

Analisis Teoritis Perhitungan *High Heating Value* (HHV) *Bio-Coal* Berbahan Dasar Tandan Kosong Kelapa Sawit

Nur Khotimah¹, Awaludin Martin^{1*}

¹Laboratorium Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Riau
Kampus Bina Widya KM. 12,5, Simpang Baru, Kec. Tampan, Kota Pekanbaru, Riau 28293

*Corresponding author: awaludinmartin01@gmail.com

Abstract

Oil palm empty fruit bunches can be used as a renewable energy source made into bio-coal through the torrefaction process. The combustion value of oil palm empty fruit bunches is expressed in terms of heating value to indicate the amount of energy obtained. The heating value is also known as the heat value of the fuel, which is one of the important parameters for fuel quality. This study aims to calculate the high heating value of bio-coal theoretically and compare it with experimental results. High heating value is calculated based on the enthalpy of combustion (h_c), which indicates the amount of energy released during the combustion process when the fuel is completely burned at a certain temperature and pressure. In other words, the heating value of the fuel is equal to the absolute value of the enthalpy of combustion of the fuel. The theoretical calculation results are different or smaller than the experimental data. Experimentally the high heating value with a sample weight of 0.25 kg, 0.5 kg and 1 kg is 20334 kJ/kg, 23578 kJ/kg, 26346 kJ/kg respectively, while the theoretical high heating value for sample weight 0.25 kg, 0.5 kg and 1 kg respectively amounted to 22053.60 kJ/kg, 22751.66 kJ/kg, 24147.69 kJ/kg. Variability in biomass composition such as chemical elements or components, moisture content, particle size, and volatile matter content can have a significant effect on combustion value.

Keywords: *empty palm fruit bunch, heating value, torrefaction, enthalpy.*

Abstrak

Tandan kosong kelapa sawit dapat dijadikan sebagai sumber energi terbarukan yang dibuat menjadi *bio-coal* melalui proses torefaksi. Nilai pembakaran tandan kosong kelapa sawit dinyatakan dalam bentuk nilai kalor (*heating value*) untuk menunjukkan jumlah energi yang diperoleh. Nilai kalor juga dikenal sebagai nilai panas dari bahan bakar, yang merupakan salah satu parameter penting untuk kualitas bahan bakar. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung nilai kalor atas (*high heating value*) pada *bio-coal* secara teoritis dan membandingkannya dengan hasil eksperimen. *High heating value* dihitung berdasarkan entalpi pembakaran (h_c), yang menunjukkan jumlah energi yang dilepaskan selama proses pembakaran ketika bahan bakar dibakar seluruhnya pada temperatur dan tekanan tertentu. Dengan kata lain, nilai kalor bahan bakar sama dengan nilai mutlak entalpi pembakaran bahan bakar. Hasil perhitungan secara teoritis berbeda atau lebih kecil dibandingkan dengan data eksperimen. Secara eksperimen nilai kalor dengan berat sampel 0,25 kg, 0,5 kg dan 1 kg masing-masing sebesar 20334 kJ/kg, 23578 kJ/kg, 26346 kJ/kg, sedangkan nilai kalor teoritis untuk berat sampel 0,25 kg, 0,5 kg dan 1 kg masing-masing sebesar 22053,60 kJ/kg, 22751,66 kJ/kg, 24147,69 kJ/kg. Variabilitas dalam komposisi biomassa seperti unsur atau komponen kimia, kandungan air, ukuran partikel, dan kandungan zat-zat volatil dapat memiliki efek signifikan terhadap nilai pembakaran.

Kata kunci: tandan kosong kelapa sawit, nilai kalor, torefaksi, entalpi.

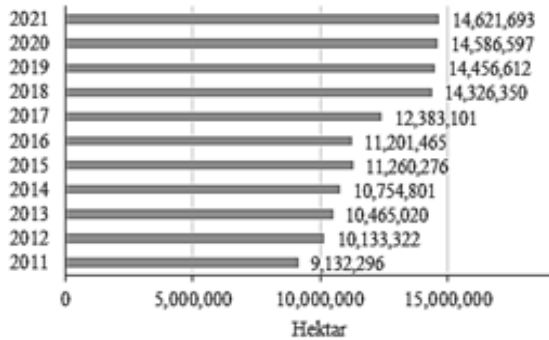
1. Pendahuluan

Salah satu yang termasuk dalam kategori jenis energi terbarukan adalah biomassa [1], terutama yakni limbah dari biomassa yang menjadi salah satu opsi penting untuk memenuhi cadangan tersebut. Pemanfaatan utama dari penggunaan sumber energi terbarukan adalah untuk mengurangi emisi karbon dioksida yang mendorong terjadinya pemanasan global [2]. Sumber energi biomassa mempunyai

beberapa kelebihan antara lain merupakan sumber energi yang dapat diperbaharui sehingga dapat menyediakan sumber energi secara berkesinambungan [3].

Menurut pengelolannya, mayoritas perkebunan kelapa sawit di Indonesia dikelola oleh negara dan swasta dengan luasan mencapai 8,83 juta ha. Sedangkan, perkebunan sawit seluas 6,16 juta ha dikelola oleh rakyat. Lebih lanjut, Riau

memiliki luas perkebunan sawit terbesar di Indonesia pada 2022, yakni 2,86 juta ha [4]. Grafik luas perkebunan kelapa sawit di Indonesia dari tahun 2011-2021 dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Grafik Luas Perkebunan Kelapa Sawit di Indonesia (2011-2021) [4]

Limbah padat yang berasal dari proses pengolahan kelapa sawit terdiri dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS), cangkang atau tempurung, serabut atau serat, lumpur, dan bungkil. Dari 1 ton tandan buah segar, dihasilkan sebanyak 21% TKKS [5]. Secara umum, biomassa mempunyai karakteristik seperti kadar air dan zat terbang tinggi, kadar karbon padat dan nilai kalor relatif rendah [6]. Pembakaran TKKS sebagai bahan bakar dapat menyebabkan *fouling* dan *slagging*, dikarenakan konsentrasi tinggi klorin (Cl) dan kalium (K) yang terkandung menghasilkan banyak deposit yang tidak dapat dikelola dengan cepat di permukaan yang terbakar, sehingga menyebabkan korosi dan mengurangi efisiensi boiler [7].

Pemanfaatan biomassa sebagai bahan bakar diperlukan *pre-treatment* untuk meningkatkan nilai kalor dan menurunkan kadar air, agar menghasilkan bahan bakar padat dengan karakteristik mendekati batubara dalam hal nilai kalor [8]. Peningkatan kualitas TKKS dapat dilakukan melalui metode torefaksi. Proses torefaksi dapat menghasilkan nilai kalor tinggi dan sifat-sifat lain seperti sifat hidrofobik dan peningkatan karakteristik penggilingan (*grindability*) yang lebih baik dibandingkan dengan biomassa yang tidak melalui proses torefaksi [9]. Torefaksi merupakan proses

termokimia yang melibatkan pemanasan biomassa pada temperatur 200-300°C [10]. Kualitas produk torefaksi sangat ditentukan oleh karakteristik biomassa, temperatur dan lamanya proses. Semakin tinggi temperatur dan semakin lama waktu tinggal sampel pada proses torefaksi maka nilai kalor yang diperoleh akan semakin tinggi [11], namun semakin lama proses torefaksi juga dapat menyebabkan komponen energi hilang sehingga kandungan energi akan menurun [12].

Pembakaran atau oksidasi merupakan proses reaksi kimia antara bahan bakar dengan oksidator yang menghasilkan panas. Reaksi kimia pada proses oksidasi umumnya adalah reaksi eksoterm [13]. Dalam pembakaran bahan bakar biomassa, terjadi reaksi kimia antara material organik dengan oksigen di udara, menghasilkan panas, gas buang, dan residu abu [14]. Nilai pembakaran merupakan parameter penting yang mencerminkan jumlah energi yang dapat dihasilkan dari pembakaran bahan bakar. Pada biomassa, nilai pembakaran menggambarkan potensi energi yang terkandung dalam material organik tersebut [15]. Nilai pembakaran biomassa biasanya dinyatakan dalam bentuk nilai kalor atau nilai panas dari bahan bakar.

Perhitungan nilai kalor secara teoritis sangat penting karena memberikan pemahaman yang mendalam tentang jumlah energi yang terkandung, karakteristik bahan bakar atau substansi yang diuji, serta meningkatkan validitas hasil pengujian dan mengoptimalkan penggunaan energi. Artikel ini bertujuan untuk menghitung nilai kalor (*high heating value*) pada *bio-coal* secara teoritis dan membandingkannya dengan hasil eksperimen.

2. Metode Penelitian

Termodinamika Pembakaran

Teori termodinamika digunakan untuk menganalisis perubahan energi dan keadaan termal selama proses pembakaran biomassa. Hukum pertama termodinamika (hukum kekekalan energi) digunakan untuk memahami perubahan energi yang terjadi

selama reaksi pembakaran. Hukum kedua termodinamika (hukum entropi) digunakan untuk mempelajari efisiensi termal dan kerugian energi dalam sistem pembakaran [16].

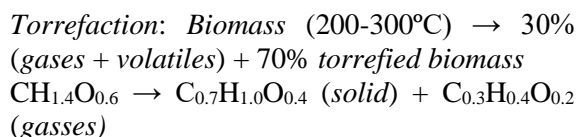
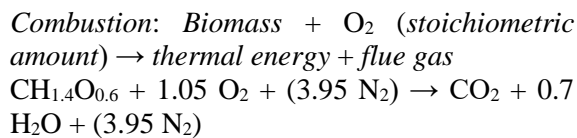
Hukum termodinamika pertama menyatakan bahwa perubahan energi dalam sistem sama dengan jumlah energi yang masuk dikurangi jumlah energi yang keluar. Persamaan matematisnya dapat ditulis sebagai berikut [17]:

$$\Delta U = Q - W \quad (1)$$

Di mana ΔU adalah perubahan energi dalam sistem, Q adalah panas yang masuk ke sistem, dan W adalah kerja yang dilakukan oleh sistem. Hukum termodinamika kedua menyatakan bahwa dalam setiap proses spontan, entropi sistem dan lingkungan akan meningkat atau setidaknya tetap konstan [18]. Hukum ini digunakan untuk menganalisis efisiensi termal sistem pembakaran biomassa.

Konversi Termal Biomassa

Konversi termal adalah penggunaan panas untuk mengubah biomassa menjadi jenis energi dan barang lain, dengan atau tanpa kehadiran oksigen. Bergantung pada suhu dan jumlah oksigen selama dekomposisi termal biomassa, terdapat beberapa proses yang dapat terjadi seperti pengeringan, torefaksi, karbonisasi, pirolisis, gasifikasi dan pembakaran, yang dapat dikarakterisasi sebagai berikut [19]:



Entalpi

Entalpi merupakan variabel yang terikat dengan temperatur. Sehingga, entalpi berubah secara drastis dari negatif (melepas

panas) dan positif (menyerap panas) [20]. Oleh karena itu, maka pengaruh temperatur torefaksi terhadap pembentukan produk juga harus diamati. Untuk itu, perlu dilakukan pengidentifikasian berapa besar entalpi atau perubahan entalpi yang dihasilkan selama proses yang mengikuti fungsi temperatur torefaksi tersebut.

Untuk proses pembakaran, entalpi reaksi biasanya disebut sebagai entalpi pembakaran (h_c), yang menunjukkan jumlah energi yang dilepaskan selama proses pembakaran aliran tetap ketika 1 kmol (atau 1 kg) bahan bakar dibakar seluruhnya pada temperatur dan tekanan tertentu. Itu diungkapkan sebagai [17]:

$$h_R = h_C = H_{\text{prod}} - H_{\text{react}} \quad (2)$$

Entalpi pembakaran jelas merupakan sifat yang sangat berguna untuk menganalisis proses pembakaran bahan bakar. Namun, ada begitu banyak bahan bakar dan campuran bahan bakar yang berbeda sehingga tidak praktis untuk mencantumkan nilai h_c untuk semua kemungkinan kasus. Oleh karena itu, pendekatan yang lebih praktis adalah menggunakan sifat yang lebih mendasar untuk merepresentasikan energi kimia suatu unsur atau senyawa dalam keadaan referensi tertentu. Properti ini adalah entalpi pembentukan (\bar{h}_f), yang dapat dilihat sebagai entalpi suatu zat pada keadaan tertentu karena komposisi kimianya.

Entalpi adalah nilai kerja persatuan massa yang dapat dituliskan dalam bentuk persamaan sebagai berikut [17]:

$$\text{Entalpi} = \bar{h}_f^\circ + (\bar{h} - \bar{h}^\circ) \quad (3)$$

Atau persamaan pembakaran aliran tetap dapat dituliskan sebagai berikut:

$$H_{\text{Prod}} = \sum N_p \left(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ \right)_p \quad (4)$$

$$H_{\text{Reakt}} = \sum N_r \left(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ \right)_r \quad (5)$$

Nilai kalor

Nilai kalor merupakan salah satu parameter penting dalam kualitas bahan bakar. Nilai kalor atas atau *high heating value* (HHV) dan komposisi biomassa padat merupakan sifat penting yang menentukan kandungan energi dan menentukan penggunaan energi bersih dan efisien suatu bahan bakar [21]. Ada berbagai korelasi untuk memprediksi HHV umumnya dari analisis ultimate dan proximate bahan bakar. Analisis *ultimate* atau elemen komponen kimia seperti (C, H, O, N, S) sedangkan analisis *proximate* seperti kadar abu, kadar air, *fixed carbon*, dan *volatile matter* [22]. HHV diperoleh ketika seluruh air hasil pembakaran dalam wujud cair sedangkan LHV diperoleh ketika seluruh air hasil pembakaran dalam bentuk uap [23]. Untuk mengetahui nilai kalor bahan bakar dari tandan kosong kelapa sawit yang telah dilakukan proses torefaksi (*bio-coal*) akan diukur menggunakan alat *bomb calorimeter* [24].

Nilai kalor bahan bakar yang didefinisikan sebagai jumlah kalor yang dilepaskan ketika bahan bakar dibakar sepenuhnya dalam proses aliran tunak dan produk dikembalikan ke keadaan reaktan. Dengan kata lain, nilai kalor bahan bakar sama dengan nilai mutlak entalpi pembakaran bahan bakar [17].

$$\text{Heating value} = |h_c| \quad (6)$$

Nilai kalor tergantung pada fase H₂O dalam produk. *High heating value* jika H₂O dalam produk berbentuk cair, dan disebut *low heating value* jika H₂O dalam produk berbentuk uap. Kedua nilai kalor tersebut dihubungkan oleh [17]:

$$\text{HHV} = \text{LHV} + (m \cdot h_{fg}) \quad (7)$$

$$\text{LHV} = Q_{\text{out}}$$

Metode yang paling umum digunakan saat ini untuk menghitung pemanasan biomassa adalah rumus turunan Dulong atau penggunaan eksperimen bomb kalorimeter. Ada banyak persamaan

matematis berdasarkan informasi yang dikumpulkan dari komposisi biomassa, seperti perkiraan atau analisis unsur biomassa [25].

Rumus Dulong dapat digunakan untuk mengestimasi nilai kalor bahan bakar tersebut dari analisis unsur (*ultimate*) dengan beberapa asumsi yang ditemukan dalam literatur. Persamaannya adalah sebagai berikut [26]:

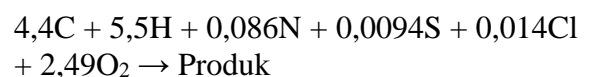
$$\text{HHV} = 339 (\%C) + 1427 \left(\%H - \frac{\%O}{8} \right) + 92 (\%S) \quad (8)$$

3. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian sebelumnya menunjukkan bahwa dengan proses torefaksi pada tandan kosong kelapa sawit sebagai bahan produksi *bio-coal* dapat meningkatkan nilai kalor yang terkandung dalam sampel tersebut. Tandan kosong kelapa sawit mentah yang diuji menggunakan bomb kalorimeter dengan tanpa perlakuan hanya sebesar 7333,40 kJ/kg [12]. kemudian setelah dilakukan proses torefaksi nilai kalor pada sampel meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur proses yang diuji.

Untuk mengetahui karakteristik, sifat fisik, sifat kimia suatu biomassa dapat dilakukan dengan analisis *proximate* dan *ultimate*. Hasil analisis *proximate* dan *ultimate bio-coal* dari tandan kosong kelapa sawit dapat dilihat pada Tabel 1.

Dalam persamaan reaksi pembakaran bahan bakar akan bereaksi dengan oksigen untuk menghasilkan produk pembakaran. Persamaan reaksi pembakaran dapat dituliskan sebagai berikut:



Dari data analisis *proximate* dan *ultimate* dapat diketahui nilai kalor biomassa dengan persamaan Dulong seperti berikut:

$$\begin{aligned} \text{HHV}_{\text{raw}} &= 339 (52,7) + 1427 \left(5,5 - \frac{39,8}{8} \right) + \\ & 92 (0,3) \\ &= 18642,08 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Tabel 1. Analisis Proximate dan Ultimate

	Item	Unit
Analisis Proximate	Kadar Air	69% Berat
	Kadar Abu	4,7% Berat (Kering)
	Zat Terbang	76,5% Berat (Kering)
	Karbon Padat	18,8% Berat (Kering)
Analisis Ultimate	Karbon (C)	52,7% Berat (Kering)
	Hidrogen (H)	5,5% Berat (Kering)
	Nitrogen (N)	1,2% Berat (Kering)
	Sulfur (S)	0,3% Berat (Kering)
	Khlor (Cl)	0,5% Berat (Kering)
	Oksigen (O)	39,8% Berat (Kering)

Pada Tabel 3 menunjukkan hasil dari proses produksi *bio-coal* dengan total

Tabel 3. Entalpi Reaktan Proses Pengeringan (*Drying*)

Unsur reaktan	\bar{h}_f°	\bar{h} 30°C	\bar{h} 105°C	ΣN_r	H reaktan	
	(kJ/kmol)	(kJ/kmol)	(kJ/kmol)		kmol	kJ/Kmol
C	0	12537,61	14730,34	0,044	96,48	2,193
H	218000	8070,34	10248,73	0,055	12109,81	275,22
O	249190	8819,18	11044,85	0,0249	6260,25	142,28
N	472650	8809,5	10999,08	0,0086	4083,62	92,81
H ₂ O	241820	2266,73	48387,72	0,0383	11028,14	250,86
Jumlah					33578,30	763,36

Entalpi reaktan dan produk:

$$\begin{aligned} H_r &= \Sigma N_r (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_C \\ &= 96,48 \text{ kJ/kmol} = 2,193 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$H_{r,\text{total}} = 763,36 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{\text{in}} = \text{HHV}_{\text{raw}} = 18642,08 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned} H_{\text{pro, dry}} &= Q_{\text{in, raw}} + H_{\text{reaktan}} \\ &= 18642,08 \text{ kJ/kg} + 763,36 \text{ kJ/kg} \\ &= 19405,44 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Nilai kalor pengeringan sampel 0,25 kg:

$$\begin{aligned} \text{HHV}_{\text{dry}} &= 19405,44 + \Delta H_{\text{dry}} + (m \cdot h_g) \\ &= 19405,44 + 0,57 + (0,25 \times 2683,4) \end{aligned}$$

jumlah energi pada proses pengeringan dan proses torefaksi. Hasil tersebut berdasarkan konsumsi energi dan waktu konsumsi energi selama proses produksi *bio-coal*.

Tabel 2. Jumlah Energi Proses Pengeringan dan Proses Torefaksi

Sampel (kg)	Total energi (kJ)		
	Pengeringan	Torefaksi	Total
0,25	0,57	0,46	1.03
0,5	0,65	0,44	1.09
1	0,69	0,43	1.12

Nilai entalpi menunjukkan potensi energi pada kandungan produk torefaksi dimana produk *bio-coal* merupakan bahan bakar padat dari tandan kosong kelapa sawit. Hasil nilai entalpi untuk masing-masing temperatur proses pengeringan dan torefaksi dapat dilihat pada Tabel 3 dan 5.

$$= 20076,86 \text{ kJ/kg}$$

Tabel 4. Nilai Kalor Proses Pengeringan

h_g (T=105°C)	berat (kg)	HHV (kJ/kg)
	0,25	20076,86
2683,4	0,5	20747,79
	1	22089,53

Berdasarkan Tabel 4 hasil dari proses pengeringan diperoleh nilai kalor sebesar 20076,86 kJ/kg dengan berat sampel 0,25 kg. Peningkatan nilai kalor berbanding lurus dengan berat sampel yang diuji, semakin berat sampel maka nilai kalor pada proses tersebut juga meningkat.

Tabel 5. Entalpi Reaktan Proses Torefaksi

Unsur reaktan	\bar{h}°_f	\bar{h} 105°C	\bar{h} 200°C	ΣNr	H reaktan	
	(kJ/kmol)	(kJ/kmol)	(kJ/kmol)		(kmol)	kJ/Kmol
C	0	14730,34	17529,36	0,044	123,16	2,799
H	218000	10248,73	13023,59	0,055	12142,62	275,97
O	249190	11044,85	13930,52	0,0249	6276,68	142,65
N	472650	10999,08	13786,58	0,0086	4088,76	92,93
Jumlah					22631,22	514,35

Entalpi reaktan dan produk:

$$\begin{aligned}
 H_{\text{pro,tor}} &= Q_{\text{in,dry}} + H_{\text{reaktan}} \\
 &= 20076,86 \text{ kJ/kg} + (763,36 + 514,35) \text{ kJ/kg} \\
 &= 21354,57 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

Nilai kalor torefaksi sampel 0,25 kg:

$$\begin{aligned}
 HHV_{\text{tor}} &= 21354,57 + \Delta H_{\text{tor}} (m \cdot h_g) \\
 &= 21354,57 + 1,03 + (0,25 \times 2792) \\
 &= 22053,60 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

Tabel 6. Nilai Kalor Proses Torefaksi

h_g (T=200°C)	berat (kg)	HHV (kJ/kg)
	0,25	22053,60
2792	0,5	22751,66
	1	24147,69

Berdasarkan Tabel 6 hasil dari proses torefaksi nilai kalor terbesar diperoleh 24147,69 kJ/kg pada berat sampel 1 kg. Secara teoritis, jika dilihat dari berat sampel pengujian torefaksi bahwa nilai kalor juga meningkat. Peningkatan nilai kalor dengan proses torefaksi disebabkan karena kandungan air dari TKKS semakin menurun dan kandungan karbon meningkat.

Tabel 7. Nilai Kalor Eksperimen dan Teoritis

Sampel (kg)	Nilai kalor Eksperimen (kJ/kg)	Nilai kalor Teoritis (kJ/kg)
0,25	20334	22053,60
0,5	23578	22751,66
1	26346	24147,69

Berdasarkan Tabel 7 ditampilkan nilai kalor hasil eksperimen dan nilai kalor secara teoritis. Nilai kalor yang dihasilkan sama-sama meningkat dengan berat sampel

serta tingginya temperatur proses yang diuji. Pada berat sampel 0,25 kg nilai kalor teoritis lebih besar dibandingkan dengan eksperimen, dengan nilai kalor sebesar 22053,60 kJ/kg untuk teoritis dan 20334 kJ/kg untuk eksperimen. Namun ketika berat sampel dinaikkan ke 0,5 dan 1 kg, nilai kalor eksperimen secara keseluruhan lebih tinggi dibandingkan dengan hasil perhitungan secara teoritis. Hasil perhitungan teoritis menunjukkan bahwa nilai kalor yang dihitung meningkat dengan seragam.

4. Kesimpulan

Hasil perhitungan secara teoritis berbeda atau lebih kecil dibandingkan dengan data eksperimental. Secara eksperimen nilai kalor dengan berat sampel 0,25 kg, 0,5 kg dan 1 kg masing-masing sebesar 20334 kJ/kg, 23578 kJ/kg, 26346 kJ/kg. Sedangkan nilai kalor teoritis untuk berat sampel 0,25 kg, 0,5 kg dan 1 kg masing-masing sebesar 22053,60 kJ/kg, 22751,66 kJ/kg, 24147,69 kJ/kg. Variabilitas dalam komposisi biomassa seperti unsur atau komponen kimia, kandungan air, ukuran partikel, dan kandungan zat-zat volatil dapat memiliki efek signifikan terhadap nilai pembakaran.

Referensi

- [1] Huang, C. W., Nguyen, B. S., Wu, J. C. S., & Nguyen, V. H. (2020). A current perspective for photocatalysis towards the hydrogen production from

- biomass-derived organic substances and water. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(36), 18144-18159.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.121>.
- [2] Bamati, N., & Raofi, A. (2020). Development level and the impact of technological factor on renewable energy production. *Renewable Energy*, 151, 946-955.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.098>.
- [3] Wang, M., Wang, G., Sun, Z., Zhang, Y., & Xu, D. (2019). Review of renewable energy-based hydrogen production processes for sustainable energy innovation. *Global Energy Interconnection*, 2(5), 436-443.
<https://doi.org/10.1016/j.gloi.2019.11.019>.
- [4] Informasi dari <https://dataindonesia.id/sector-riil/detail/luas-kebun-sawit-indonesia-hampir-15-juta-hektare-pada-2022> (diakses pada Selasa-April-2023).
- [5] Singh, A. D., Gajera, B., & Sarma, A. K. (2022). Appraising the availability of biomass residues in India and their bioenergy potential. *Waste Management*, 152, 38-47.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.08.001>.
- [6] Poomsawat, S., & Poomsawat, W. (2021). Analysis of hydrochar fuel characterization and combustion behavior derived from aquatic biomass via hydrothermal carbonization process. *Case Studies in Thermal Engineering*, 27, 101255.
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101255>.
- [7] Hilmawan, E., Kuswa, F. M., Darmawan, A., & Aziz, M. (2023). A comprehensive evaluation of cofiring biomass with coal and slagging-fouling tendency in pulverized coal-fired boilers. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(7), 102001.
<https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.102001>.
- [8] Arifin, Z., Amrul, A., & Irsyad, M. (2021). Simulasi co-combustion batubara dan biomassa tandan kosong kelapa sawit tertorefaksi (torrefied biomass). *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 10(1).
- [9] Wang, L., Riva, L., Skreiberg, Ø., Khalil, R., Bartocci, P., Yang, Q., & Nielsen, H. K. (2020). Effect of torrefaction on properties of pellets produced from woody biomass. *Energy & Fuels*, 34(12), 15343-15354.
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c02671>.
- [10] Mamvura, T.A. and Danha, G., (2020), Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production, *Heliyon*, 6, e03531.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03531>.
- [11] Martin, A. (2021). Pemanfaatan Air Gambut Untuk Meningkatkan Kualitas Produksi Biocoal dari Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Dengan Variasi Waktu dan Temperatur Proses Torefaksi. *Rekayasa Journal of Science and Technology*, 14(3), 450-455.
<https://doi.org/10.21107/rekayasa.v14i3.12226>
- [12] Martin, A., Utama, P. S., Ginting, Y. R., & Khotimah, N. (2021). Improvement of Biocoal Quality from Empty Oil Palm Fruit Bunches by

- Using Peat Water to Reducing Potassium Content and Torrefaction at 300°C to Increasing Heating Value. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 90(2), 32-41. <https://doi.org/10.37934/arfmts.90.2.3241>.
- [13] Sutarto, H., Nurrohim, T. G., Ilyas, A. X., & Suyitno, S. (2020). Pembakaran bersama biomassa dan batu bara: Pengaruh rasio biomassa-batu bara dan excess air. *Mekanika: Majalah Ilmiah Mekanika*, 19(1), 29-34.
- [14] Glushkov, D. O., Nyashina, G. S., Anand, R., & Strizhak, P. A. (2021). Composition of gas produced from the direct combustion and pyrolysis of biomass. *Process Safety and Environmental Protection*, 156, 43-56. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.09.039>.
- [15] González-Arias, J., Sánchez, M. E., Martínez, E. J., Covalski, C., Alonso-Simón, A., González, R., & Cara-Jiménez, J. (2020). Hydrothermal carbonization of olive tree pruning as a sustainable way for improving biomass energy potential: effect of reaction parameters on fuel properties. *Processes*, 8(10), 1201. <https://doi.org/10.3390/pr8101201>.
- [16] Usarov, R. R., & Asatov, U. T. (2022). Laws Of Thermodynamics in Biological Processes. *American Journal of Applied Science and Technology*, 2(12), 26-31.
- [17] Cengel, Yunus A dan Michael A. Boles (2015), *Thermodynamics*, Eighth Edition, Mc Graw Hill.
- [18] Brown, B., & Singh, C. (2021). Student understanding of the first law and second law of thermodynamics. *European Journal of Physics*, 42(6), 065702. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ac18b4>.
- [19] Lewandowski, W. M., Ryms, M., & Kosakowski, W. (2020). Thermal biomass conversion: A review. *Processes*, 8 (5). <https://doi.org/10.3390/PR8050516>.
- [20] Pardosi, H. E., Saufi, I., Daeli, Y., & Ibrahim, H. (2023). Pemanfaatan Empty Fruit Bunch Press Sebagai Bahan Bakar Pembangkit Listrik Tenaga Uap. *SINERGI POLMED: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 4(1), 14-22. <https://doi.org/10.51510/sinergipolmed.v4i1.997>.
- [21] Kartal, F., & Özveren, U. (2022). Prediction of torrefied biomass properties from raw biomass. *Renewable Energy*, 182, 578-591. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.042>.
- [22] Apriyanto, A. (2020). Torefaksi Kontinu Munciple Solid Waste (Msw) Pada Screw Conveyor Reaktor Dengan Sistem Pemanas Heat Transfer Oil. *Teknika Sains: Jurnal Ilmu Teknik*, 5(1), 35-44. <https://doi.org/10.24967/teksis.v5i1.705>.
- [23] Nasution, M. (2022). Bahan Bakar Merupakan Sumber Energi Yang Sangat Diperlukan Dalam Kehidupan Sehari Hari. *JET (Journal of Electrical Technology)*, 7(1), 29-33.
- [24] Martin, A., Ginting, Y. R., Kurniawan, I., & Dhiki, R. A. (2023). Produksi biocoal berbahan dasar tandan kosong kelapa sawit sebagai bahan bakar alternatif pada pembangkit listrik tenaga uap dengan metode torefaksi pada temperatur 200°C. *Jurnal Teknik Mesin*

- Indonesia*, 18(1), 46-51.
<https://doi.org/10.36289/jtmi.v18i1.424>.
- [25] García Nieto, P.J., García-Gonzalo, E., Paredes-Sánchez, J.P. et al. (2019). Predictive modelling of the higher heating value in biomass torrefaction for the energy treatment process using machine-learning techniques. *Neural Comput & Applic.* 31, 8823–8836
- (2019).
<https://doi.org/10.1007/s00521-018-3870-x>.
- [26] Mamvura, T. A., & Danha, G. (2020). Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production. *Heliyon*, 6(3), e03531.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03531>.