

Pengaruh Penggunaan Biodiesel Minyak Goreng Bekas Hasil Transesterifikasi terhadap Performa Mesin Diesel

Resa Hardianto¹⁾, Syaiful Arif²⁾.

^{1,2)}Teknik Mesin, Universitas Pamulang

E-mail: ¹⁾resahardianto34@gmail.com.

Abstrak

Penggunaan minyak goreng bekas sebagai bahan bakar alternatif merupakan salah satu cara untuk mengurangi limbah dan mendukung pengembangan energi terbarukan. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh transesterifikasi biodiesel dari minyak goreng bekas terhadap kinerja mesin diesel. Biodiesel diproduksi melalui proses transesterifikasi menggunakan metanol dan katalis NaOH. Biodiesel yang dihasilkan diuji pada mesin diesel dan dibandingkan dengan bahan bakar diesel konvensional. Torsi, daya, dan konsumsi bahan bakar spesifik diukur pada kecepatan mesin mulai dari 400 hingga 1200 rpm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada kecepatan rendah hingga menengah, biodiesel dapat menghasilkan daya rata-rata 4,14% lebih tinggi daripada diesel. Namun, konsumsi bahan bakar spesifik biodiesel meningkat sekitar 9,5% dibandingkan dengan diesel. Nilai kalor biodiesel yang lebih rendah daripada bahan bakar diesel menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar. Dalam pengujian jangka pendek, biodiesel berbasis minyak bekas terbukti sebagai bahan bakar alternatif potensial untuk digunakan pada mesin diesel tanpa modifikasi pada konstruksi mesin.

Kata kunci: Minyak goreng bekas, Biodiesel, Transesterifikasi, Mesin diesel, Performa mesin.

Abstract

The use of used cooking oil as an alternative fuel is one of the ways to reduce waste and support the development of renewable energy. The purpose of this study is to analyze the effect of biodiesel transesterification of used cooking oil to the performance of diesel engine. Biodiesel is produced by transesterification process using methanol and NaOH catalyst. The produced biodiesel is tested on a diesel engine and compared with conventional diesel fuel. Torque, power and specific fuel consumption were measured at engine speeds ranging from 400 to 1200 rpm. The results of the tests indicate that at low to medium speeds, biodiesel can generate an average power of 4.14 % more than diesel. But the specific fuel consumption of biodiesel increased by about 9.5% compared to diesel. The lower calorific value of biodiesel than that of the diesel fuel caused the increased consumption of the fuel. In short-term tests, waste oil-based biodiesel proved to be a potential alternative fuel to be used in diesel engines without modifications on engine construction.

Keywords: Waste frying oil, Biodiesel, Transesterification, Diesel engine, Engine performance.

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan penduduk, industrialisasi, dan perkembangan teknologi meningkatkan kebutuhan energi dunia. Di sisi lain, ketergantungan pada bahan bakar fosil, terutama minyak bumi, masih sangat tinggi. Minyak bumi merupakan sumber energi yang tidak dapat diperbarui sehingga ketersediaannya semakin terbatas karena eksploitasi yang terus meningkat. Hal ini memicu kebutuhan untuk mengembangkan sumber energi alternatif yang dapat diperbarui, ramah lingkungan, dan dapat digunakan sebagai pengganti bahan bakar konvensional[1], [2].

Biodiesel merupakan salah satu energi alternatif yang banyak dikembangkan. Biodiesel adalah bahan bakar yang berasal dari minyak nabati dan lemak hewan melalui proses transesterifikasi atau esterifikasi yang menghasilkan ester asam lemak yang dapat digunakan sebagai bahan bakar pada mesin diesel. Biodiesel memiliki beberapa keunggulan dibandingkan bahan bakar diesel konvensional antara lain berasal dari sumber yang dapat diperbarui, kandungan sulfur rendah, mudah terurai secara hayati, dan berpotensi mengurangi emisi gas buang berbahaya ke lingkungan. Indonesia memiliki potensi besar dalam pengembangan biodiesel karena ketersediaan bahan baku yang melimpah[3]–[6].

Minyak goreng bekas (minyak jelantah) adalah salah satu limbah yang jumlahnya semakin meningkat karena aktivitas rumah tangga dan industri makanan. Jika tidak dikelola dengan baik, limbah tersebut dapat mencemari lingkungan dan saluran air. Namun minyak goreng bekas masih mengandung trigliserida yang dapat digunakan sebagai bahan baku biodiesel sehingga mempunyai nilai tambah sebagai sumber energi alternatif [4], [7]–[10].

Namun potensi besar tersebut, penggunaan minyak goreng bekas secara langsung pada mesin diesel masih terdapat beberapa kendala, terutama mengenai nilai viskositas, densitas dan titik nyala yang relatif tinggi bila dibandingkan dengan bahan bakar solar. Sifat tersebut menurunkan kualitas pembakaran dan kinerja mesin karena dapat menyebabkan proses atomisasi bahan bakar menjadi kurang sempurna. Oleh karena itu, reaksi transesterifikasi diperlukan untuk menurunkan kekentalan minyak dan meningkatkan karakteristik bahan bakar agar dapat lebih baik digunakan pada mesin diesel. Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, proses transesterifikasi dapat meningkatkan sifat fisik dan kimia minyak goreng bekas sehingga karakteristik minyak goreng bekas mendekati bahan bakar diesel konvensional[9], [11]–[13].

Beberapa penelitian terdahulu telah melaporkan pemanfaatan biodiesel berbahan dasar minyak goreng bekas sebagai bahan bakar alternatif mesin diesel. Abed melaporkan bahwa biodiesel minyak goreng bekas mampu menghasilkan performa mesin yang mendekati bahan bakar solar sekaligus menurunkan emisi gas buang[14]. Peningkatan kualitas biodiesel dapat dilakukan melalui pencampuran dengan biodiesel dari bahan baku lain sehingga diperoleh karakteristik bahan bakar yang lebih baik. Penggunaan bahan bakar berbasis biodiesel berpengaruh terhadap daya, torsi, dan konsumsi bahan bakar mesin diesel[15], [16].

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada karakteristik biodiesel dan pengaruhnya terhadap performa mesin secara umum. Informasi mengenai performa biodiesel murni hasil transesterifikasi minyak goreng bekas pada berbagai tingkat putaran mesin masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki kebaruan berupa evaluasi langsung performa biodiesel

murni hasil transesterifikasi minyak goreng bekas melalui pengukuran torsi, daya, dan konsumsi bahan bakar spesifik pada beberapa variasi putaran mesin serta membandingkannya dengan bahan bakar solar konvensional.

Beberapa penelitian telah melaporkan karakteristik biodiesel yang berasal dari minyak goreng bekas dan pengaruhnya terhadap emisi gas buang mesin diesel. Namun, penelitian tentang pengaruh penggunaan biodiesel hasil transesterifikasi terhadap kinerja mesin diesel pada berbagai kondisi kecepatan mesin masih perlu dikembangkan lebih lanjut. Oleh karena itu, Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan biodiesel murni berbahan dasar minyak goreng bekas hasil transesterifikasi terhadap performa mesin diesel melalui pengukuran torsi, daya, dan konsumsi bahan bakar spesifik pada berbagai tingkat putaran mesin, serta membandingkannya dengan bahan bakar solar konvensional.

2. METODE PENELITIAN

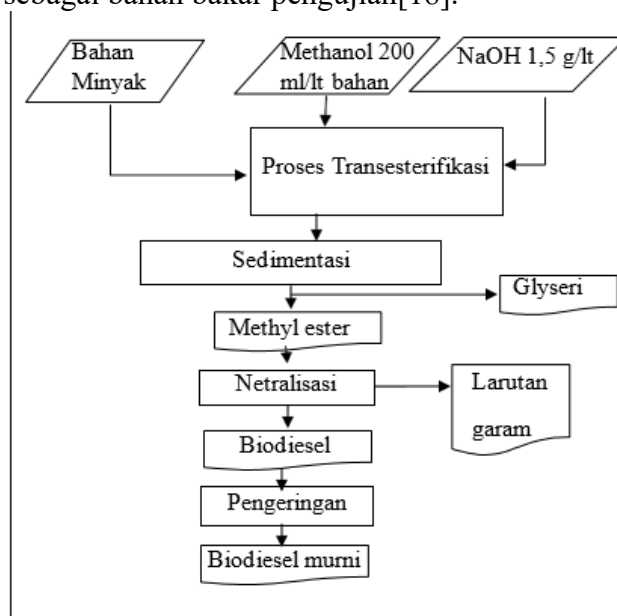
a. Bahan Penelitian

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah minyak goreng bekas yang diperoleh dari limbah yang dihasilkan selama penggorengan. Dalam proses produksi biodiesel, bahan pendukungnya adalah metanol dan natrium hidroksida (NaOH) sebagai katalis basa.

b. Preparasi Biodiesel

Minyak goreng bekas digunakan untuk menghasilkan biodiesel melalui transesterifikasi. Minyak goreng bekas dipanaskan hingga sekitar 50 °C dan dicampur dengan metanol dan katalis NaOH lalu diaduk selama sekitar 30 menit. Reaksi transesterifikasi menghasilkan dua lapisan yaitu biodiesel di lapisan atas dan gliserol di lapisan bawah[17].

Setelah proses sedimentasi selesai, gliserol dipisahkan dari biodiesel. Kemudian biodiesel dinetralkan dengan asam asetat hingga kondisi netral dan dicuci dengan air untuk menghilangkan sisa katalis dan pengotor lainnya. Biodiesel kemudian dikeringkan pada suhu sekitar 60 °C hingga diperoleh biodiesel murni yang siap dipakai sebagai bahan bakar pengujian[18].



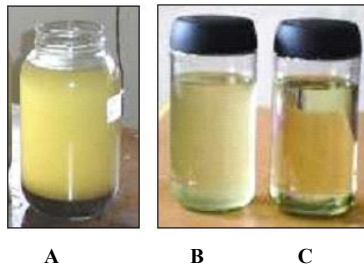
Gambar 1. Flowchart pembuatan biodiesel dari minyak goreng bekas

c. Pengujian Kinerja Mesin

Mesin diesel diuji dengan dua jenis bahan bakar yaitu biodiesel murni hasil transesterifikasi minyak jelantah dan solar konvensional. Data diambil pada variasi putaran mesin yang berbeda seperti 400 rpm, 600 rpm, 800 rpm, 1000 rpm, 1200 rpm dan putaran mesin maksimum. Parameter yang diamati adalah torsi, tenaga dan konsumsi bahan bakar spesifik (*Specific Fuel Consumption/SFC*). Untuk setiap variasi putaran mesin dilakukan pengukuran torsi dan konsumsi bahan bakar, kemudian data yang diperoleh digunakan untuk menghitung daya mesin dan konsumsi bahan bakar spesifik[19].

d. Analisis Data

Dalam analisis ini dilakukan perbandingan kinerja mesin diesel yang menggunakan biodiesel murni dan solar konvensional. Data hasil pengujian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik hubungan antara kecepatan mesin versus torsi, daya dan konsumsi bahan bakar spesifik. Kemudian, analisis deskriptif digunakan untuk menilai dampak penggunaan biodiesel terhadap kinerja mesin diesel. Daya, torsi, dan konsumsi bahan bakar spesifik dihitung berdasarkan persamaan yang umum digunakan dalam analisis kinerja mesin diesel.



Gambar 2. Bio-diesel : (A) Transterifikasi, (B) katalis, (C) murni

Berdasarkan data RPM dan hasil pengukuran torsi maka perhitungan daya motor[20], [21]:

$$P : 2 N t$$

Informasi:

P : Daya poros (kW)

N : Putaran poros per detik

t : Waktu (s)

Penggunaan bahan bakar digunakan dalam rentang waktu-waktu yang tidak pasti adalah rumusnya:

$$C : \frac{V}{t}$$

Informasi:

C : Konsumsi bahan bakar ($\frac{ml}{dtk}$)

V : Volume bahan bakar yang digunakan (ml)

t : Waktu (s)

Dalam penggunaan jumlah bahan bakar dapat dilihat lebih detail pada persamaan yang sudah ditingkatkan sebagai berikut:

$$Cs : \frac{C}{P}$$

Informasi :

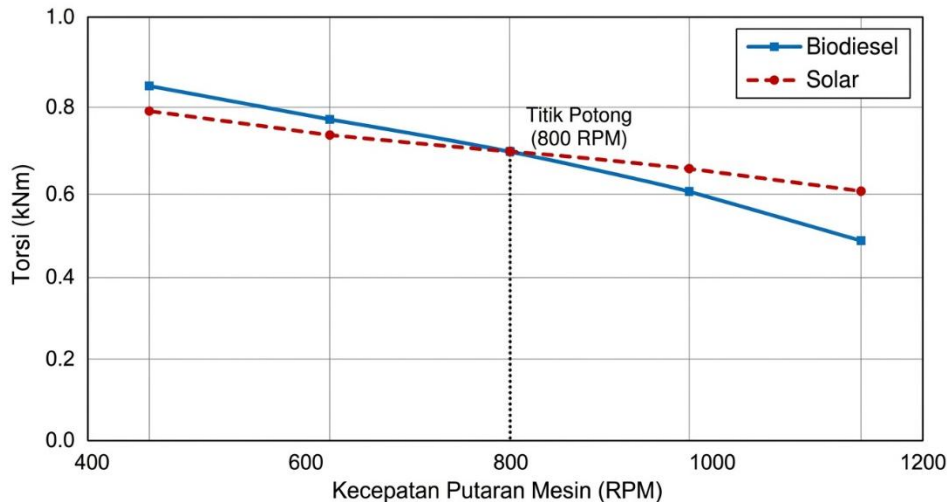
C_s : Konsumsi bahan bakar spesifik ($\frac{\text{ml}}{\text{kW}} \cdot \text{s}$)

C : Konsumsi bahan bakar ($\frac{\text{ml}}{\text{dtk}}$)

P : Daya poros (kW)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Pengaruh Biodiesel terhadap Torsi Mesin



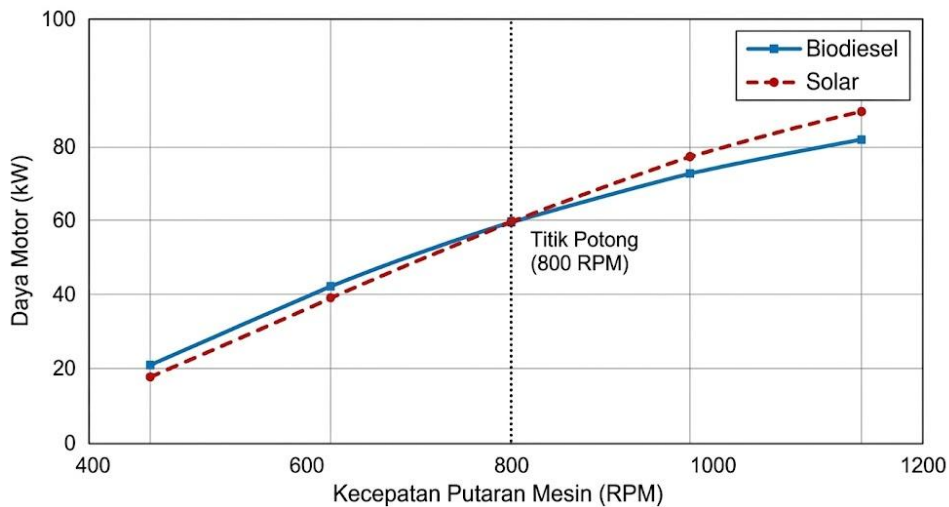
Gambar 3. Kurva keterkaitan antara kecepatan putaran motor dan torsi.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa torsi mesin yang menggunakan biodiesel dari minyak goreng bekas hasil transesterifikasi relatif sebanding dengan penggunaan bahan bakar diesel. Berdasarkan Gambar 3, torsi biodiesel yang dihasilkan pada kecepatan rendah hingga menengah cenderung lebih tinggi daripada torsi solar, sedangkan pada kecepatan di atas 800 rpm terjadi penurunan torsi yang relatif lebih besar dibandingkan solar.

Fenomena ini diduga dipengaruhi oleh karakteristik pembakaran biodiesel dengan oksigen internal, yang dapat mendukung proses pembakaran yang lebih baik pada kecepatan rendah. Namun pada RPM yang lebih tinggi, waktu pembakaran menjadi semakin singkat, sehingga karakteristik fisik biodiesel yang masih memiliki viskositas lebih tinggi daripada solar dapat memengaruhi proses atomisasi bahan bakar. Hal ini menyebabkan bahan bakar dan udara tercampur kurang maksimal sehingga torsi yang dihasilkan cenderung menurun.

Meski demikian, perbedaan torsi biodiesel dan solar tidak menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa biodiesel minyak goreng bekas yang dihasilkan melalui proses transesterifikasi memiliki kemampuan yang cukup untuk digunakan sebagai bahan bakar alternatif pada mesin diesel tanpa modifikasi konstruksi mesin [3], [12], [22], [23].

b. Daya Mesin dengan Pengaruh Biodiesel



Gambar 4. Kurva keterkaitan antara kecepatan putar motor dan daya motor

Hubungan antara kecepatan mesin dan daya yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 4. Secara umum, daya mesin meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan mesin dalam penggunaan biodiesel dan tenaga surya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa biodiesel menghasilkan daya rata-rata sekitar 4,14% lebih tinggi daripada tenaga surya, di bawah kondisi pengujian tertentu.

Peningkatan daya keluaran ini diduga terkait dengan kandungan oksigen biodiesel yang membuat proses pembakaran lebih efisien. Kandungan oksigen internal biodiesel dapat membantu oksidasi bahan bakar dalam proses pembakaran sehingga energi yang dihasilkan dapat digunakan secara lebih optimal oleh mesin.

Pada kecepatan mesin yang lebih tinggi, perbedaan daya antara biodiesel dan tenaga surya cenderung berkurang. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja biodiesel relatif dekat dengan kinerja solar sehingga biodiesel minyak goreng bekas berpotensi menjadi bahan bakar alternatif yang dapat digunakan pada mesin diesel konvensional [3], [12], [22], [23].

c. Konsumsi Bahan Bakar Spesifik

Tabel 1. Rata-rata konsumsi bahan bakar spesifik (ml/kW.s)

| Kecepatan Putaran (RPM) | Nilai Kinerja (Biodiesel) | Nilai Kinerja (Solar) |
|-------------------------|---------------------------|-----------------------|
| 400 | 0.11 | 0.10 |
| 600 | 0.10 | 0.10 |
| 800 | 0.11 | 0.10 |
| 1000 | 0.12 | 0.10 |
| 1200 | 0.12 | 0.10 |
| Maksimal (Max) | 0.14 | 0.12 |

Hasil pengujian konsumsi bahan bakar spesifik (*Specific Fuel Consumption/SFC*) menunjukkan bahwa biodiesel membutuhkan jumlah bahan bakar yang lebih banyak daripada solar untuk menghasilkan daya yang sama. Konsumsi bahan bakar spesifik rata-rata biodiesel sekitar 9,5% lebih besar daripada solar berdasarkan data pada Tabel 1.

Konsumsi bahan bakar yang lebih tinggi dapat dijelaskan oleh nilai kalor biodiesel yang lebih rendah secara umum dibandingkan dengan bahan bakar diesel. Nilai kalor yang lebih kecil berarti jumlah energi yang terkandung dalam setiap satuan massa bahan bakar lebih kecil sehingga dibutuhkan volume bahan bakar yang lebih besar untuk menghasilkan daya yang setara.

Konsumsi biodiesel lebih tinggi, tetapi hasil pengujian menunjukkan bahwa mesin masih dapat bekerja normal tanpa masalah dalam proses pengoperasian mesin. Hal ini menunjukkan bahwa transesterifikasi biodiesel dari minyak goreng bekas berpotensi digunakan sebagai bahan bakar alternatif untuk mesin diesel [11], [23], [24].

d. Evaluasi Minyak Goreng Bekas sebagai Sumber Biodiesel

Hasil umum penelitian menunjukkan bahwa performa mesin biodiesel dari minyak goreng bekas yang telah ditransesterifikasi sebanding dengan performa mesin diesel konvensional. Biodiesel memberikan keuntungan berupa peningkatan daya rata-rata sebesar 4,14% dan diikuti oleh peningkatan konsumsi bahan bakar spesifik sebesar 9,5%.

Hasil ini menunjukkan bahwa proses transesterifikasi berhasil meningkatkan karakteristik minyak goreng bekas untuk digunakan sebagai bahan bakar mesin diesel. Minyak goreng bekas dapat digunakan sebagai sumber biodiesel, yang dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan juga memiliki manfaat lingkungan melalui pengurangan limbah yang berpotensi mencemari lingkungan.

Namun penelitian ini masih terbatas pada pengujian performa jangka pendek. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan biodiesel terhadap daya tahan mesin, pembentukan endapan di ruang bakar, dan karakteristik emisi gas buang selama pengoperasian jangka panjang.

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, biodiesel murni berbahan dasar minyak goreng bekas hasil transesterifikasi dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif pada mesin diesel tanpa mengalami kendala operasional selama pengujian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan biodiesel menghasilkan performa yang sebanding dengan bahan bakar solar konvensional. Pada kondisi pengujian tertentu, biodiesel mampu menghasilkan daya rata-rata sekitar 4,14% lebih tinggi dibandingkan solar.

Di sisi lain, konsumsi bahan bakar spesifik biodiesel tercatat sekitar 9,5% lebih tinggi dibandingkan solar. Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun biodiesel mampu menghasilkan performa mesin yang baik, kebutuhan bahan bakar yang digunakan masih relatif lebih besar. Secara keseluruhan, biodiesel minyak goreng bekas hasil transesterifikasi memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif pada mesin diesel sekaligus mendukung pemanfaatan limbah minyak goreng bekas menjadi sumber energi yang bernilai guna.

Penelitian lanjutan diperlukan untuk mengevaluasi karakteristik fisik dan kimia biodiesel, emisi gas buang, serta pengaruh penggunaan biodiesel terhadap durabilitas dan performa mesin dalam jangka panjang.

5. REFERENSI

- [1] A. Ahmadbeigi, M. Mahmoudi, L. Fereidooni, M. Akbari, and A. Kasaeian, "Biodiesel production from waste cooking oil: A review on production

- methods , recycling models , materials and catalysts,” *J. Therm. Eng.*, vol. 10, no. 5, pp. 1362–1389, 2024, doi: 10.14744/thermal.0000826.
- [2] M. U. H. Suzihaque, H. Alwi, U. Kalthum Ibrahim, S. Abdullah, and N. Haron, “Biodiesel production from waste cooking oil : A brief review,” in *Materials Today: Proceedings*, 2022.
- [3] N. Genet, M. Menelik, W. Mekonen, Y. Gzate, A. Leul, and F. Demisie, “Experimental investigation on diesel engine performance and emission characteristics using waste cooking oil blended with diesel as biodiesel fuel,” *Discov. Energy*, 2024, doi: 10.1007/s43937-024-00051-7.
- [4] Suardi, D. Suanggana, and B. Said, “Biodiesel Potentials of Waste Cooking Oil (WCO): Production, Content of Fuel Properties, and Effects on Engine Performance,” *Int. J. Mar. Eng. Innov. Res.*, vol. 8, no. 2 SE-Articles, pp. 213–221, Jul. 2025, doi: 10.12962/j25481479.v8i2.
- [5] Suherman *et al.*, “A Review of Properties, Engine Performance, Emission Characteristics and Material Compatibility Biodiesel From Waste Cooking Oil (WCO),” *Automot. Exp.*, vol. 6, no. 3, pp. 624–651, 2023.
- [6] C. G. Lopresto, “Sustainable biodiesel production from waste cooking oils for energetically independent small communities : an overview,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 3, pp. 1953–1974, 2025, doi: 10.1007/s13762-024-05779-2.
- [7] M. C. Ferrusca, R. Romero, S. L. Martínez, A. Ramírez-Serrano, and R. Natividad, “Biodiesel Production from Waste Cooking Oil : A Perspective on Catalytic Processes,” *Processes*, vol. 11, no. 1952, 2023, doi: 10.3390/pr11071952.
- [8] M. Idris, A. Fuad, A. Rasid, M. M. Zamberi, and Y. Zhang, “Biodiesel Production from Waste Cooking Oil : A Review of Prospects and Challenges,” *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 28–52, 2024, doi: 10.37934/arfmts.124.1.2852.
- [9] J. A. V Plata, “Biodiesel Production Using Waste Cooking Oil : An Instrumentation and Control Technology Lab Apparatus,” *Int. J. Multidiscip. Stud. High. Education*, vol. 1, no. 1, 2024.
- [10] A. C. Ajie, M. M. Ojapah, and E. O. Diemuodeke, “Journal of Energy and Power Technology Effects of Waste Cooking Oil Biodiesel on Performance , Combustion and Emission Characteristics of a Compression Ignition Engine,” *J. Energy Power Technol.*, vol. 5, no. 2, 2023, doi: 10.21926/jept.2302020.
- [11] N. H. Said, F. N. Ani, and M. F. M. Said, “EMISSION AND PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF WASTE COOKING OIL BIODIESEL BLENDS IN A SINGLE DIRECT INJECTION DIESEL ENGINE,” *Int. J. Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 238–245, 2018, doi: doi.org/10.14716/ijtech.v9i2.1204.
- [12] K. Copec, K. Celina, D. Filipovic, V. Jurisic, and I. Kovacev, “Effect of Waste Cooking Oil Blending with Diesel Fuel on Tractor Engine Performances and Exhaust Gases Emission,” *Pol. J. Environ. Stud.*, vol. 32, no. 1, pp. 41–48, 2023, doi: 10.15244/pjoes/153594.
- [13] C. D. Mandolesi de Araújo, C. C. de Andrade, E. de Souza e Silva, and F. A. Dupas, “Biodiesel production from used cooking oil: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 27, pp. 445–452, 2013, doi:

- <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.014>.
- [14] K. A. Abed, M. S. Gad, A. K. El Morsi, M. M. Sayed, and S. A. Elyazeed, "Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions," *Egypt. J. Pet.*, vol. 28, no. 2, pp. 183–188, 2019, doi: 10.1016/j.ejpe.2019.03.001.
- [15] M. B. Sales *et al.*, "Sustainable Feedstocks and Challenges in Biodiesel Production : An Advanced Bibliometric Analysis," *Bioengineering*, vol. 10, no. 3390, 2022, doi: 10.3390/bioengineering9100539.
- [16] S. O. Okpo and E. D. Edafiadhe, "Unlocking the Power of Waste Cooking Oils for Sustainable Energy Production and Circular Economy : A Review," *J. Eng. Res. Dev.*, vol. 7, no. 1, pp. 41–55, 2024, doi: 10.53982/ajerd.
- [17] V. Makareviciene, E. Sendzikiene, and M. Gumbyte, "Application of Simultaneous Oil Extraction and Transesterification in Biodiesel Fuel Synthesis : A Review," *Energies*, vol. 13, no. 2204, pp. 1–16, 2020.
- [18] J. Najeeb *et al.*, "Nanobiocatalysts for Biodiesel Synthesis through Transesterification—A Review," *Catalysts*, vol. 11, no. 171, pp. 1–40, 2021, doi: 10.3390/catal11020171.
- [19] D. Kurczynski, G. Weisło, and P. Łagowski, "Experimental Study of Fuel Consumption and Exhaust Gas Composition of a Diesel Engine Powered by Biodiesel from Waste of Animal Origin," *Energies*, vol. 14, no. 3472, 2021, doi: 10.3390/en14123472.
- [20] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, 2nd Edition. New York: McGraw-Hill Education, 2018. [Online]. Available: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781260116106>
- [21] W. Beitz and K.-H. Küttner, *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. Berlin: Springer-Verlag, 1987.
- [22] G. Chiatti, O. Chiavola, and E. Recco, "Effect of Waste Cooking Oil Biodiesel Blends on Performance and Emissions from a CRDI Diesel Engine Diesel Engine," in *INTECH*, INTECH, 2017. doi: 10.5772/intechopen.69740.
- [23] A. Rahmandhika, "Pengaruh Variasi Pembebanan Terhadap Performansi Mesin Diesel Single-Fuel Berbahan Bakar Dexlite Dan Liquified Petroleum Gas," *J. Mesin Nusantara*, vol. 7, no. 1, pp. 89–101, 2024, doi: 10.29407/jmn.v7i1.21874.
- [24] M. Selvam, N. Pragadish, K. A. Harish, R. G. Srinivasan, Y. Devarajan, and N. Kaliappan, "Investigating emission characteristics and combustion performance of a CRDI engine utilizing novel biodiesel derived from waste cooking oil and pentanol blends," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 14742, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-98462-6 1.