

Pengembangan Sistem *Internet Of Things* (IoT) untuk Real-Time Monitoring Kinerja Mesin Diesel Stasioner : Studi Eksperimental Pengaruh Campuran Biodiesel Minyak Jarak Terhadap Suhu dan Konsumsi Bahan Bakar

Sudalto*¹, Joko Rochmadi²

^{1,2}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Dharma AUB Surakarta

e-mail: *¹sudalto1963@gmail.com , ²rochmadijoko@gmail.com

Abstrak

Salah satu bidang yang menarik dalam studi mesin diesel stasioner adalah penggunaan bahan bakar alternatif dan dampaknya terhadap kinerja mesin. Penelitian sebelumnya telah membahas penggunaan biofuel, bahan bakar sintetis, dan sumber energi alternatif lainnya untuk menggerakkan mesin ini. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki kemungkinan minyak jarak sebagai sumber bahan bakar pengganti untuk mesin diesel yang dapat menurunkan konsumsi bahan bakar dan memengaruhi suhu mesin dengan dicampur bahan bakar minyak diesel serta mengembangkan sistem *Internet of Things* (IoT) sebagai alat real-time monitoring. Jenis penelitian eksperimental dengan variabel penelitian, variabel bebas terdiri atas, bahan bakar minyak diesel, minyak jarak dan campuran minyak jarak-minyak diesel (dengan perbandingan 10:90, 25:75, 50:50) dan sistem IoT yang dikembangkan menggunakan sensor suhu (LM35 atau thermocouple) dan sensor aliran bahan bakar (flowmeter) yang terintegrasi dengan mikrokontroler (NodeMCU/ESP32), variabel terikat terdiri atas, konsumsi bahan bakar dan temperatur kerja mesin dan variabel kontrol adalah temperature ruang saat pengujian. penelitian ini menghasilkan temuan bahwa konsumsi bahan bakar dengan penggunaan minyak jarak sebagai bahan bakar motor diesel (5,83 CC/menit pada putaran 3000 rpm) tertinggi. Bahan bakar campuran menghasilkan konsumsi bahan bakar yang lebih rendah dari bahan bakar minyak jarak (50% minyak jarak, konsumsi bahan bakar 5,46 CC/menit pada putaran 3000 rpm) dan demikian pula dengan suhu motor diesel (51,5 °C pada putaran 3000 rpm) tertinggi. Bahan bakar campuran menghasilkan suhu motor yang lebih rendah dari bahan bakar minyak jarak (50% minyak jarak, suhu motor 48 °C pada putaran 3000 rpm). Jadi kesimpulan yang dapat diangkat dari hasil penelitian adalah implementasi sistem IoT dapat menyediakan data kinerja mesin secara akurat dan real-time, memfasilitasi analisis data yang cepat dan pengambilan keputusan operasional yang efisien dan data yang dihasilkan adalah konsumsi bahan bakar minyak jarak lebih tinggi dibanding minyak diesel dan Bahan bakar campuran menghasilkan konsumsi bahan bakar yang lebih rendah dari bahan bakar minyak jarak tetapi masih diatas bahan bakar minyak diesel. sementara suhu motor diesel yang dihasilkan tidak jauh berbeda dengan kondisi konsumsi bahan bakar.

Kata kunci— Mesin Diesel Stasioner, Biodiesel Minyak Jarak, Konsumsi Bahan Bakar, Suhu Mesin, *Internet of Things* (IoT), Real-Time Monitoring

Abstract

One compelling area in the study of stationary diesel engines is the use of alternative fuels and their impact on engine performance. Previous research has discussed the application of biofuels, synthetic fuels, and other alternative energy sources to power these engines. The objective of this study is to investigate the potential of castor oil as a substitute fuel source for diesel engines that can reduce fuel consumption and influence engine temperature when

blended with diesel oil, and concurrently to develop an Internet of Things (IoT) system for real-time monitoring. The research employs an experimental design with independent variables consisting of diesel fuel, castor oil, and castor oil-diesel fuel blends (with ratios of 10:90, 25:75, and 50:50), as well as the developed IoT system utilizing temperature sensors (LM35 or thermocouple) and a fuel flow sensor (flowmeter) integrated with a microcontroller (NodeMCU/ESP32). The dependent variables are fuel consumption and engine operating temperature, and the control variable is the ambient temperature during testing. This study found that pure castor oil resulted in the highest fuel consumption (5.83 CC/minute at 3000 rpm). Fuel blends yielded lower fuel consumption compared to pure castor oil (50% castor oil blend, 5.46 CC/minute at 3000 rpm), and similarly influenced diesel engine temperature, where pure castor oil resulted in the highest temperature (51.5 °C at 3000 rpm). The fuel blend resulted in a lower engine temperature than pure castor oil (50% castor oil blend, 48 °C at 3000 rpm). Therefore, the conclusion drawn from the research findings is that the implementation of the IoT system can provide accurate and real-time engine performance data, facilitating rapid data analysis and efficient operational decision-making. Furthermore, the data indicates that castor oil fuel consumption is higher than diesel oil, and fuel blends result in lower fuel consumption than pure castor oil but still higher than pure diesel oil. Meanwhile, the resulting diesel engine temperature is not significantly different from the conditions related to fuel consumption.

Keywords— castor oil, diesel oil, diesel engine

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan akan sumber daya meningkat drastis seiring dengan permintaan untuk industri seperti transportasi. Menurut laporan, lebih dari dua pertiga energi yang digunakan oleh sektor transportasi berasal dari sumber daya alam, khususnya bahan bakar fosil [1]. Mesin diesel stasioner telah memainkan peran penting dalam berbagai industri, menyediakan daya yang andal untuk berbagai macam aplikasi. Dari menyalakan generator selama pemadaman listrik hingga menggerakkan pompa air untuk irigasi, mesin ini telah terbukti penting bagi banyak bisnis dan masyarakat. Efisiensi, daya tahan, dan kemampuannya untuk beroperasi dalam jangka waktu lama tanpa gangguan menjadikannya pilihan populer untuk tugas-tugas yang memerlukan daya terus-menerus. Dalam makalah ini, kita akan membahas sejarah mesin diesel stasioner, evolusinya dari waktu ke waktu, dan signifikansinya di dunia modern saat ini. Mesin diesel stasioner telah memainkan peran penting dalam berbagai industri, menyediakan daya yang andal untuk berbagai macam aplikasi. Dari menyalakan generator selama pemadaman listrik hingga menggerakkan pompa air untuk irigasi, mesin ini telah terbukti penting bagi banyak bisnis dan masyarakat. Efisiensi, daya tahan, dan kemampuannya untuk beroperasi dalam jangka waktu lama tanpa gangguan menjadikannya pilihan populer untuk tugas-tugas yang memerlukan daya terus-menerus. Dalam makalah ini, kita akan membahas sejarah mesin diesel stasioner, evolusinya dari waktu ke waktu, dan signifikansinya di dunia modern saat ini [2].

Salah satu bidang yang menarik dalam studi mesin diesel stasioner adalah penggunaan bahan bakar alternatif dan dampaknya terhadap kinerja mesin. Penelitian sebelumnya telah membahas penggunaan biofuel, bahan bakar sintetis, dan sumber energi alternatif lainnya untuk menggerakkan mesin ini. Para peneliti telah meneliti dampak bahan bakar ini terhadap efisiensi mesin, emisi, dan kinerja keseluruhan. Dengan memahami bagaimana berbagai bahan bakar berinteraksi dengan mesin diesel stasioner, kita dapat menilai potensi penggunaannya dalam berbagai aplikasi dengan lebih baik. Di bagian ini, kami akan memberikan tinjauan singkat tentang penelitian sebelumnya tentang bahan bakar alternatif dan pengaruhnya terhadap kinerja mesin.

Salah satu sumber bahan bakar alternatif yang dapat membantu memenuhi peraturan emisi adalah biodiesel yang terbuat dari minyak jarak. Dengan memanfaatkan minyak jarak sebagai sumber bahan bakar, kita dapat mengurangi emisi berbahaya dan bergerak menuju

industri transportasi yang lebih berkelanjutan [3]. Selain itu, dengan bereksperimen dengan berbagai campuran minyak jarak dan bahan bakar diesel (minyak diesel), dapat mengoptimalkan kinerja mesin dan meningkatkan efisiensi secara keseluruhan. Penelitian ini tidak hanya akan menguntungkan mesin diesel saat ini, tetapi juga berkontribusi pada pengembangan mesin yang lebih bersih dan lebih efisien di masa mendatang.

Meskipun mengalami degradasi pada mesin diesel, biodiesel minyak jarak telah menunjukkan kinerja yang baik, dengan emisi polutan yang lebih rendah termasuk hidrokarbon (HC) dan karbon monoksida (CO). Namun, salah satu kelemahan penggunaan biodiesel adalah peningkatan emisi nitrogen oksida (NOX). [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11]. Aditif ini berpotensi meningkatkan karakteristik bahan bakar mesin pengapian kompresi, efisiensi pembakaran, dan pengendalian emisi. Integrasi amonia dan nanopartikel telah menarik perhatian karena manfaat potensialnya dalam menurunkan emisi berbahaya dan meningkatkan kinerja mesin. [12] [13] [14].

Sementara emisi karbon monoksida (CO) menurun, konsumsi bahan bakar spesifik rem (BSFC) dan emisi nitrogen oksida (NOx) meningkat ketika alkohol seperti etanol dan butanol ditambahkan ke campuran bahan bakar [15]. Memanfaatkan HVO dan campuran biobutanol dan minyak jarak meningkatkan sifat pembakaran mesin, meningkatkan efisiensi energi sambil mempertahankan operasi yang stabil. Jika dibandingkan dengan bahan bakar diesel konvensional, campuran tersebut menurunkan emisi nitrogen oksida (NOx) dan partikel, terutama saat EGR beroperasi pada level optimal [16]. Saat biodiesel yang terbuat dari minyak jarak dan Mahua digunakan sebagai pengganti diesel murni, kinerja mesin meningkat secara signifikan. Ini menghasilkan tenaga mesin yang lebih konsisten dan torsi yang lebih besar. Jika dibandingkan dengan diesel konvensional, biodiesel yang terbuat dari minyak jarak dan Mahua dapat menurunkan emisi hidrokarbon (HC) dan karbon monoksida (CO). Namun, penggunaan biodiesel cenderung meningkatkan emisi nitrogen oksida (NOX) [17]. variabel untuk memaksimalkan kondisi hidrogenasi, termasuk suhu, tekanan, dan kuantitas hidrogen. Ditemukan bahwa dalam beberapa keadaan, komponen yang tidak diinginkan dapat dikurangi secara selektif, menghasilkan bensin dengan kualitas yang lebih tinggi [18]. Penelitian dapat memeriksa berbagai situasi pengoperasian dan parameter mesin secara lebih efektif dengan menggunakan model komputasional dan optimasi multi-objektif, yang meningkatkan pemahaman tentang bagaimana campuran biodiesel memengaruhi kinerja mesin [19].

Dari peneliti terdahulu diatas, diharapkan bahwa penelitian ini akan menentukan rasio ideal minyak diesel terhadap minyak jarak, yang akan menurunkan konsumsi bahan bakar. Penelitian ini juga akan meneliti bagaimana campuran bahan bakar memengaruhi suhu mesin, yang sangat penting untuk memahami kemungkinan variasi suhu pengoperasian dan hubungannya dengan kinerja dan keselamatan mesin. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki kemungkinan biodiesel yang diproduksi dari minyak jarak sebagai sumber bahan bakar pengganti untuk mesin diesel yang dapat menurunkan konsumsi bahan bakar dan memengaruhi suhu mesin dengan dicampur bahan bakar minyak diesel.

Pada saat yang sama, kemajuan Teknologi Informasi (TI), khususnya Internet of Things (IoT), telah merevolusi cara industri memantau dan mengelola aset mereka. Sistem pemantauan tradisional cenderung bersifat manual dan *offline*, sehingga data yang diperoleh kurang akurat dan tidak *real-time*. Integrasi teknologi IoT dalam eksperimen termal dan bahan bakar memungkinkan akuisisi data yang otomatis, akurat, dan dapat diakses dari jarak jauh (*real-time monitoring*), sehingga dapat mempercepat proses analisis dan pengambilan keputusan operasional.

2. METODE PENELITIAN

Jenis penelitian ini adalah penelitian eksperimental (*experimental research*). Pendekatan ini dipilih karena penelitian ini bertujuan untuk menguji hubungan sebab-akibat (*cause-and-effect*).

effect) antara manipulasi variabel bebas (variasi campuran bahan bakar dan sistem IoT) terhadap variabel terikat (terhadap konsumsi bahan bakar dan temperature mesin diesel).

2.1 Bahan Pengujian

Bahan pengujian terdiri dari:

1. Minyak jarak sebagai bahan yang diuji
2. Minyak diesel sebagai bahan yang diuji

Peralatan yang digunakan dalam pengujian:

1. Motor diesel stasioner, sebagai peralatan bantu pengujian



Gambar 1. Motor diesel stasioner

Tabel 1. Spesifikasi motor diesel stasioner

Mesin Diesel Kubota RD 85 DI-1S	
Tipe	Horisontal, pendinginan air, 4 langkah
Diameter x Langkah	88 x 84 mm
Jml Silinder	single
Volume Silinder	510 CC
Torsi Maksimum	3,40 kg.m /1600 rpm
Tenaga Maksimum	8,5 hp/2200 rpm
Sistem Pembakaran	Direct Injection

2. Gelas ukur sebagai tempat pencampur minyak jarak dan minyak diesel
 3. Stopwatch sebagai alat bantu penentu waktu
 4. Thermometer sebagai alat bantu penentu suhu
- Pelaksanaan pengujian dilaksanakan di laboratorium motor bakar Fakultas Teknik Universitas Adi Unggul Birawa (FT-AUB)

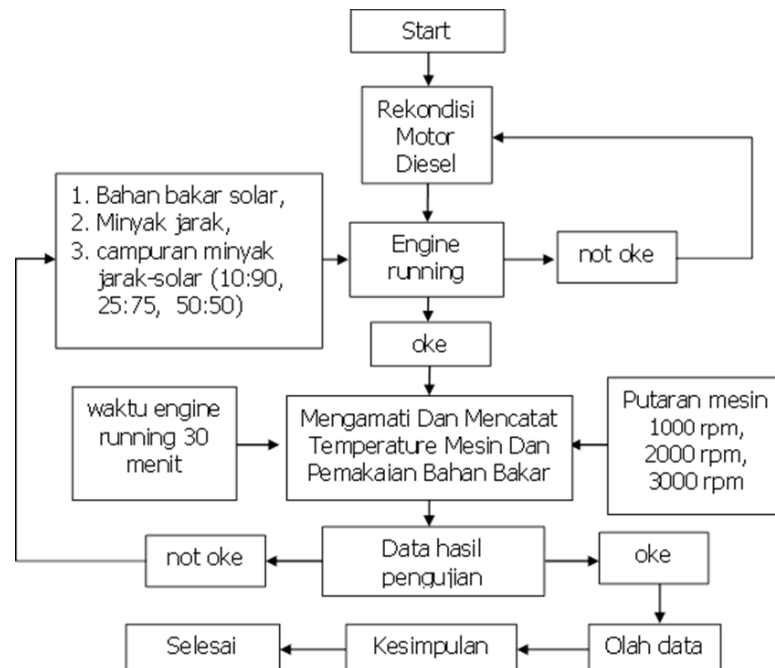
2.2 Variabel Penelitian

Variabel-variabel penelitian yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari tiga variabel, yaitu:

1. Variabel bebas terdiri atas, bahan bakar minyak diesel, minyak jarak dan campuran minyak jarak-minyak diesel (dengan perbandingan 10:90, 25:75, 50:50)
2. Variable terikat terdiri atas, konsumsi bahan bakar dan temperatur kerja mesin
3. Variabel kontrol adalah temperature ruang saat pengujian

4. Sistem Pemantauan: Implementasi Sistem *Internet of Things* (IoT) untuk akuisisi data *real-time*

2.3 Diagram Alir Pengujian



Gambar 2. Diagram Alir Pengujian

Langkah-langkah penelitian

1. Tahap Persiapan :

- a. Mempersiapkan bahan-bahan dan alat-alat yang digunakan untuk proses pengujian .
- b. Merekondisi mesin diesel stasioner satu silinder yang digunakan dalam proses pengujian

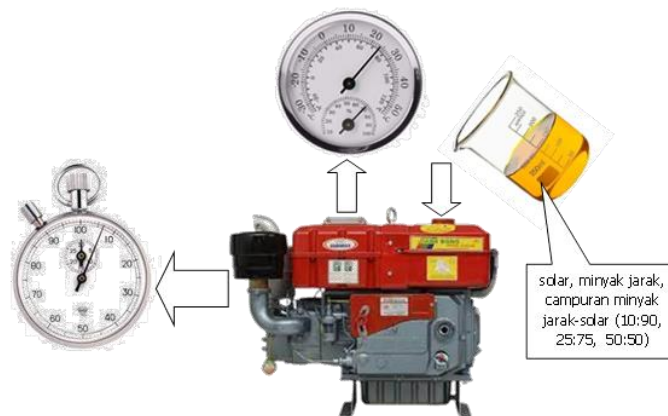
2. Tahap Pengujian

- a. Memasukkan bahan bakar uji (minyak diesel, minyak jarak, campuran minyak jarak-minyak diesel) bergantian sesuai pengujian
- b. Menghidupkan motor diesel stasioner
- c. Melakukan pengamatan setelah 2.a. 30 menit
- d. Melakukan 2.a. – 2.b. sebanyak 4 kali

3. Tahap pencatatan

- a. Melakukan pencatatan penggunaan bahan bakar dan temperatur motor diesel stasioner saat 2.d.
- b. Melakukan tabelisasi data

2.4 Skema Pengujian



Gambar 2. Skema pengujian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil pengujian

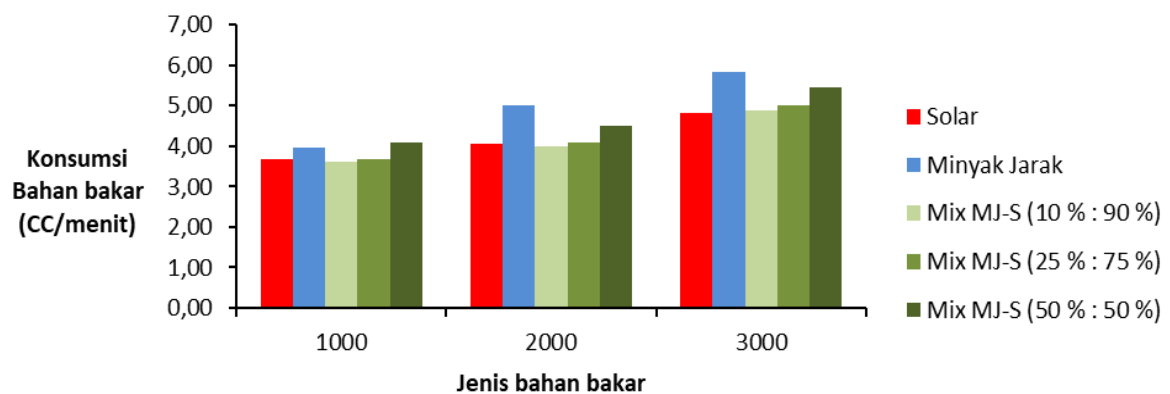
Hasil pengujian telah diolah sehingga menghasilkan data seperti dibawah ini dan sudah ditabelkan,

Tabel 2. Data konsumsi bahan bakar dan temperature motor diesel dengan menggunakan bahan bakar tunggal

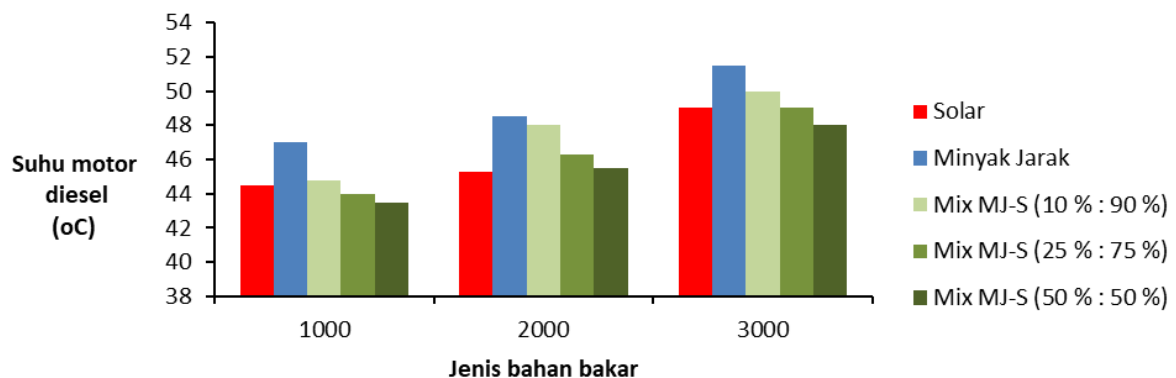
putaran motor	Minyak diesel		Minyak Jarak	
	Konsumsi Bahan bakar (CC/menit)	Suhu motor diesel (°C)	Konsumsi Bahan bakar (CC/menit)	Suhu motor diesel (°C)
1000	3,67	44,5	3,96	47
2000	4,04	45,25	5,00	48,5
3000	4,83	49	5,83	51,5

Tabel 2. Data konsumsi bahan bakar dan temperature motor diesel dengan menggunakan bahan bakar ganda

putaran motor	Campuran minyak diesel-minyak jarak (10 % : 90 %)		Campuran minyak diesel-minyak jarak (25 % : 75 %)		Campuran minyak diesel-minyak jarak (50 % : 50 %)	
	Konsumsi Bahan bakar (CC/menit)	Suhu motor diesel (°C)	Konsumsi Bahan bakar (CC/menit)	Suhu motor diesel (°C)	Konsumsi Bahan bakar (CC/menit)	Suhu motor diesel (°C)
1000	3,63	44,75	3,67	44	4,08	43,5
2000	4,00	48	4,08	46,25	4,50	45,5
3000	4,88	50	5,00	49	5,46	48



Gambar 4. Grafik perbandingan konsumsi bahan bakar pada motor diesel dengan penggunaan bahan bakar tunggal dan ganda



Gambar 5. Grafik perbandingan suhu motor pada motor diesel dengan penggunaan bahan bakar tunggal dan ganda

Pada gambar 4, terlihat grafik perbandingan konsumsi bahan bakar pada kecepatan putar motor diesel dan waktu running 30 menit, konsumsi bahan bakar dengan penggunaan minyak jarak sebagai bahan bakar motor diesel (5,83 CC/menit pada putaran 3000 rpm) lebih tinggi dibanding konsumsi bahan bakar minyak diesel (4,83 CC/menit pada putaran 3000 rpm). Bahan bakar campuran menghasilkan konsumsi bahan bakar yang lebih rendah dari bahan bakar minyak jarak tetapi masih diatas bahan bakar minyak diesel, semakin tinggi prosentase minyak jarak dalam campuran maka konsumsi bahan bakar semakin tinggi (50% minyak jarak, konsumsi bahan bakar 5,46 CC/menit pada putaran 3000 rpm)

Pada gambar 5. grafik perbandingan suhu motor diesel pada kecepatan putar motor diesel dan waktu running 30 menit, suhu motor dengan penggunaan minyak jarak sebagai bahan bakar motor diesel (51,5 °C pada putaran 3000 rpm) lebih tinggi dibanding suhu motor berbahan bakar minyak diesel (49 °C pada putaran 3000 rpm). Bahan bakar campuran menghasilkan suhu motor yang lebih rendah dari bahan bakar minyak jarak, semakin tinggi prosentase minyak jarak dalam

campuran maka konsumsi bahan bakar semakin rendah (50% minyak jarak, suhu motor 48 °C pada putaran 3000 rpm)

3.2 Pembahasan

Semakin tinggi proporsi minyak jarak dalam campuran, biasanya nilai kalor bahan bakar menurun dibandingkan minyak diesel murni, sehingga dapat meningkatkan konsumsi bahan bakar untuk menghasilkan energi yang sama [19], hal tersebut menjadikan konsumsi bahan bakar dengan penggunaan minyak jarak sebagai bahan bakar motor diesel lebih tinggi dibanding konsumsi bahan bakar minyak diesel dan Bahan bakar campuran menghasilkan konsumsi bahan bakar yang lebih rendah dari bahan bakar minyak jarak tetapi masih diatas bahan bakar minyak diesel.

Demikian pula dengan suhu motor diesel, hal ini disebabkan karena minyak jarak memiliki nilai kalor yang lebih rendah dibandingkan dengan minyak diesel murni, yang menyebabkan suhu pembakaran puncak di ruang bakar lebih rendah. Hal ini juga berkontribusi pada efisiensi termal yang sedikit lebih rendah karena konsumsi bahan bakar yang lebih tinggi [20]. Campuran minyak diesel dengan minyak nabati, seperti minyak jarak, dapat menurunkan nilai kalor bahan bakar dibandingkan dengan minyak diesel murni. Hal ini menyebabkan suhu puncak pembakaran di ruang bakar sedikit lebih rendah. Nilai kalor yang lebih rendah dapat memengaruhi efisiensi termal dan emisi gas buang, namun hal ini bergantung pada proporsi campuran dan kondisi operasi mesin [21].

4. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diangkat dari hasil penelitian adalah bahwa konsumsi bahan bakar dengan penggunaan minyak jarak sebagai bahan bakar motor diesel lebih tinggi dibanding konsumsi bahan bakar minyak diesel dan Bahan bakar campuran menghasilkan konsumsi bahan bakar yang lebih rendah dari bahan bakar minyak jarak tetapi masih diatas bahan bakar minyak diesel. sementara suhu motor diesel yang dihasilkan tidak jauh berbeda dengan kondisi konsumsi bahan bakar.

5. SARAN

Untuk penelitian lanjutan, penting untuk memperluas variabel terikat dengan mencakup analisis emisi gas buang (seperti \$CO\$, \$CO_2\$, \$NO_x\$, dan *smoke opacity*). Hal ini akan memberikan gambaran holistik mengenai dampak lingkungan dari penggunaan campuran biodiesel minyak jarak. Dapat dilakukan uji coba jangka panjang (uji ketahanan) menggunakan campuran bahan bakar yang paling efisien (misalnya B25) untuk mengamati dampak jangka panjang terhadap keausan komponen mesin (misalnya injector, piston ring, dan sludge oli).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A.G.M.B. Mustayen, M.G. Rasul, X. Wang, M Negnevitsky, J.M. Hamilton, "Remote areas and islands power generation: A review on diesel engine performance and emission improvement techniques," *Energy Conversion and Management*, Vol. 260, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115614>
- [2] S. Manigandan, P. Gunasekar, T.R. Praveen Kumar, Tahani Awad Alahmadi, N. Subramanian, Arivalagan Pugazhendhi, Kathirvel Brindhadevi, "Influence of dynamic position, fluid intake, hydration, and energy expenditure on sustainable mobility transport," *Applied Acoustics*, Vol. 175, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107809>
- [3] Chidambaranathan Bibin, S. Gopinath, R. Aravindraj, A. Devaraj, S. Gokula Krishnan, J.K.S. Jeevaanathan, "The production of biodiesel from castor oil as a potential feedstock and its usage in compression ignition Engine: A comprehensive review," *Vol. 33, no. 1*, pp. 84-92, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.205>
- [4] B. Chidambaranathan, S. Gopinath, R. Aravindraj, and ..., "The production of biodiesel from castor oil as a potential feedstock and its usage in compression ignition Engine: A comprehensive review," *Mater. Today* ..., 2020, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.205>
- [5] C. S. Osorio-González, N. Gómez-Falcon, and ..., "Production of biodiesel from castor oil: A review," *Energies*. mdpi.com, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en13102467>
- [6] S. Abel, L. T. Jule, L. Gudata, N. Nagaraj, and ..., "Preparation and characterization analysis of biofuel derived through seed extracts of *Ricinus communis* (castor oil plant)," *Scientific Reports*. nature.com, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14403-7>
- [7] K. Paul, V. B. Borugadda, A. S. Reshad, and ..., "... study of physicochemical and rheological property of waste cooking oil, castor oil, rubber seed oil, their methyl esters and blends with mineral diesel fuel," *Materials Science for* Elsevier, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.mset.2021.03.004>
- [8] M. Arunkumar, V. Mohanavel, A. Afzal, T. Sathish, and ..., "A study on performance and emission characteristics of diesel engine using *Ricinus Communis* (castor oil) ethyl esters," *Energies*. mdpi.com, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en14144320>
- [9] G. Valeika, J. Matijošius, K. Górski, A. Rimkus, and R. Smigins, "A study of energy and environmental parameters of a diesel engine running on hydrogenated vegetable oil (HVO) with addition of biobutanol and castor oil," *Energies*. mdpi.com, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en14133939>
- [10] H. Z. Woldetensay, D. S. Zeleke, and G. S. Tibba, "Data set of production of castor oil and characterization of cotton and castor mixed seed oil additives with diesel fuel," *Data in Brief*. Elsevier, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110210>
- [11] C. Xia, K. Brindhadevi, A. Elfasakhany, M. Alsehli, and S. Tola, "Performance, combustion and emission analysis of castor oil biodiesel blends enriched with nanoadditives and hydrogen fuel using CI engine," *Fuel*, 2021, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121541>
- [12] M. A. Attia, M. Nour, A. I. El-Seesy, and S. A. Nada, "The effect of castor oil methyl ester blending ratio on the environmental and the combustion characteristics of diesel engine under standard testing conditions," ... *Energy Technol.* ..., 2020, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100843>
- [13] Pugazhendhi, S. A. Alharbi, K. Loganathan, G. Subbiah, and ..., "Enhancing sustainable fuel solutions: Castor oil biodiesel with nanoparticles and ammonia, utilizing as a green substitute for diesel engines," *Fuel*, 2024, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131597>

- [14] D. Qi, W. Xing, P. Luo, J. Liu, and ..., "Effect of alcohols on combustion characteristics and particle size distribution of a diesel engine fueled with diesel-castor oil blended fuel," *Asia-Pacific J. ...*, 2020, <https://doi.org/10.1002/apj.2477>
- [15] G. Valeika, J. Matijošius, and A. Rimkus, "... energy and environmental parameters of compression ignition internal combustion engine fuelled by hydrogenated vegetable oil (HVO) and biobutanol–Castor oil fuel ...," *Energy Convers. Manag.*, 2022, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116198>
- [16] M. Kareemullah, A. Afzal, K. F. Rehman, and ..., "Performance and emission analysis of compression ignition engine using biodiesels from Acid oil, Mahua oil, and Castor oil," *Heat ...*, 2020, <https://doi.org/10.1002/htj.21642>
- [17] F. S. Mederos-Nieto, A. O. Santoyo-López, and ..., "Renewable fuels production from the hydrotreating over NiMo/ γ -Al₂O₃ catalyst of castor oil methyl esters obtained by reactive extraction," *Fuel*, 2021, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119168>
- [18] J. C. Umezuegbu, S. Okiy, C. C. Nwobi-Okoye, and ..., "Computational modeling and multi-objective optimization of engine performance of biodiesel made with castor oil," *Heliyon*. cell.com, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06516>
- [19] F. Zheng and H. M. Cho, "The Effect of Different Mixing Proportions and Different Operating Conditions of Biodiesel Blended Fuel on Emissions and Performance of Compression Ignition Engines," *Energies*, vol. 17, no. 2, 2024, doi: 10.3390/en17020344.
- [20] S. Naga Prasad, K. Vijaya, Kumar Reddy, B. S. P. Kumar, "Performance and emission characteristics of a diesel engine with castor oil," *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 2, no. 10, 2009, DOI:10.17485/ijst/2009/v2i10/30714
- [21] F. Zheng and H. Cho, "Combustion and Emission of Castor Biofuel Blends in a Single-Cylinder Diesel Engine," *Energies*, vol. 16, no. 14, 2023, doi: 10.3390/en16145427.