

Analisis Perbandingan Konsentrasi Emisi Gas Buang dari Boiler Berbahan Bakar Biodiesel Sawit & Diesel

Comparative Analysis of Exhaust Gas Emission Concentration from Palm Biodiesel & Diesel Fueled Boilers

Ridha Anugerah Putra¹,

¹Program Studi Agroekoteknologi, Fakultas Pertanian dan Kehutanan, Universitas Sulawesi Barat

ARTICLE INFO

Article history:

Diterima 01-04-2025

Diperbaiki 10-05-2025

Disetujui 15-06-2025

Kata Kunci:

boiler, neraca massa,
Konsentrasi emisi, biodiesel
sawit & diesel,

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis konsentrasi emisi gas buang dari boiler yang menggunakan bahan bakar biodiesel sawit & diesel dengan pendekatan neraca massa. Bahan bakar yang digunakan merupakan campuran minyak sawit dan solar. Penelitian ini mencakup perhitungan stoikiometri, estimasi laju alir gas buang, serta pengukuran konsentrasi emisi gas seperti CO₂, O₂, dan NO₂. Hasil menunjukkan bahwa konsentrasi CO₂ dari biodiesel (170.003 mg/Nm³) sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan diesel (167.083 mg/Nm³), sedangkan konsentrasi NO₂ jauh lebih rendah pada biodiesel (22 mg/Nm³) dibandingkan diesel (234 mg/Nm³). Konsentrasi O₂ yang lebih rendah pada biodiesel juga menunjukkan efisiensi pembakaran yang lebih baik. Penelitian ini mendukung biodiesel sebagai alternatif energi yang ramah lingkungan.

ABSTRACT

This study aims to analyze the concentration of exhaust emissions from boilers using palm oil biodiesel & diesel fuels using a mass balance approach. The fuel used is a mixture of palm oil and diesel. This study includes stoichiometric calculations, estimation of exhaust gas flow rates, and measurement of gas emission concentrations such as CO₂, O₂, and NO₂. The results show that the CO₂ concentration of biodiesel (170,003 mg/Nm³) is slightly higher than that of diesel (167,083 mg/Nm³), while the NO₂ concentration is much lower in biodiesel (22 mg/Nm³) than diesel (234 mg/Nm³). The lower O₂ concentration in biodiesel also indicates better combustion efficiency. This study supports biodiesel as an environmentally friendly energy alternative.

Keywords:

boiler, mass balance,
Emission concentration, palm
biodiesel & diesel,

1. Pendahuluan

Perkembangan dan persaingan perusahaan tidak hanya tergantung dari sisi menciptakan proses yang efektif dan efisien saja [1][2][3], namun juga harus menciptakan proses yang lebih memikirkan keberlangsungan kehidupan dan lingkungan. Ketergantungan global pada bahan bakar fosil terus meningkat, mendorong eksplorasi sumber energi alternatif yang berkelanjutan. Pencarian sumber energi alternatif telah meningkat secara signifikan dalam

beberapa tahun terakhir, didorong oleh kekhawatiran tentang menipisnya sumber daya bahan bakar fosil dan dampak lingkungan dari pembakarannya. Biodiesel sawit merupakan campuran minyak sawit dan solar, muncul sebagai alternatif yang menarik untuk menggantikan bahan bakar diesel konvensional/diesel, terutama dalam aplikasi industri dan transportasi [4][5][6]. Meningkatnya kebutuhan bahan bakar dan menipisnya sumber daya alam mendorong eksplorasi bahan bakar alternatif yang berkelanjutan [7],[8]. Indonesia, sebagai produsen

minyak kelapa sawit terbesar, menghasilkan sekitar 35 juta ton per tahun, memiliki potensi besar dalam memanfaatkan biomassa berbasis kelapa sawit untuk produksi bahan bakar alternatif [9]. Biodiesel menawarkan sejumlah keunggulan dibandingkan diesel konvensional, termasuk pengurangan emisi gas rumah kaca, peningkatan biodegradabilitas, dan peningkatan kinerja mesin dalam kondisi tertentu [10]. Namun, penting untuk melakukan analisis komprehensif mengenai neraca massa dan emisi karbon dioksida yang terkait dengan penggunaan biodiesel sawit dalam boiler industri.

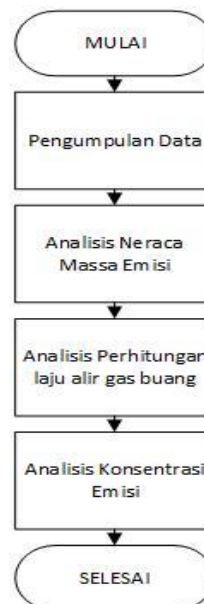


Gambar 1 Boiler berbahan bakar biodiesel sawit [11]

Evaluasi neraca massa sangat penting untuk memahami kuantifikasi input dan output material dari sistem boiler yang menggunakan biodiesel sawit, termasuk bahan bakar, udara, dan produk pembakaran [12]. Neraca massa dapat memberikan wawasan tentang efisiensi pembakaran dan potensi kehilangan material. Selain itu, pengukuran dan analisis emisi karbon dioksida sangat penting untuk menentukan dampak lingkungan dari penggunaan biodiesel sawit sebagai bahan bakar boiler. Biodiesel unggul dibandingkan diesel konvensional dalam hal kandungan sulfur, kandungan aromatik, dan titik nyala [13]. Dengan mengevaluasi emisi karbon dioksida, kita dapat menilai potensi biodiesel sawit untuk mengurangi jejak karbon dari operasi industri. Perhitungan konsentrasi emisi karbon dioksida dari boiler berbahan bakar biodiesel sawit memerlukan pemahaman komprehensif tentang mekanisme pembakaran, prinsip stoikiometri, dan metodologi analisis emisi yang akurat, yang memungkinkan penilaian kuantitatif dampak lingkungan dan identifikasi peluang untuk mengoptimalkan proses pembakaran untuk mengurangi emisi [14]. Sebagai respons terhadap pertumbuhan konsumsi energi nasional yang signifikan, yang mencapai sekitar 7% per tahun dan didominasi oleh bahan bakar fosil, pemerintah Indonesia telah menerapkan berbagai strategi untuk mengurangi ketergantungan pada sumber daya yang semakin menipis ini [15].

2. Metode Penelitian

Untuk analisis yang ketat terhadap neraca massa dan emisi karbon dioksida dari boiler yang menggunakan biodiesel sawit, diperlukan metodologi penelitian yang terdefinisi dengan baik, menggabungkan data eksperimen dengan pemodelan teoretis. Pengambilan sampel dan analisis bahan bakar sangat penting untuk menentukan komposisi element bahan bakar biodiesel sawit, termasuk karbon, hidrogen, oksigen, dan kandungan nitrogen [16].



Gambar 2 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode neraca massa dalam menghitung emisi gas buang dari pembakaran biodiesel sawit pada boiler. Analisis Neraca Massa dijalankan melalui serangkaian tahapan sistematis yang meliputi: Pertama, identifikasi menyeluruh terhadap seluruh komponen input dan output yang terlibat dalam sistem boiler menjadi langkah krusial, yang mencakup tidak hanya bahan bakar biodiesel sawit dan udara pembakaran yang masuk ke dalam sistem, tetapi juga gas-gas hasil pembakaran yang dikeluarkan sebagai output. Kedua, penentuan komposisi kimiawi dari bahan bakar biodiesel sawit melalui analisis laboratorium yang akurat, termasuk persentase massa dari setiap elemen seperti karbon, hidrogen, dan oksigen, menjadi fondasi penting untuk perhitungan stoikiometri yang tepat. Ketiga, perhitungan konsentrasi emisi karbon dioksida dilakukan melalui serangkaian tahapan sistematis yang meliputi: perhitungan kebutuhan udara teoritis berdasarkan reaksi stoikiometri pembakaran biodiesel sawit, penentuan kelebihan udara aktual yang digunakan dalam proses pembakaran, perhitungan volume gas buang yang dihasilkan dari pembakaran, dan perhitungan konsentrasi karbon dioksida dalam gas buang dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti kelebihan udara dan komposisi bahan bakar.

2.1 Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan metode neraca massa dalam menghitung emisi gas buang pada boiler dengan kapasitas masing-masing 500 kg/jam. Bahan bakar yang digunakan pada biodiesel dan diesel masing-masing sebanyak 41,4 kg/jam. Data ultimate analysis (komposisi %) yang digunakan berdasarkan penelitian terdahulu seperti ditunjukkan pada Tabel 1 dibawah

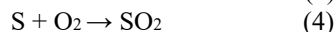
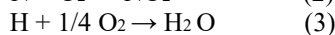
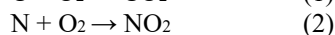
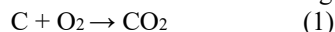
Tabel 1. Analisis Ultimate Diesel & Biodiesel Sawit [11]

Unsur Kimia	Berat Molekul (kg/kmol)	Komposisi Biodiesel Sawit (%)	Komposisi Diesel (%)
C	12,01	76,30	84,15
H	1,01	11,75	12,67
N	28,01	0,02	0,26
S	32,07	0,001	0,1
O	16,00	12,10	2,93
Air	18,00	0,05	0,05
Abu	-	0,01	0,01

Sumber emisi berasal dari gas buang yang keluar dari cerobong tanpa melewati sistem pengendali emisi.

2.2 Analisis Neraca Massa

Analisis neraca massa digunakan untuk memperkirakan jumlah emisi yang keluar dari sistem pembakaran di boiler mengikuti persamaan reaksi stokiometri sebagai berikut



Densitas diesel oil diasumsikan sebesar 0.85 kg/liter. Asumsi 1 % dari karbon tidak terbakar secara sempurna sehingga menjadi gas CO. Dalam perhitungan kelebihan (excess) O₂ sebesar 3%. Hasil dari persamaan pembakaran diatas adalah emisi gas buang berupa CO, NO₂, O₂, & CO₂.

2.3 Analisis Perhitungan laju alir gas buang

Nm³/jam merupakan laju alir gas standar pada kondisi temperatur 25°C dan tekanan 1 atm. Gas Cerobong keluar umumnya pada temperature tinggi sekitar 150 – 250°C dan tekanan atmosferic yang dinamakan dengan laju alir gas buang actual dengan menggunakan persamaan gas ideal. Kondisi standar Nm³/jam dapat diperoleh dengan konversi dari laju alir gas actual ke standar melalui Hukum Boyle Gay Lussac. Rumus untuk menghitung laju alir gas buang Aktual sebagai berikut:

$$P_1 V_1 = nRT_1 \quad (6)$$

$$V_1 = nRT_1/P_1 \quad (7)$$

Dimana,

P₁ = tekanan gas saat keluar dari cerobong = 1 atm = 101.325 Pa

n = laju alir gas buang total = 19,4 kmol/jam = 19.415,71 mol/jam

R = konstanta gas ideal = 8.314 Pa. m³/(mol.K)

T₁ = asumsi gas buang keluar cerobong 150°C = 150 + 273 = 423 K

Rumus untuk menghitung laju alir gas buang standar sebagai berikut:

$$V_2 = \frac{T_2 V_1}{T_1} \quad (8)$$

Dimana,

T₁ = asumsi gas buang keluar cerobong 50°C = 150 + 273 = 423 K

V₁ = hasil perhitungan untuk gas buang aktual = 673 m³/jam

T₂ = temperature standar gas buang 25°C = 298 K

Sehingga, V₂ = 474,75 Nm³/jam

2.4 Analisis Konsentrasi Emisi

$$C = \frac{E}{Q} \quad (9)$$

Dimana,

C = Konsentrasi Emisi (mg/Nm³)

E = Laju Emisi (mg/s)

Q = Debit Udara (m³/s)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Neraca Massa Pembakaran

Kandungan unsur pada bahan bakar dihitung berdasarkan Tabel 1 diatas adalah sebagai berikut.

Tabel 2. Penggunaan Bahan Bakar Biodiesel Sawit & Diesel

Unsur Kimia	Biodiesel			Diesel		
	Komposisi (%)	Laju alir massa (kg)	Laju alir mol (Kmol)	Komposisi (%)	Laju alir massa (kg)	Laju alir mol (Kmol)
C	76,3	31,59	2,63	76,3	34,84	2,90
H	11,75	4,86	4,83	11,75	5,25	5,20
N	0,02	0,009	0,0003	0,02	0,108	0,0038
S	0,001	0,0004	0,00001	0,001	0,0414	0,00129
O	12,10	5,01	0,31	12,10	1,21	0,08
Air	0,05	0,02	0,001	0,05	0,02	0,001
Abu	0,01	0,004		0,01	0,004	

Dengan menggunakan reaksi stoikiometri yang disebutkan diatas, maka diperoleh neraca massa pembakaran untuk biodiesel & diesel pada boiler diperlihatkan pada Tabel 3 dibawah.

Tabel 3. Neraca Massa Emisi Biodiesel

Parameter	Input		Output		Basis Basah (%mol)
	Laju alir mol (Kmol)	Output (kg/jam)	Laju alir mol (Kmol)	Output (kg/jam)	
C	2,63	31,59	-	-	-
H ₂	4,83	4,86	-	-	-
S	0,0001	0,00041	-	-	-
H ₂ O	0,001	0,02	2,41	43,46	12,43
N ₂	0,0003	0,004	14,26	399,30	73,45
O ₂	0,31	5,01	0,11	3,53	0,569
CO ₂	-	-	2,60	114,56	13,41
CO	-	-	0,03	0,74	0,14
SO ₂	-	-	0,00001	0,00083	0,00007
NO ₂	-	-	0,0003	0,01	0,002
Ash	-	0,004	-	0,004	-
Total	7,8	41	19,4	561,6	100,00

Tabel 4. Neraca Massa Emisi Diesel

Parameter	Input		Output		Basis Basah (%mol)
	Laju alir mol (Kmol)	Output (kg/jam)	Laju alir mol (Kmol)	Output (kg/jam)	
C	2,90	34,84	-	-	-
H ₂	5,20	5,25	-	-	-
S	0,00129	0,04140	-	-	-
H ₂ O	0,001	0,02	2,60	46,86	11,95
N ₂	0,0038	0,054	16,15	452,30	74,14
O ₂	0,08	1,21	0,13	4,00	0,574
CO ₂	-	-	2,87	126,35	13,18
CO	-	-	-	-	0,13

Parameter	Input		Output		Basis Basah (%mol)
	Laju alir mol (Kmol)	Output (kg/jam)	Laju alir mol (Kmol)	Output (kg/jam)	
SO ₂	-	-	-	-	0,00593
NO ₂	-	-	0,0038	0,18	0,018
Ash	-	0,004	-	0,004	-
Total	8,2	41	21,8	630,6	100,00

O₂ bisa menjadi indikator efisiensi termal. Jika O₂ < 0,57%, maka ada kemungkinan terjadi kebocoran atau tidak tepat dalam melakukan analisis ultimate atau instrumentasi analisis gas buangnya tidak tepat/akurat. Jika O₂ > 0,57%, maka ada beberapa kemungkinan yang terjadi seperti instrumentasi analisis gas buangnya tidak tepat/akurat sehingga perlu dikalibrasi, adanya udara yang terintrupsi masuk kedalam dari tempat-tempat kebocoran, terbentuknya gas CO sehingga perlu dilakukan analisis gas CO, atau adanya unburnt carbon yaitu ada karbon di bottom ash atau fly ash yang tidak terbakar.

3.2 Konsentrasi Emisi Pembakaran

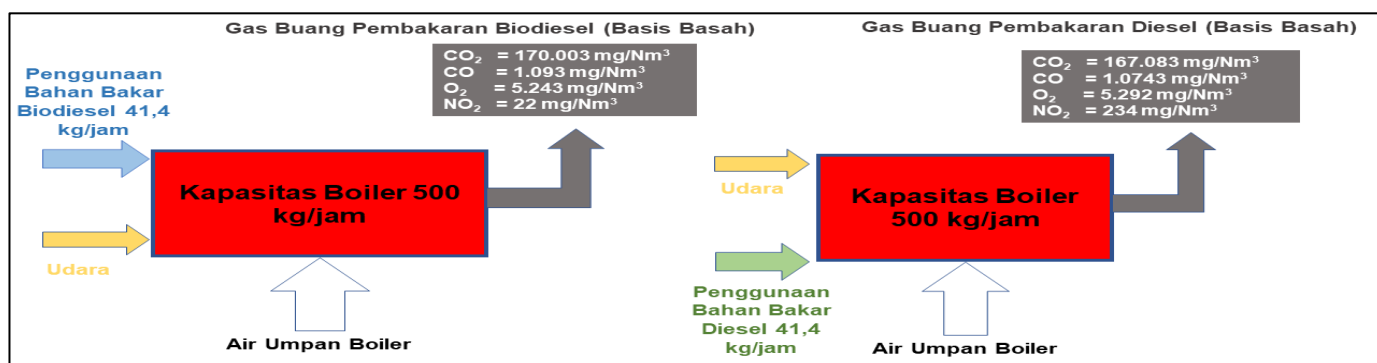
Konsentrasi emisi gas CO₂, NO₂, & O₂ yang keluar dari cerobong dapat ditunjukkan pada tabel dibawah.

Tabel 5. Konsentrasi Emisi Biodiesel

Parameter	Laju emisi (mg/jam)	Laju Alir Aktual (m ³ /jam)	Laju Alir Standar (Nm ³ /jam)	Konsentrasi Emisi Boiler (mg/Nm ³)
CO ₂	114.563.014	673,9	474,75	170.003
O ₂	3.533.172	673,9	474,75	5.243
NO ₂	14.752	673,9	474,75	22

Tabel 6. Konsentrasi Emisi Diesel

Parameter	Laju emisi (mg/jam)	Laju Alir Aktual (m ³ /jam)	Laju Alir Standar (Nm ³ /jam)	Konsentrasi Emisi Boiler (mg/Nm ³)
CO ₂	126.349.641	756,2	532,74	167.083
O ₂	4.002.127	756,2	532,74	5.292
NO ₂	176.753	756,2	532,74	234



Gambar 3 Konsentrasi Emisi Biodiesel (Kiri) & Diesel (Kanan)

Konsentrasi CO₂ pada boiler berbahan bakar biodiesel (170.003 mg/Nm³) sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan boiler berbahan bakar diesel (167.083mg/Nm³). Peningkatan CO₂ pada biodiesel juga dapat dikaitkan dengan pembakaran yang lebih efisien yang dipromosikan oleh kandungan oksigen yang lebih tinggi dalam biodiesel.

Konsentrasi O₂ pada boiler berbahan bakar biodiesel (5.243mg/Nm³) sedikit lebih rendah dibandingkan dengan boiler berbahan bakar diesel (5.292mg/Nm³). Hal ini juga mengindikasikan adanya pembakaran yang lebih efisien karena lebih banyak oksigen yang dikonsumsi selama proses pembakaran.

konsentrasi NO₂ yang jauh lebih rendah pada boiler berbahan bakar biodiesel (22mg/Nm³) dibandingkan dengan boiler berbahan bakar diesel (234mg/Nm³). Ini merupakan perbedaan yang sangat besar. Pengurangan ini sangat mungkin disebabkan oleh penundaan pengapian yang lebih pendek dan suhu pembakaran yang lebih rendah. Sifat bahan bakar dengan angka setana yang lebih tinggi dapat mempersingkat waktu tunda pengapian pada suhu yang lebih rendah sehingga berpotensi menurunkan emisi NO₂

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan beberapa kesamaan dengan penelitian terdahulu [11]. Peningkatan CO₂ dan penurunan NO₂ & O₂ pada biodiesel sejalan dengan gagasan pembakaran yang lebih efisien karena lebih banyak oksigen yang dikonsumsi selama proses pembakaran. Pemanfaatan biodiesel sangat potensial untuk boiler industri karena manfaatnya yang menguntungkan dalam pengurangan emisi dibandingkan dengan minyak diesel.

Khususnya, pemanfaatan biodiesel sawit pada boiler fire tube menjadi lebih potensial untuk mempromosikan pembakaran yang lebih baik karena sifat-sifatnya seperti angka setana yang lebih tinggi, suhu pembakaran lebih rendah, dan kandungan oksigennya lebih tinggi.

4. Kesimpulan

Penggunaan biodiesel sawit pada boiler menunjukkan karakteristik emisi yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan diesel murni. Konsentrasi CO₂ yang sedikit lebih tinggi menunjukkan pembakaran yang lebih lengkap, sedangkan konsentrasi NO₂ yang jauh lebih rendah mengindikasikan suhu pembakaran yang lebih rendah dan proses pembakaran yang lebih efisien. Efisiensi pembakaran juga didukung oleh konsumsi oksigen yang lebih tinggi. Secara keseluruhan, biodiesel sawit dapat menjadi solusi energi alternatif yang berkelanjutan dalam upaya mengurangi dampak lingkungan dari emisi industri.

5. Referensi

- [1] D. Maryadi, R. A. N. Moulita, M. L. King, and R. M. Veranika, "Value Stream Mapping for Warehouse Process in Automotive Manufacturing Case," vol. 12, no. February 2019, pp. 89–97, 2024.
- [2] D. Maryadi, T. Tamalika, R. A. N. Moulita, and T. P. O. Sianipar, "IMPLEMENTASI QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT (QFD) PADA USAHA KECIL MENENGAH (UKM) ANGKRINGAN," vol.

- 12, pp. 140–146, 2024.
- [3] J. M. Sahombu, “Quality Control Improvement Using Six Sigma Method in Production Process Cup Beverage,” vol. xx, no. xx, pp. 129–141, 2023.
- [4] D. Maryadi, “Lean Six Sigma DMAIC Implementation to reduce Total Lead Time Internal Supply Chain Process,” pp. 2086–2096, 2021.
- [5] dan Hermanto, “Analisa Defect pada Proses Bongkar Muat Produk Pelumas Kemasan Box di PT. Pertamina Lubricants Depot Supply Chain Point Kertapati Palembang Defect Analysis in the Process of Loading and Unloading Boxed Lubricant Products at PT. Pertamina Lubricants Depot ,” vol. 02, pp. 27–31, 2024, [Online]. Available: <http://jietri.univ-tridinanti.ac.id>
- [6] A. Dhinar, F. A. ;Wardhani, and D. ;Maryadi, “Analisis Pengendalian Persediaan Barang Gudang Ban Luar dan Ban Dalam Menggunakan Metode Economic Order Quantity (EOQ),” *JIETRI J. Ind. Eginerig Tridinanti*, vol. 01, no. 01, 2023.
- [7] M. A. Auliastuti, M. B. Munir, and A. Chumaidi, “PENGARUH PENAMBAHAN KATALIS Mg-Zn TERHADAP KOMPOSISI GREEN DIESEL DENGAN METODE DEKARBOKSILASI,” *DISTILAT J. Teknol. Separasi*, vol. 5, no. 2, pp. 58–62, 2023, doi: 10.33795/distilat.v5i2.27.
- [8] D. K. Putri, R. Rosalina, and R. Sutri, “Pre-Treatment Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Bahan Baku Bioetanol Dengan Bantuan Gelombang Microwave,” *J. Redoks*, vol. 8, pp. 43–48, 2023, doi: 10.31851/redoks.v8i1.9313.
- [9] B. Sucahyo *et al.*, “Kajian Teknologi Pemanfaatan Biogas Pome (Palm Oil Mill Effluent) Ke Boiler Study of the Technology of Utilizing Biogas From Palm Oil Mill Effluent (Pome) To Boiler,” *Maj. Ilm. Pengkaj. Ind. (Journal Ind. Res. Innov.*, vol. 13, no. 1, 2019.
- [10] M. Maulana and M. Azis, “Kinerja dan Prospek Pengembangan Bahan Bakar Nabati di Indonesia,” *Forum Penelit. Agro Ekon.*, vol. 30, no. 2, p. 147, 2016, doi: 10.21082/fae.v30n2.2012.147-158.
- [11] L. N. Komariah, S. Arita, Novia, S. S. Wirawan, and M. Yazid, “Emission factors of biodiesel combustion in industrial boiler: A comparison to fossil fuel,” *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 5, pp. 1–9, 2013, doi: 10.1063/1.4822036.
- [12] I. N. Sukarta and L. P. A. L. Oka, “Analisis Proksimat Pada Pelet Bahan Bakar Dari Kotoran Babi Yang Dikombinasikan Dengan Limbah Kayu,” *JST (Jurnal Sains dan Teknol.*, vol. 6, no. 2, pp. 220–227, 2017, doi: 10.23887/jstundiksha.v6i2.10613.
- [13] D. Rachmat, A. D. Agustin, and D. D. Risanti, “Purification of Biodiesel Using Activated Carbon Produced from Cocoa Pod Husk,” *E3S Web Conf.*, vol. 42, pp. 2016–2019, 2018, doi: 10.1051/e3sconf/20184201012.
- [14] A. Firdaus, M. Machfud, A. Suryani, and N. A. Achsani, “Impact of Biodiesel Agroindustry on the Achievement of National Energy Security,” *Sinergi*, vol. 24, no. 2, p. 153, 2020, doi: 10.22441/sinergi.2020.2.009.
- [15] D. Hutahaeaan, R. Y., & Antonius, “KONVERSI MINYAK BIJI KAPUK MENJADI BIODIESEL MENGGUNAKAN KATALIS CaO/HTC,” *Rekayasa Mesin*, vol. 13, no. 3, pp. 443–450, 2022.
- [16] A. Afna, U. Pato, and F. H. Hamzah, “Karakteristik Briket Dengan Pencampuran Kulit Batang Sagu Dan Tempurung Kelapa,” *J. Sagu*, vol. 20, no. 1, p. 24, 2021, doi: 10.31258/sagu.v20i1.7920.