul-2025].
- [3] Kementerian ESDM, “Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia,” Jakar, 2023.
- [4] M. Gupta, R. Pigeon, and A. McFarlan, “3-Stage hauling of biomass residues and its impact on reducing fossil energy footprint of oil sands derived crude,” *J. Clean. Prod.*, vol. 233, pp. 1545–1557, 2019.
- [5] M. V Gil and F. Rubiera, “Coal and biomass cofiring: fundamentals and future trends,” in *New Trends in Coal Conversion*, Elsevier, 2019, pp. 117–140.
- [6] M. M. Tun, D. Juchelkova, M. M. Win, A. M. Thu, and T. Puchor, “Biomass energy: An overview of biomass sources, energy potential, and management in Southeast Asian countries,” *Resources*, vol. 8, no. 2, p. 81, 2019.
- [7] P. Basu, *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory*. Academic press, 2018.
- [8] Univ Medan Are, “Energi Biomassa,” 2020. [Online]. Available: <https://mesin.uma.ac.id/2020/02/07/energi-biomassa/#:~:text=Biomassa benar-benar mengering sehingga kehilangan kemampuan untuk,digunakan sebagai bahan bakar untuk proses torrefaction.> [Accessed: 21-Sep-2024].
- [9] H. P. Putra, F. M. Kuswa, H. Ghazidin, A. Darmawan, Prabowo, and Hariana, “Slagging-fouling evaluation of emptyfruit bunch and palm oil frond mixture with bituminous ash coal as co-firing fuel,” *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 22, no. May, p. 101489, 2023.
- [10] H. Ghazidin *et al.*, “Slagging, Fouling, Abrasion, and Corrosion Potential in Cofiring Biomass SRF With Bituminous Coal Blend,” *Energy Proc. Vol. 31*, vol. 31, pp. 1–6, 2023.
- [11] M. Maryudi, “Karakteristik Torrefaksi dan Densifikasi Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit,” *Chem. J. Tek. Kim.*, vol. 1, no. 2, pp. 77–84, 2014.
- [12] Hariana, Prabowo, E. Hilmawan, F. M. Kuswa, A. Darmawan, and M. Aziz, “A comprehensive evaluation of cofiring biomass with coal and slagging-fouling tendency in pulverized coal-fired boilers,” *Ain Shams Eng. J.*, p. 102001, 2023.
- [13] W.-H. Chen, S.-W. Du, C.-H. Tsai, and Z.-Y. Wang, “Torrefied biomasses in a drop tube furnace to evaluate their utility in blast furnaces,” *Bioresour. Technol.*, vol. 111, pp. 433–438, 2012.
- [14] W. Hidayat *et al.*, “Peningkatan kualitas pelet tandan kosong kelapa sawit melalui torefaksi menggunakan reaktor Counter-Flow Multi Baffle (COMB),” *J. Rekayasa Proses*, vol. 14, no. 2, pp. 169–181, 2020.

- [15] 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.
- [16] C. E. Purnomo, A. Haryanto, F. K. Wisnu, and M. Telaumbanua, “Torefaksi pelet tandan kosong kelapa sawit menggunakan reaktor putar,” *J. Agric. Biosyst. Eng.*, vol. 1, no. 1, 2022.
- [17] R. Maryenti, K. Komalasari, and Z. Helwani, “Pembuatan Bahan Bakar Padat dari Pelepah Sawit Menggunakan Proses Torefaksi pada Variasi Suhu Waktu Torefaksi.” Riau University, 2017.
- [18] ASTM D3172-07a, “Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke,” 2010.
- [19] M. Phanphanich and S. Mani, “Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass,” *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 2, pp. 1246–1253, 2011.
- [20] J. Wannapeera, B. Fungtammasan, and N. Worasuwannarak, “Effects of temperature and holding time during torrefaction on the pyrolysis behaviors of woody biomass,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 92, no. 1, pp. 99–105, 2011.
- [21] W.-H. Chen and P.-C. Kuo, “A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry,” *Energy*, vol. 35, no. 6, pp. 2580–2586, 2010.
- [22] T. Bhaskar, B. Bhavya, R. Singh, D. V. Naik, A. Kumar, and H. B. Goyal, “Thermochemical conversion of biomass to biofuels,” in *Biofuels*,