

STUDI EKSPERIMENTAL UNJUK KERJA GENERATOR SET DIESEL 150 KVA MENGUNAKAN CAMPURAN BAHAN BAKAR NABATI (HVO DAN FAME) KONSENTRASI TOTAL 40%

*Lintong Sahala Sirait¹, Berkah Fajar Tamtono Kiono², Muchammad²

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: lintongsirait13@gmail.com

Abstrak

Bahan bakar nabati berbasis kelapa sawit untuk mesin diesel terus dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan solar dalam negeri yang signifikan serta mengatasi permasalahan emisi. Bahan bakar seperti CPO dan Fatty Acid Methyl Ester (B100) mengalami kendala teknis, baik secara performa maupun keandalan, sehingga dilakukan pengembangan energi baru dengan jenis Hydrotreated Vegetable Oil (HVO/G100). Tujuan penelitian ini yaitu mengkaji unjuk kerja pada penggunaan bahan bakar G40, B30G10, dan B35G5 terhadap generator set diesel sebagai substitusi diesel murni. Metode penelitian yang digunakan ialah eksperimental dalam kondisi operasi aktual. Hasil penelitian menunjukkan Bahan bakar G40 memiliki unjuk kerja menyerupai diesel murni karena memiliki karakteristik bahan bakar yang unggul dibandingkan dengan bahan bakar lain yang diuji. Melalui metode Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), G40 menunjukkan unjuk kerja terbaik untuk menggantikan diesel murni (B0) pada beban maksimum, sedangkan pada beban 75 kW yaitu B30G10.

Kata Kunci: diesel; fame; generator set; hvo; unjuk kerja

Abstract

Palm oil-based biofuels for diesel engines are being continuously developed to meet the significant domestic demand for solar energy and address emissions issues. Fuels such as CPO and Fatty Acid Methyl Ester (B100) face technical challenges, both in terms of performance and efficiency, leading to the development of new energy sources such as Hydrotreated Vegetable Oil (HVO/G100). The purpose of this study was to assess the performance of G40, B30G10, and B35G5 fuels in diesel generator sets as a substitute for pure diesel. The research method used was experimental under actual operating conditions. The results showed that G40 fuel performed similarly to pure diesel due to its superior fuel characteristics compared to other tested fuels. Using the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) method, G40 performed best as a substitute for pure diesel (B0) at maximum loads, while B30G10 performed best at 75 kW.

Keywords: diesel; fame; generator set; hvo; performance

1. Pendahuluan

Dalam dinamika kehidupan manusia, manusia tidak dapat dipisahkan dengan kebutuhan terhadap energi. Kebutuhan akan energi dapat terlihat dari berbagai aktivitas keseharian, seperti kebutuhan akan listrik untuk menyalakan peralatan elektronik, bahan bakar untuk menjalankan kendaraan, dan lain-lain. Sementara itu, pembangkitan energi listrik di Indonesia sebagian besar masih didominasi oleh energi tidak terbarukan seperti batu bara. Adapun batu bara yang ada pada saat ini merupakan hasil dari proses pembentukan endapan bahan organik yang terjadi jutaan tahun yang lalu [1]. Penggunaan batu bara pada pembangkit listrik merupakan penyebab utama emisi gas rumah kaca dan emisi udara beracun secara global [2]. Oleh karena itu, diperlukan sumber energi baru terbarukan.

Negara Indonesia memiliki potensi kelapa sawit terbesar di dunia yaitu sebagai penghasil lebih dari 55% produksi sawit dunia [3]. Pada sisi lain, pengembangan energi baru dan terbarukan juga perlu dilakukan untuk mengatasi impor solar yang tinggi akibat peningkatan kebutuhan bahan bakar diesel Indonesia setiap tahun. Pengembangan bahan bakar nabati berbasis kelapa sawit untuk mesin diesel telah dilakukan secara bertahap. Tahap pengembangan salah satunya dilakukan dengan pengujian 100% CPO (*Crude Palm Oil*), yaitu hasil ekstraksi langsung buah sawit, pada PLTD (Pembangkit Listrik Tenaga Diesel). Berdasarkan penelitian yang dilakukan Cahyo pada 2023, terjadi penurunan daya kotor mesin sebesar 14,43% ketika pengujian dilakukan secara kontinyu selama 375 jam. Penggunaan 100% CPO juga meningkatkan kadar emisi gas buang NO_x lebih tinggi tiga kali lipat dari batas maksimum peraturan sebesar 1400 mg/Nm³ (untuk mesin diesel kapasitas kurang dari 3 MW). Selain itu, penggunaannya menyebabkan terdapat endapan zat pengotor pada kepala silinder, klep, nosel, dan piston yang dapat mengganggu proses pembakaran dan kerusakan mesin [4].

Pemerintah juga melakukan pengembangan bahan bakar berupa Fatty Acid Methyl Ester (FAME) atau disebut juga dengan biodiesel (B100). FAME berasal dari asam lemak yang dimiliki tumbuhan (nabati) yang dilakukan proses transesterifikasi dengan metanol dan dilakukan penghilangan gliserin sebagai produk samping [5]. Pada tahun 2025, pemerintah telah memberikan *mandatory* penggunaan B40 (campuran 40% FAME (B100) dan 60% bahan bakar diesel murni (B0)) melalui Keputusan Menteri ESDM No.345.K/EK.01.MEM.E/2024. Penetapan ini merupakan bagian dari kelanjutan dari program penggunaan B30 (campuran 30% FAME (B100) dan 70% bahan bakar diesel murni (B0)) pada tahun 2020 serta penggunaan B35 (campuran 35% FAME (B100) dan 65% bahan bakar diesel murni (B0)) pada tahun 2023. Program penggunaan biodiesel ini sudah diimplementasikan pada berbagai sektor, seperti transportasi dan pembangkit listrik. Meskipun FAME memiliki keunggulan dari sisi keberlanjutan, penambahan kuantitas FAME pada campuran diesel murni dapat mengakibatkan penurunan kemampuan stabilitas oksidasi bahan bakar secara drastis [6].

Untuk menangani hal tersebut, pemerintah menginisiasikan studi eksperimental terkait bahan bakar alternatif, yaitu Hydrotreated Vegetable Oil (HVO). HVO atau disebut juga *green diesel* (G100) merupakan bahan bakar nabati dengan jumlah komposisi parafin tinggi yang diproses dengan menambahkan hidrogen dalam reaksi katalis. Bahan baku HVO ini dapat berasal dari minyak kelapa sawit (CPO). HVO, dengan struktur kimia C_nH_{2n+2} , memiliki sifat kimia dengan angka setana lebih tinggi dari diesel murni (B0) dan memiliki kandungan sulfur sangat rendah.

Penggunaan HVO sudah digunakan pada beberapa negara di Eropa untuk angkutan umum. Namun, di Indonesia penggunaan HVO masih sangat terbatas jumlahnya. Keterbatasan ini menunjukkan perlunya kajian lebih lanjut mengenai potensi dan aplikasinya. Dilakukannya eksperimen ini ditujukan untuk kesiapan penerapan bahan bakar green diesel ini pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel. Penelitian ini memiliki beberapa komposisi bauran dari bahan bakar yang berasal dari bahan bakar diesel murni (B0), FAME (B100), dan HVO (G100). Bauran bahan bakar yang diteliti diantaranya yaitu bahan bakar bakar B0, G40, B30G10, dan B35G5. Bahan bakar G40 yaitu bauran dari bahan bakar yang terdiri dari 40% HVO dan 60% diesel murni (B0), B30G10 yaitu bauran dari bahan bakar yang terdiri dari 30% FAME, 10% HVO, dan 60% diesel murni (B0), dan B35G5 yaitu bauran dari bahan bakar yang terdiri dari 35% FAME, 5% HVO, dan 60% diesel murni (B0). Seluruh bauran bahan bakar ini memiliki kesamaan yaitu sama-sama memiliki bauran dari 40% bahan bakar nabati. Bauran bahan bakar tersebut akan dibandingkan dengan bahan bakar diesel murni (B0) dalam penggunaannya pada generator diesel skala kecil sebagai representasi Pembangkit Listrik Tenaga Diesel.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis unjuk kerja (daya nyata, temperatur gas buang, temperatur cairan pendingin, tekanan oli mesin, tingkat kebisingan, konsumsi bahan bakar, konsumsi bahan bakar spesifik, efisiensi total sistem, *heat rate*, dan emisi gas buang) yang terjadi pada generator diesel dengan menggunakan bauran bahan bakar nabati 40% serta mengkaji unjuk kerja terbaik yang dapat terjadi menggunakan bahan bakar tersebut. Metode penelitian yang digunakan ialah eksperimental dalam kondisi operasi aktual dengan menggunakan bahan bakar B0, G40, B30G10, dan B35G5 dengan kondisi idle (tanpa beban) dan beban kerja berupa daya listrik sebesar 50 kW, 75 kW, dan 100 kW atau lebih rendah jika terjadi fluktuasi tinggi pada RPM. Penelitian ini diperlukan sebagai *base knowledge* untuk mempelajari studi optimalisasi pemanfaatan bahan bakar Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) yang berpotensi digunakan sebagai bahan bakar alternatif yang digunakan secara komersial di Indonesia, terutama pada pembangkit listrik berbasis diesel.

2. Dasar Teori

2.1 Prinsip Kerja Generator Set Diesel

Generator set diesel bekerja dengan mengubah energi kimia yang berasal dari bahan bakar diesel menjadi energi listrik. Pada prosesnya, energi kimia yang dimiliki oleh setiap bahan bakar diubah menjadi energi mekanik oleh Internal Combustion Engine, yang kemudian energi tersebut dikonversikan lagi menjadi energi listrik oleh alternator. Pembakaran pada mesin diesel bekerja berdasarkan prinsip kompresi udara hingga tekanan dan suhu sangat tinggi, kemudian bahan bakar diinjeksi pada ruang bakar sehingga terjadi pembakaran dengan sendirinya (self ignition). Prinsip kerja siklus diesel terdiri dari langkah hisap, kompresi, usaha, dan buang [7].

2.2 Bahan Bakar

Diesel murni (B0) adalah bahan bakar fosil yang berasal dari hasil penyulingan minyak bumi. Proses penyulingan minyak bumi melibatkan distilasi fraksional untuk memisahkan komponen hidrokarbon berdasarkan titik didih, yang mana titik distilasi diesel murni berada pada rentang 190°C hingga 350°C [8], sehingga menghasilkan hidrokarbon rantai panjang. Pembakaran diesel menghasilkan emisi seperti NO_x, CO, CO₂, SO₂, hidrokarbon tak terbakar, dan partikel jelaga sangat tinggi.

Fatty Acid Methyl Ester (FAME) adalah biodiesel murni (B100) yang dibuat melalui reaksi transesterifikasi trigliserida dengan metanol menggunakan katalis basa seperti NaOH atau KOH. FAME dapat berasal dari banyak sumber, tidak terbatas pada minyak kelapa sawit, tetapi juga kedelai, bunga matahari, minyak lemak hewani, dan minyak bekas (waste cooking oil).

Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) atau G100 adalah bahan bakar hidrokarbon terbarukan yang diperoleh dari proses hidrogenasi minyak nabati atau lemak hewani dalam kondisi tekanan dan suhu tinggi. Proses ini melibatkan

pemecahan gugus ester dan saturasi ikatan rangkap, menghasilkan rantai hidrokarbon parafin yang serupa dengan fraksi diesel fosil.

2.3 Daya Nyata

Daya adalah kuantitas kerja yang digunakan oleh suatu sistem seperti mesin dengan mengukur seberapa banyak energi yang digunakan atau tenaga yang diproduksi per satuan waktu.

2.4 Temperatur Gas Buang

Temperatur gas buang merupakan indikator langsung dari kondisi pembakaran di dalam ruang bakar generator diesel. Penggunaan bahan bakar alternatif yang memiliki perbedaan nilai kalor, laju pembakaran, dan komposisi kimia akan memengaruhi jumlah panas yang dihasilkan selama proses pembakaran.

2.5 Temperatur Cairan Pendingin

Temperatur cairan pendingin secara menunjukkan jumlah panas yang diserap dari blok mesin akibat proses pembakaran. Penggunaan bahan bakar alternatif dapat menyebabkan perbedaan temperatur cairan pendingin tergantung pada nilai kalor dan efisiensi pembakaran masing-masing bahan bakar.

2.6 Tekanan Oli Mesin

Tekanan oli merupakan besaran yang menunjukkan kemampuan sistem pelumasan dalam mengalirkan oli pelumas ke seluruh bagian mesin yang membutuhkan pelumasan, seperti bearing, crankshaft, camshaft, dan komponen lain yang bergerak. Tekanan ini dihasilkan oleh pompa oli yang mendorong oli melalui saluran pelumasan dengan tekanan tertentu, yang sangat dipengaruhi oleh viskositas oli, kecepatan putaran mesin, dan kondisi komponen mesin.

2.7 Tingkat Kebisingan

Tingkat kebisingan pada genset diesel dapat digunakan sebagai indikator tidak langsung untuk menilai performa bahan bakar alternatif. Kebisingan yang timbul berasal dari ledakan pembakaran di ruang bakar, getaran mekanis mesin, serta aliran gas buang.

2.8 Konsumsi Bahan Bakar

Konsumsi bahan bakar merupakan jumlah bahan bakar yang digunakan agar mesin dapat beroperasi dalam waktu tertentu. Konsumsi bahan bakar dapat dituliskan dalam satuan kilogram per jam (kg/h). Konsumsi bahan bakar penting untuk mengukur efisiensi mesin.

2.9 Efisiensi Termal

Efisiensi termal merupakan salah satu bentuk dari efisiensi energi. Efisiensi energi ialah nilai dari kuantitas bagian energi yang disalurkan menjadi proses yang berguna dari yang potensial untuk diberikan. Efisiensi menggambarkan seberapa besar kemampuan suatu sistem untuk memanfaatkan potensi yang dimiliki. Dalam hal efisiensi mesin pembakaran dalam, potensi yang dimiliki merujuk pada nilai kalor, LHV, yang dimiliki oleh setiap bahan bakar. Sedangkan energi yang berguna merupakan daya nyata untuk melakukan kerja.

2.10 Heat Rate

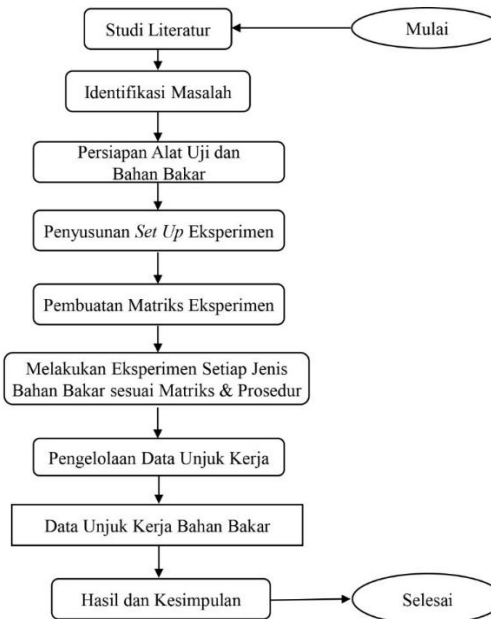
Heat rate (HR) adalah besaran yang menunjukkan jumlah energi bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu satuan daya listrik yang dinyatakan dalam kJ/kWh. Semakin rendah nilai heat rate, maka semakin efisien mesin dalam mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi listrik.

2.11 Emisi Gas Buang

Emisi gas buang merupakan gas hasil sisa pembakaran yang dikeluarkan dari generator diesel menuju ke lingkungan sekitar. Emisi gas buang dapat bersifat merusak dan berbahaya bagi lingkungan. Beberapa jenis emisi gas buang mesin diesel, diantaranya nitrogen oksida, karbon monoksida, karbon dioksida, dan sulfur dioksida.

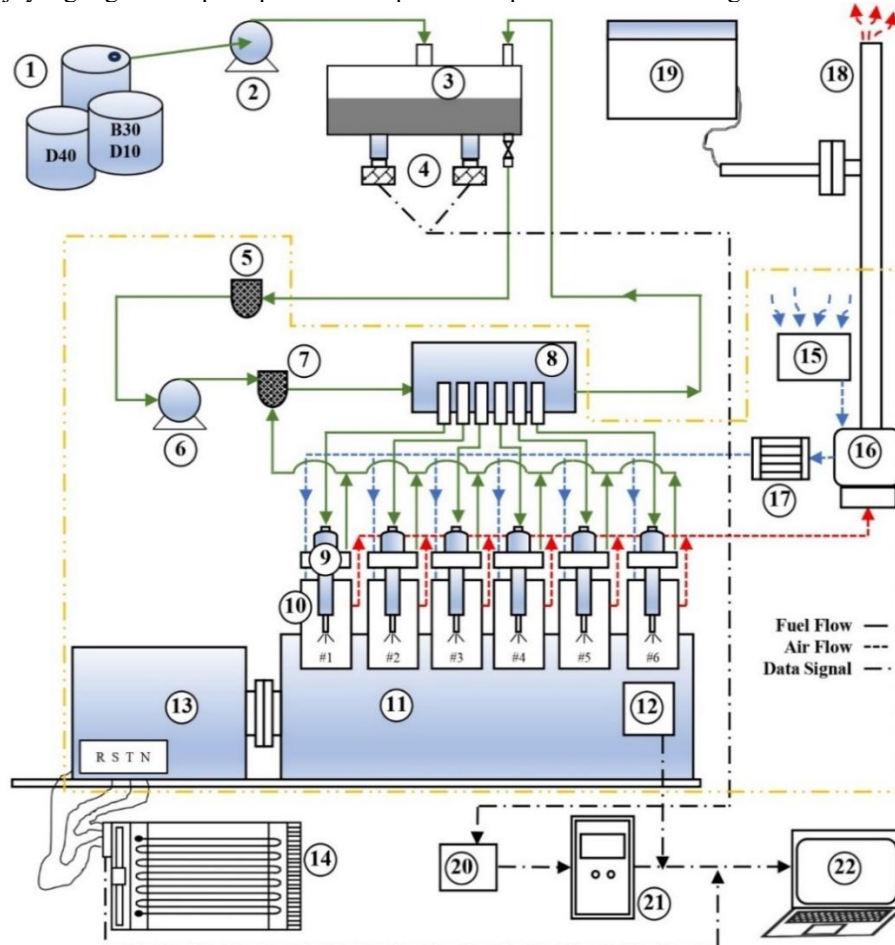
3. Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilakukan berdasarkan diagram alir seperti Gambar 1 sebagai berikut.



Gambar 1. Diagram Alir Metode Penelitian

Set up alat uji yang digunakan pada penelitian dapat dilihat pada Gambar 2 sebagai berikut.



Gambar 2. Set Up Alat Uji

Keterangan :

- | | |
|-------------------------------|--------------------------|
| 1. Raw Fuel Storage | 12. Data Panel |
| 2. Fuel Pump | 13. Alternator |
| 3. Fuel Service Tank | 14. Load Bank |
| 4. Load Cell | 15. Air Inlet |
| 5. Pre-Filter | 16. Turbocharger |
| 6. Lift Pump | 17. Intercooler |
| 7. Primary Filter & Separator | 18. Exhaust Stack |
| 8. Fuel Injection Pump | 19. Exhaust Gas Analyzer |
| 9. Injector | 20. Junction Box |
| 10. Combustion Chamber | 21. Logic Panel |
| 11. Diesel Engine | 22. Data Acquisition |

Pada Gambar 2 ditunjukkan skema sistem uji yang digunakan. Proses dimulai dengan pemindahan bahan bakar dari *raw fuel storage* ke dalam *fuel service tank* menggunakan pompa bahan bakar. Pada *fuel service tank* dipasang *load cell* yang berfungsi mengukur massa bahan bakar. Selanjutnya, bahan bakar dialirkan menuju generator diesel yang digunakan untuk proses pembakaran pada generator set dan sebagian lainnya dialirkan kembali ke *fuel service tank*. Perubahan massa bahan bakar sebelum dan sesudah pemakaian dikelola melalui sistem *data acquisition* setelah melewati *junction box* dan *logic panel*. Energi listrik yang dihasilkan generator dialirkan menuju load bank sebagai beban melalui kabel R-S-T-N. Besarnya daya listrik yang terbaca selanjutnya direkam oleh sistem *data acquisition*. Sebagian energi dari gas buang dimanfaatkan oleh turbocharger untuk menggerakkan kompresor udara masuk, sedangkan sisa gas buang dilepaskan ke lingkungan melalui *exhaust stack*. Emisi yang keluar dari *exhaust stack* kemudian dianalisis menggunakan *exhaust gas analyzer*.

Selanjutnya, metode yang digunakan untuk penentuan bahan bakar dengan fenomena dan unjuk kerja optimum yaitu metode Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) yang merupakan metode pengambilan keputusan berdasarkan multiparameter. Pemilihan parameter yang tepat dilakukan untuk setiap pola pembebanan agar tidak ada parameter yang bersifat redundant (berulang). Berikut merupakan langkah-langkah pengerjaan metode TOPSIS [9][10]

Langkah pertama pada penentuan bahan bakar optimum adalah membuat nilai dari setiap parameter dengan satuan yang berbeda menjadi kriteria yang tidak berdimensi (tanpa satuan) yang dilakukan dengan normalisasi hasil pengukuran.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (3.1)$$

Kemudian menentukan pembobotan (w_j) untuk setiap parameter. Tahap selanjutnya yaitu menghitung nilai ternormalisasi terbobot.

$$v_{ij} = w_j r_{ij} \quad (3.2)$$

Selanjutnya ialah tahap menentukan nilai solusi ideal positif dan negatif. Nilai solusi ditentukan oleh parameter uji, yang mana parameter ditentukan bersifat sebagai *benefit* atau *cost* ketika nilainya menjadi lebih tinggi.

$$A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\} = \{(\max_j v_{ij} | i \in I'), (\min_j v_{ij} | i \in I'')\} \quad (3.3)$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} = \{(\min_j v_{ij} | i \in I'), (\max_j v_{ij} | i \in I'')\} \quad (3.4)$$

Selanjutnya merupakan langkah menentukan jarak ke solusi ideal positif dan solusi ideal negatif serta skor kedekatan relatif.

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (3.5)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (3.6)$$

$$C_i^* = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (3.7)$$

Perhitungan skor kedekatan relatif (C_i^*) dalam metode TOPSIS, yang menunjukkan kedekatan alternatif ke solusi ideal positif. Nilai ini diperoleh dari rasio antara jarak terhadap solusi ideal negatif (D^-) dengan jumlah jarak terhadap solusi ideal positif (D^+). di mana semakin tinggi nilai C_i^* , maka alternatif tersebut semakin baik.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pengolahan data, dapat disimpulkan bahwa:

1. Bahan bakar G40 dan B30G10 memiliki temperatur gas buang, temperatur cairan pendingin, tekanan oli mesin, tingkat kebisingan yang relatif mendekati fenomena operasional diesel murni. Namun, bahan bakar B35G5 menunjukkan fenomena operasional yang relatif berbeda dengan diesel murni. Bahan bakar G40 menunjukkan konsumsi bahan bakar, konsumsi bahan bakar spesifik, efisiensi total sistem, dan *heat rate* yang relatif sama dengan diesel murni, namun B30G10 dan B35G5 menunjukkan hasil yang relatif lebih rendah dari diesel murni. Selain itu, bahan bakar nabati 40% menghasilkan emisi NO_x dan SO₂ yang lebih rendah daripada diesel murni, walaupun menghasilkan emisi CO₂ yang lebih tinggi.
2. Berdasarkan metode Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), bahan bakar B30G10 ialah bahan bakar paling optimum menggantikan diesel murni pada beban 75 kW. Adapun bahan bakar G40 merupakan bahan bakar yang paling optimum untuk menggantikan diesel murni pada pengoperasian beban maksimum.

5. Daftar Pustaka

- [1] G. Feulner, "Formation of most of our coal brought Earth close to global glaciation," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 114, no. 43, hal. 11333–11337, Okt 2017, doi: 10.1073/pnas.1712062114.
- [2] L. C. Voumik, M. A. Islam, S. Ray, N. Y. Mohamed Yusop, dan A. R. Ridzuan, "CO₂ Emissions from Renewable and Non-Renewable Electricity Generation Sources in the G7 Countries: Static and Dynamic Panel Assessment," *Energies*, vol. 16, no. 3, Feb 2023, doi: 10.3390/en16031044.
- [3] FAO, *World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2022*. FAO, 2022. doi: 10.4060/cc2211en.
- [4] N. Cahyo, R. B. Sitanggang, A. A. Simareme, dan P. Paryanto, "Impact of crude palm oil on engine performance, emission product, deposit formation, and lubricating oil degradation of low-speed diesel engine: An experimental study," *Results Eng.*, vol. 18, Jun 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101156.
- [5] W. Gourich, C. P. Song, Amelia, S. H. Adiiba, dan E. S. Chan, "Simple and green one-pot process for the production of fatty acids via enzymatic hydrolysis of methyl esters catalyzed by free liquid lipases," *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 38, Apr 2024, doi: 10.1016/j.scp.2024.101506.
- [6] K. Ginanjar *et al.*, "Experimental Analysis of Palm-Oil Biodiesel Oxidation Stability on the Aging Characteristics of Diesel-Biodiesel Blends," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics, 2024. doi: 10.1088/1755-1315/1354/1/012008.
- [7] W. W. Pulkrabek, *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, 2nd Ed.* 2004. doi: 10.1115/1.1669459.
- [8] Y. Zhang, G. Ji, F. Ullah, dan A. Li, "Polyoxometalate catalyzed oxidative desulfurization of diesel range distillates from waste tire pyrolysis oil," *J. Clean. Prod.*, vol. 389, no. August 2022, hal. 136038, 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136038.
- [9] M. Madanchian dan H. Taherdoost, "A comprehensive guide to the TOPSIS method for multi-criteria decision making," *Sustain. Soc. Dev.*, vol. 1, no. 1, hal. 1–6, 2023, doi: 10.54517/ssd.v1i1.2220.
- [10] K. Muninathan, M. Venkata Ramanan, N. Monish, dan G. Baskar, "Economic analysis and TOPSIS approach to optimize the CI engine characteristics using span 80 mixed carbon nanotubes emulsified *Sapindus trifoliatus* (soapnut) biodiesel by artificial neural network prediction model," *Appl. Energy*, vol. 355, no. November 2023, hal. 122309, 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.122309.