

The Influence of Fuel Injection Pressure on Engine Performance and Smoke Emissions in a Diesel Engine Using Palm Oil Biodiesel Blend Fuel.

Irlido Irwansyah^{1*}, Dori Yuvenda¹, Yolli Fernanda¹, Durain Parmanoan¹

¹Departement of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Negeri Padang, INDONESIA

Corresponding author: irlido.irwansyah9@gmail.com

Received June 6th 2026; Revised June 23th 2026; Accepted July 14th 2026

Abstract

This study was conducted to examine the effect of fuel injection pressure variations on diesel engine performance and Smoke Emissions in Yanmar TF105MR-DI diesel engines using B50 palm oil biodiesel mixture. The test was conducted at injection pressures of 210, 220, 230, and 240 kg/cm² with load variations of 1000, 2000, 3000, and 4000 W. Parameters observed included power, torque, Specific Fuel Consumption (SFC), thermal efficiency, and exhaust gas turbidity level as indicators of Smoke Emissions. The test results show that the change in injection pressure has an effect on the combustion process and the performance characteristics of the engine. An increase in injection pressure to 230 kg/cm² is able to improve the fuel atomization process so that the formation of the air-fuel mixture becomes more homogeneous. This results in higher power and torque than other pressure variations, along with a decrease in SFC values and increased thermal efficiency at all levels of load. However, when the injection pressure is increased to 240 kg/cm², the performance of the engine tends to decrease. This is suspected to be caused by the penetration of the fuel spray too far so that the mixing and combustion process does not take place optimally. In terms of emissions, a more optimal injection pressure also contributes to a reduction in the turbidity level of exhaust fumes. Based on the results obtained, an injection pressure of 230 kg/cm² is the most effective operating condition for the use of B50 fuel because it is able to provide the best balance between improved engine performance, fuel efficiency, and reduced Smoke Emissions.

Keywords: B50 Biodiesel, Injection Pressure, Diesel Engine Performance, SFC, Smoke Emissions.

Pengaruh Tekanan Injeksi Bahan Bakar terhadap Performa Mesin dan Emisi Asap pada Mesin Diesel yang Menggunakan Bahan Bakar Campuran Biodiesel Minyak Sawit.

Abstrak

Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh variasi tekanan injeksi bahan bakar terhadap kinerja mesin diesel serta emisi asap pada mesin diesel Yanmar TF105MR-DI yang menggunakan campuran biodiesel minyak kelapa sawit B50. Pengujian dilakukan pada tekanan injeksi 210, 220, 230, dan 240 kg/cm² dengan variasi beban sebesar 1000, 2000, 3000, dan 4000 W. Parameter yang diamati meliputi daya, torsi, konsumsi bahan bakar spesifik *Specific Fuel Consumption* (SFC), efisiensi termal, dan tingkat kekeruhan gas buang sebagai indikator emisi asap. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perubahan tekanan injeksi berpengaruh terhadap proses pembakaran dan karakteristik unjuk kerja mesin. Peningkatan tekanan injeksi hingga 230 kg/cm² mampu memperbaiki proses atomisasi bahan bakar sehingga pembentukan campuran udara-bahan bakar menjadi lebih homogen. Kondisi ini menghasilkan daya dan torsi yang lebih tinggi dibandingkan variasi tekanan lainnya, disertai penurunan nilai SFC dan peningkatan efisiensi termal pada seluruh tingkat pembebanan. Namun, ketika tekanan injeksi dinaikkan menjadi 240 kg/cm², kinerja mesin cenderung mengalami penurunan. Hal tersebut diduga disebabkan oleh penetrasi semprotan bahan bakar yang terlalu jauh sehingga proses pencampuran dan pembakaran tidak berlangsung secara optimal. Dari sisi emisi, tekanan injeksi yang lebih optimum juga berkontribusi terhadap penurunan tingkat kekeruhan asap buang. Berdasarkan hasil yang diperoleh, tekanan injeksi 230 kg/cm² merupakan kondisi operasi yang paling efektif untuk penggunaan bahan bakar B50 karena mampu memberikan keseimbangan terbaik antara peningkatan performa mesin, efisiensi penggunaan bahan bakar, dan pengurangan emisi asap.

Kata Kunci: *Bio Diesel B50*, Tekanan Injeksi, Performa Mesin Diesel, *SFC*, *Smoke Emissions*

I. PENDAHULUAN

Polusi udara terjadi ketika konsentrasi zat pencemar di atmosfer meningkat hingga melebihi batas yang dapat diterima lingkungan. Kondisi ini dapat menurunkan kualitas udara, merusak ekosistem, dan meningkatkan risiko gangguan kesehatan manusia. Beberapa polutan utama yang dihasilkan dari aktivitas manusia antara lain karbon monoksida (*CO*), nitrogen oksida (*NOx*), hidrokarbon, dan partikel halus.

Karbon monoksida merupakan salah satu polutan yang banyak mendapat perhatian karena bersifat tidak berwarna dan tidak berbau sehingga sulit dideteksi secara langsung. Gas ini terbentuk akibat proses pembakaran yang tidak sempurna. Meskipun karbon monoksida dapat berasal dari sumber alami seperti aktivitas vulkanik, kebakaran hutan, dan sambaran petir, sebagian besar emisinya berasal dari penggunaan bahan bakar fosil pada sektor transportasi, industri, dan pembangkit energi (Khalid et al., 2013; Onuh et al., 2018).

Emisi karbon menjadi salah satu permasalahan lingkungan yang semakin serius di Indonesia. Berdasarkan laporan (Shote et al., 2019; Yuvenda et al., 2019), emisi karbon nasional meningkat sekitar 140% selama periode 1990–2017. Peningkatan ini terutama dipengaruhi oleh tingginya penggunaan energi berbasis bahan bakar fosil, yang menyebabkan emisi karbon mencapai sekitar 581 MtCO₂ pada tahun 2019. Sektor industri menjadi penyumbang terbesar dengan kontribusi 37%, diikuti sektor transportasi serta pembangkitan listrik dan panas yang masing-masing menyumbang 27%. Tren tersebut menunjukkan bahwa upaya pengurangan emisi masih perlu ditingkatkan. Sesuai rekomendasi IPCC, emisi karbon Indonesia perlu ditekan hingga di bawah 662 MtCO₂ pada tahun 2030 dan kurang dari 51 MtCO₂ pada tahun 2050 untuk mendukung target pembatasan kenaikan suhu global sebesar 1,5°C (Ge et al., 2020; Musthafa et al., 2018).

Selain menyebabkan peningkatan emisi, ketergantungan yang tinggi terhadap bahan bakar fosil juga menimbulkan tantangan pada sektor energi. Ketersediaan sumber daya fosil yang terbatas serta fluktuasi harga energi dunia dapat memengaruhi ketahanan energi nasional. Hingga saat ini, bahan bakar minyak masih mendominasi bauran energi Indonesia sehingga perekonomian nasional menjadi rentan terhadap perubahan harga energi global. Dampak kondisi tersebut terlihat pada tahun 2021 ketika kenaikan harga energi internasional menyebabkan subsidi energi meningkat hingga Rp140,4 triliun atau sekitar 29% dibandingkan tahun sebelumnya. Oleh karena itu, pengembangan sumber energi alternatif menjadi langkah penting untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil sekaligus meningkatkan ketahanan energi nasional.

Berbagai permasalahan lingkungan dan energi tersebut mendorong pengembangan bahan bakar alternatif yang lebih berkelanjutan. Salah satu sumber energi terbarukan yang banyak dikembangkan adalah biodiesel (Chattha et al., 2011; Hawi et al., 2019; Kim et al., 2019). Biodiesel dapat diproduksi dari berbagai bahan baku biomassa, termasuk minyak kelapa sawit yang memiliki potensi besar di Indonesia karena ketersediaannya yang melimpah. Selain berasal dari minyak sawit, biodiesel juga dapat diproduksi dari limbah cair industri kelapa sawit atau *Palm Oil Mill Effluent* (POME). Limbah ini masih mengandung asam lemak dan minyak yang dapat dikonversi menjadi *Fatty Acid Methyl Ester* (FAME) melalui proses transesterifikasi untuk digunakan sebagai bahan bakar biodiesel. Pemanfaatan POME sebagai bahan baku biodiesel tidak hanya meningkatkan nilai tambah limbah, tetapi juga mendukung pengurangan dampak lingkungan dari industri kelapa sawit. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa biodiesel berbasis POME memiliki prospek yang baik sebagai bahan bakar mesin diesel. Penelitian (Chattha et al., 2011) melaporkan bahwa penggunaan biodiesel POME mampu memperbaiki karakteristik operasi mesin serta menurunkan emisi karbon monoksida dan asap hitam. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Serin dan Akar (2014), yang menunjukkan bahwa biodiesel berbasis POME berpotensi meningkatkan performa mesin dan menghasilkan emisi CO serta CO₂ yang lebih rendah dibandingkan bahan bakar diesel konvensional.

Potensi biodiesel kelapa sawit sebagai bahan bakar alternatif yang lebih ramah lingkungan telah dibuktikan dalam berbagai penelitian. (Mohammed et al., 2023; Yoon & Lee, 2011) melaporkan bahwa peningkatan persentase biodiesel dalam campuran bahan bakar dapat menurunkan emisi karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC), *particulate matter* (PM), dan karbon dioksida (CO₂). Hasil tersebut menunjukkan bahwa biodiesel tidak hanya berperan sebagai sumber energi terbarukan, tetapi juga berpotensi mengurangi dampak lingkungan yang dihasilkan oleh mesin diesel. Meskipun demikian, penggunaan biodiesel masih menghadapi beberapa kendala teknis. Biodiesel memiliki nilai kalor yang lebih rendah dibandingkan solar sehingga energi yang dihasilkan selama proses pembakaran menjadi lebih kecil. Selain itu, viskositas biodiesel yang lebih tinggi dapat menyebabkan proses atomisasi bahan bakar kurang optimal (Mokhtar et al., 2018). Kondisi ini berpengaruh terhadap penurunan performa mesin dan peningkatan konsumsi bahan bakar. (Putranto et al., 2023) melaporkan bahwa penggunaan B35 dapat menurunkan daya mesin hingga 4,7% dibandingkan solar murni, sedangkan, (Topayung et al., 2024) menemukan bahwa konsumsi bahan bakar pada penggunaan B30 meningkat sekitar 6%.

Salah satu upaya yang banyak dilakukan untuk mengatasi keterbatasan biodiesel adalah optimasi sistem injeksi bahan bakar. Peningkatan tekanan injeksi dapat menghasilkan droplet bahan bakar yang lebih kecil sehingga proses atomisasi dan pencampuran bahan bakar dengan udara menjadi lebih baik. Beberapa penelitian telah menunjukkan pengaruh positif tekanan injeksi terhadap kinerja mesin berbahan bakar biodiesel. (Mekhilef et al., 2011; Bhurat et al., 2019) melaporkan bahwa peningkatan tekanan injeksi mampu memperbaiki karakteristik pembakaran dan meningkatkan performa mesin diesel. Temuan serupa juga dilaporkan oleh (Hawi et al., 2019) yang menunjukkan adanya peningkatan daya mesin seiring kenaikan tekanan injeksi. Penelitian (Ndayishimiye et al., 2011; Tutunea et al., 2016) menunjukkan bahwa peningkatan tekanan injeksi hingga 230 kg/cm² pada mesin diesel berbahan bakar biodiesel mampu meningkatkan efisiensi termal sebesar 16,77%, meningkatkan rasio udara-bahan bakar sebesar 13,31%, serta menurunkan BSFC sebesar 14,01%. Selain itu, tingkat kepekatan asap (*smoke opacity*) juga menurun hingga 46,39%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan tekanan injeksi dapat memperbaiki proses pembakaran sekaligus mengurangi emisi gas buang.

Berdasarkan berbagai penelitian yang telah dilakukan, biodiesel kelapa sawit memiliki potensi sebagai bahan bakar alternatif yang dapat mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil sekaligus

menekan emisi gas buang. Namun, penggunaan biodiesel masih menghadapi kendala berupa penurunan performa mesin dan peningkatan konsumsi bahan bakar. Salah satu metode yang berpotensi mengatasi permasalahan tersebut adalah optimasi tekanan injeksi bahan bakar. Meskipun pengaruh tekanan injeksi terhadap performa dan emisi mesin diesel telah banyak diteliti, kajian mengenai penggunaannya pada campuran biodiesel minyak kelapa sawit dengan variasi tekanan injeksi yang berbeda masih perlu dikembangkan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi tekanan injeksi terhadap daya, torsi, konsumsi bahan bakar spesifik, efisiensi termal, dan emisi asap (*Smoke Emissions*) pada mesin diesel berbahan bakar campuran biodiesel minyak kelapa sawit.

II. METODE PENELITIAN

A. Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah generator set yang menggunakan mesin diesel Yanmar TF 105 MR-DI. Penelitian dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh kondisi operasi terhadap performa mesin yang meliputi daya, torsi, *Brake Mean Effective Pressure* (BMEP), dan efisiensi termal, serta karakteristik emisi gas buang yang dihasilkan.

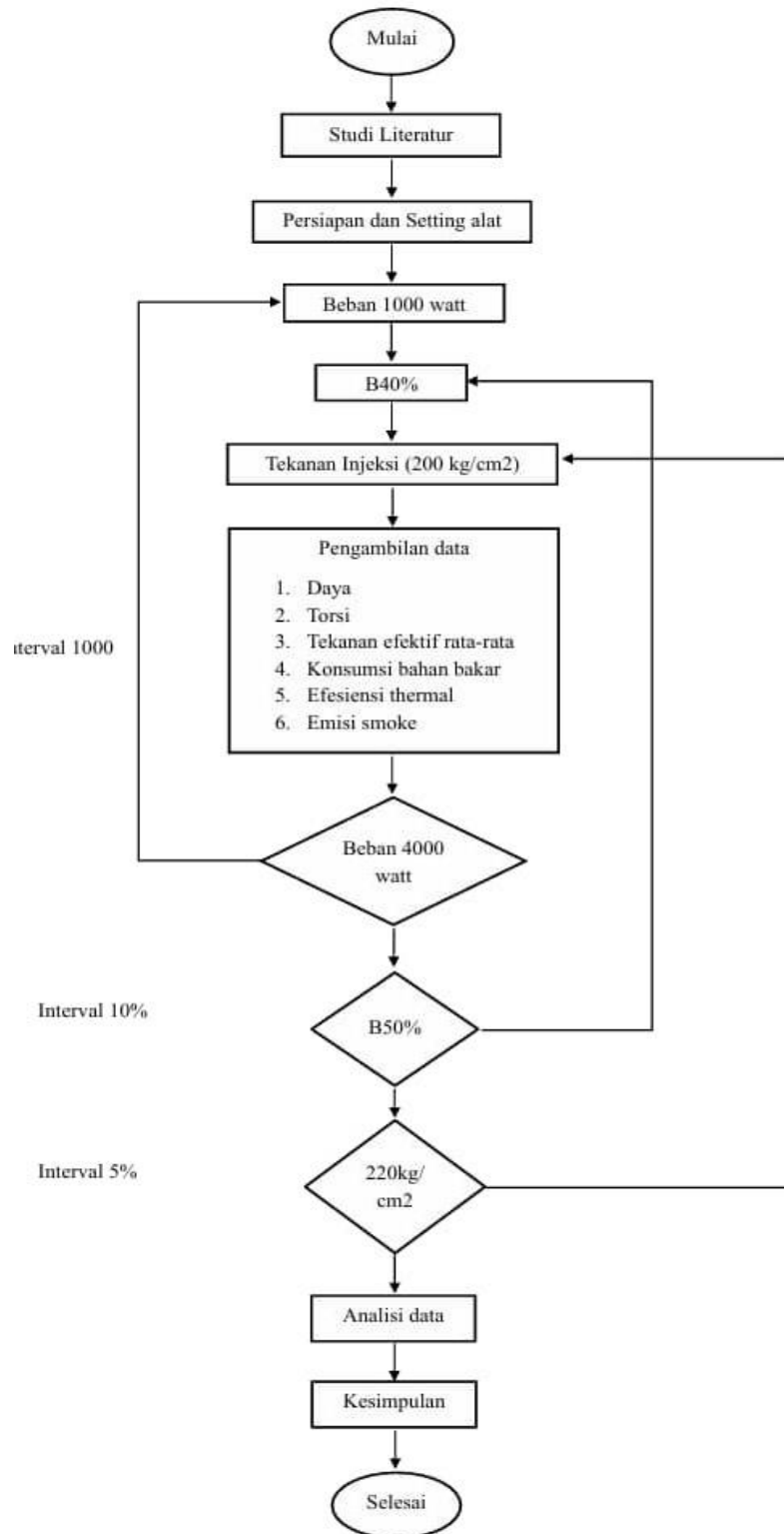
B. Jenis Penelitian

Jenis penelitian yang dilakukan adalah penelitian kuantitatif dengan metode eksperimen. Pengujian dilakukan pada generator set yang menggunakan mesin diesel Yanmar TF 105 MR-DI dengan bahan bakar campuran biodiesel kelapa sawit B40 dan B50. Variabel yang diteliti adalah tekanan injeksi bahan bakar yang divariasikan dari kondisi standar 210 kg/cm² hingga 240 kg/cm² untuk menganalisis pengaruhnya terhadap performa mesin dan emisi gas buang.

C. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Januari sampai dengan Juni 2025. Lokasi penelitian di laboratorium pengujian kendaraan Departemen Teknik Otomotif Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang.

D. Diagram Penelitian



Gambar 1. *Flowchart* penelitian

E. Tahapan Pengambilan Data

Adapun tahapan untuk langkah-langkah penggunaan uji injektor tester diesel yaitu:

1. Lepaskan injektor *nozzle* dari mesin diesel.
2. Pasang ke *nozzle* tester, pastikan tanki alat penuh solar.
3. *Bleed* (buang udara): pompa ringan hingga solar keluar dari sambungan pipa untuk memastikan saluran bebas udara
4. Setelah proses *bleed*, kencangkan baut pengikat.

5. Pompa dengan tuas hingga indikator menunjukkan tekanan buka.
Jika tidak sesuai, lakukan penyetelan:
 - a. Beberapa injektor pakai penyetel baut tekanan.
 - b. Umumnya dengan menambah/kurangi shim pada pegas: $\sim 0,05 \text{ mm shim} \approx 5 \text{ bar tekanan}$
 6. Setelah tekanan sesuai bleed kembali jika diperlukan.
 7. Pompa pompa tuas secara berlanjutan (10-30 kali) dengan interval 1 detik pertekanan.
 8. Periksa semprotan: kebutan halus & merata.
 9. Pompa hingga tekanan $10\text{--}20 \text{ kg/cm}^2$ di bawah standar buka
 10. Tahan tekanan selama sekitar 10 detik
 11. Periksa tetesan di ujung nosel atau sambungan.
 12. Lepaskan injektor bawaan dan jepit di ragum dengan bantalan aluminium
 13. Buka mur pemegang, rod penggerak, pegas, jarum, shim dll
 14. Bersihkan seluruh komponen dengan solar. Tes kelancaran luncur jarum (harus pelan dan tertutup rapat)
 15. Atur shim sesuai kebutuhan tekanan, tiap $0,05 \text{ mm shim} \approx 5 \text{ bar}$
 16. Rakit ulang, ulangi tes tekanan, pola, dan kebocoran.
- Pasang → Bleed → Uji tekanan → Lihat pola semprotan → Tes kebocoran → Sesuaikan jika perlu → Ulangi sampai semua hasil sesuai spesifikasi.



Gambar 2. Alat Uji Injektor Tester Diesel

Parameter yang digunakan pada kerja mesin terdiri dari pengukuran daya, torsi, penggunaan bahan bakar efisiensi thermal dan daya tekanan efektif rata rata injector dan emisi gas buang. Yang dilakukan di laboratorium pengujian kendaraan departemen Teknik otomotif fakultas Teknik universitas negeri padang.

1. Melakukan pencampuran bahan bakar terlebih dahulu sebelum melakukan pengambilan data.
2. Menghubungkan slang dari stand bured ke pembakaran mesin diesel.
3. Mengganti ukuran tekanan pada injector
4. Hidupkan mesin dengan dengan memutar poros engkol dengan bahan bakar awal biodiesel 50 ml dan panaskan mesin hingga mesin panas sampai bahan bakar habis lalu melakukan pengambilan data
5. Hidupkan lampu pada beban 1000,2000,3000 dan 4000watt lalu atur rpm pada 2000rpm
6. Hitung waktu konsumsi bahan bakar per 50ml dengan stopwatch sekaligus menghitung emisi dengan alat smoke tester.

7. Catat voltase yang ada pada parameter pada genset
8. Lalu catat amper meter yang ditunjukkan pada parameter
9. Mengganti tekanan pada injector
10. Lakukan hal yang sama pada tekanan dan *nozzle* injektor

F. Alat dan Bahan

alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mesin Generator Set (Yanmar TF105MR-di)

Mesin ini adalah mesin serbaguna yang dapat diandalkan dan dilengkapi dengan fitur yang membuatnya mudah digunakan dan dioperasikan. Mesin tersebut akan digunakan dalam penelitian saat ini.



Gambar 3. Mesin Generator Yanmar TF 105MR-di

Tabel 1. Spesifikasi Yanmar TF105MR-di

<i>Machine Type</i>	<i>Water-cooled 4 (four) stroke horizontal diesel motor</i>
<i>Combustion System</i>	<i>direct injection</i>
<i>Number of Cylinders</i>	<i>1 silinder</i>
<i>When Fogging</i>	<i>170 before TMA</i>
<i>Diameter x Step Length</i>	88 mm x 96 mm
<i>Volume Silinder</i>	583 cc
<i>Continuous Power</i>	9.5 s / 2400 rpm
<i>Maximum Power Per Second</i>	10.5 s / 2400 rpm
<i>Torsi Maximum</i>	4.23 kgm / 1600 rpm
<i>Compression Comparison</i>	17.9
<i>Shaft Rotation</i>	<i>Counter-Clockwise</i>
<i>Fuel Consumption</i>	186 g/h
<i>Fuel Pump</i>	<i>Bosch Type</i>
<i>Injector Pressure</i>	200 kg/cm ²
<i>Fuel Tank Capacity</i>	11 L
<i>Lubricating Oil Capacity</i>	2.8 L
<i>Types of Lubricating Oils</i>	<i>SAE 40 CC or CD class</i>
<i>Cooling Tank Capacity</i>	2.3 L
<i>Machine Dimensions (P x L x T)</i>	695 mm x 348.5 mm x 530 mm
<i>Lamp</i>	5000 watt
<i>Empty weight</i>	106 Kg
<i>Packaging Size (P x L x T)</i>	910 mm x 500 mm x 810 mm
<i>Gross Weight</i>	151 Kg

2. Generator

Generator merupakan mesin yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi Listrik.



Gambar 4. Generator

Tabel 2. Tipe generator

Type ST -5	NO
P 5 kW	Cos φ 1.0
220 V	EXCIT.VOLT.49V
22.7 A	EXCIT.CURR 2.6 A
50H	RAT.S1
1000 r/min	Kg
INS.CLB IP 21	DATE 2008.7
STANDAR	JB/T3320.2-2000

3. Lampu

Dalam eksperimen ini menggunakan lampu 500 watt sebagai media uji pada mesin genset.

4. Smoke Tester

Smoke tester adalah alat uji coba yang digunakan untuk mengukur emisi pada asap mesin genset yang digunakan.

5. Gelas Ukur

Gelas ukur berguna untuk mengukur volume bahan bakar yang akan di campurkan. Gelas ukur yang digunakan berukuran 50 ml.

6. Stopwatch

Stopwatch berguna untuk menguji daya dan konsumsi bahan bakar.

7. Rpm Tester

Alat tachometer yang berguna untuk mengukur kecepatan rotasi pada poros generator berfungsi mendeteksi Gerakan mekanis dan menerjemahkan menjadi numerik atau visual.

8. Dexlite

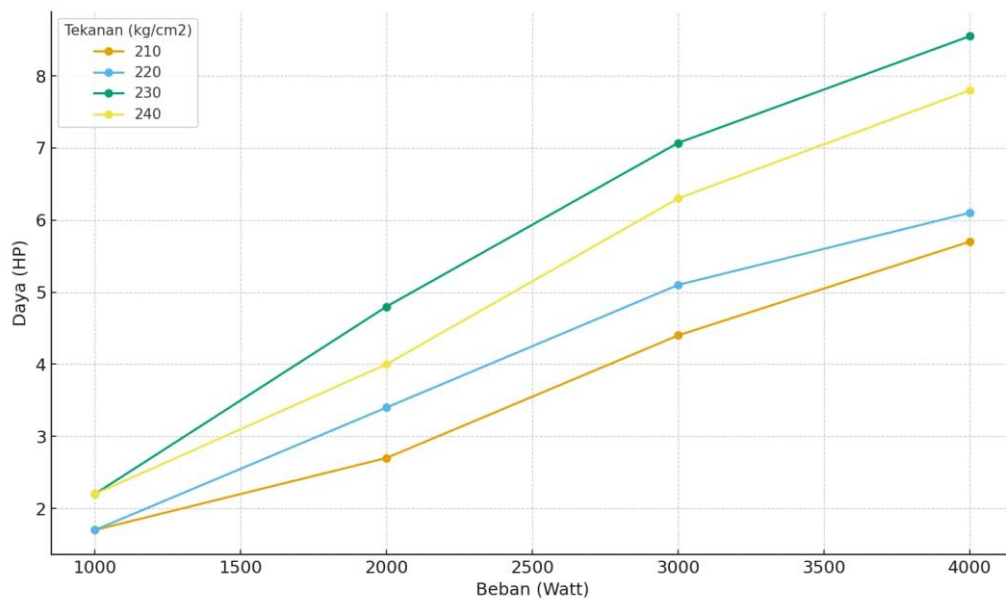
Dexlite adalah bahan bakar diesel mempunyai angka cetane minimal 21 dan mengandung sulfur maksimal 1200 ppm.

9. Bahan Bakar Biodiesel Minyak Kelapa Sawit

Bahan bakar ini merupakan bahan bakar yang terbuat dari minyak kelapa sawit.

III. HASIL PENELITIAN

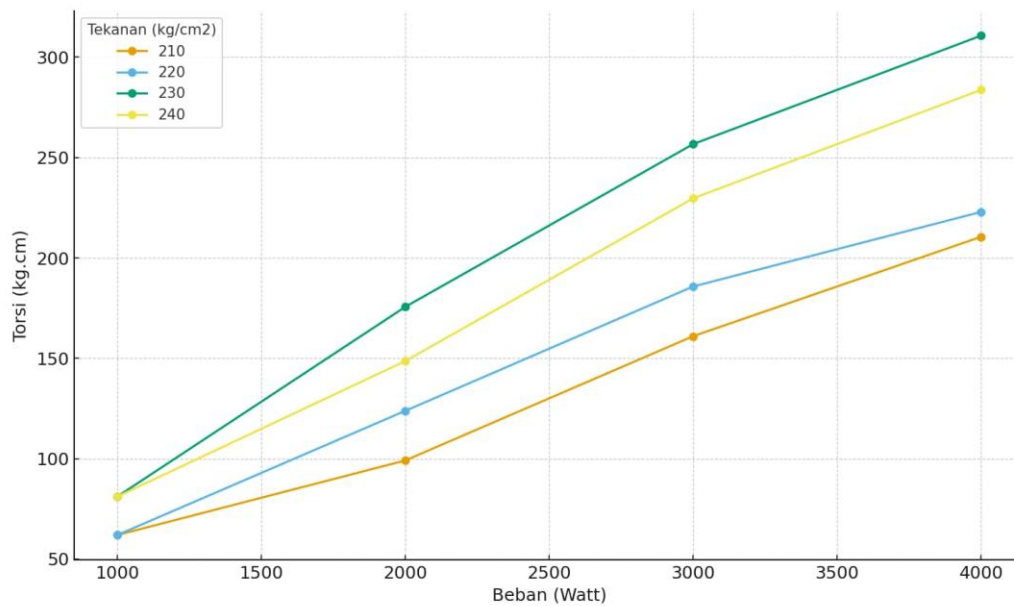
A. Pembahasan Hasil dari Penelitian



Gambar 5. Daya vs Beban watt

Grafik hubungan antara beban dan daya menunjukkan bahwa kenaikan tekanan injeksi dari 210 kg/cm² hingga 230 kg/cm² memberikan peningkatan daya pada setiap variasi beban yang diuji. Peningkatan tersebut berkaitan dengan membaiknya proses atomisasi bahan bakar pada tekanan injeksi yang lebih tinggi, sehingga bahan bakar dapat terdispersi menjadi partikel yang lebih halus dan bercampur lebih homogen dengan udara. Kondisi ini mendorong terjadinya proses pembakaran yang lebih efektif dan menghasilkan energi yang lebih besar. Di antara seluruh variasi tekanan injeksi, tekanan 230 kg/cm² menghasilkan daya tertinggi, khususnya pada beban 4000 W, yang mengindikasikan bahwa proses pembakaran berlangsung lebih optimal dibandingkan kondisi lainnya.

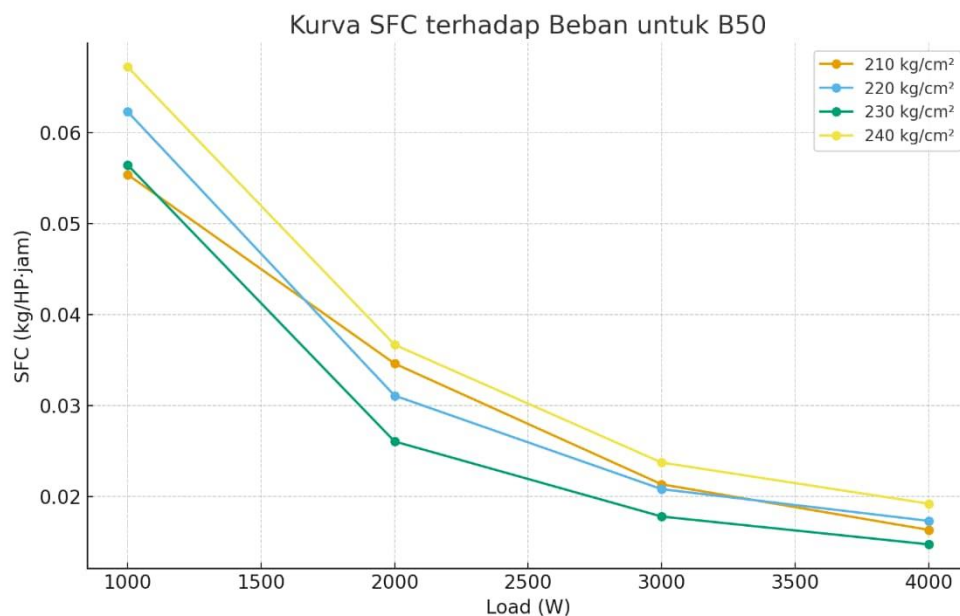
Secara umum, peningkatan tekanan injeksi dari 210 kg/cm² hingga 230 kg/cm² memperlihatkan tren kenaikan daya pada seluruh tingkat pembebanan. Fenomena ini disebabkan oleh semakin baiknya kualitas semprotan bahan bakar yang dihasilkan, sehingga proses pencampuran antara bahan bakar dan udara menjadi lebih efisien. Akibatnya, pembakaran berlangsung lebih sempurna dan mampu meningkatkan keluaran daya mesin. Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan (Singh et al., 2026), yang melaporkan bahwa peningkatan tekanan injeksi mampu memperbaiki karakteristik spray, memperkecil ukuran droplet bahan bakar, serta meningkatkan efisiensi pembakaran pada mesin diesel yang menggunakan bahan bakar biodiesel.



Gambar 6. Torsi

Pola peningkatan torsi pada tekanan injeksi tinggi (terutama 230 kg/cm²) menunjukkan bahwa torsi sangat dipengaruhi oleh efisiensi pembakaran dan tekanan efektif rata-rata. Atomisasi yang lebih baik menghasilkan kecepatan pembakaran yang lebih tinggi sehingga tekanan gas pada langkah usaha meningkat.

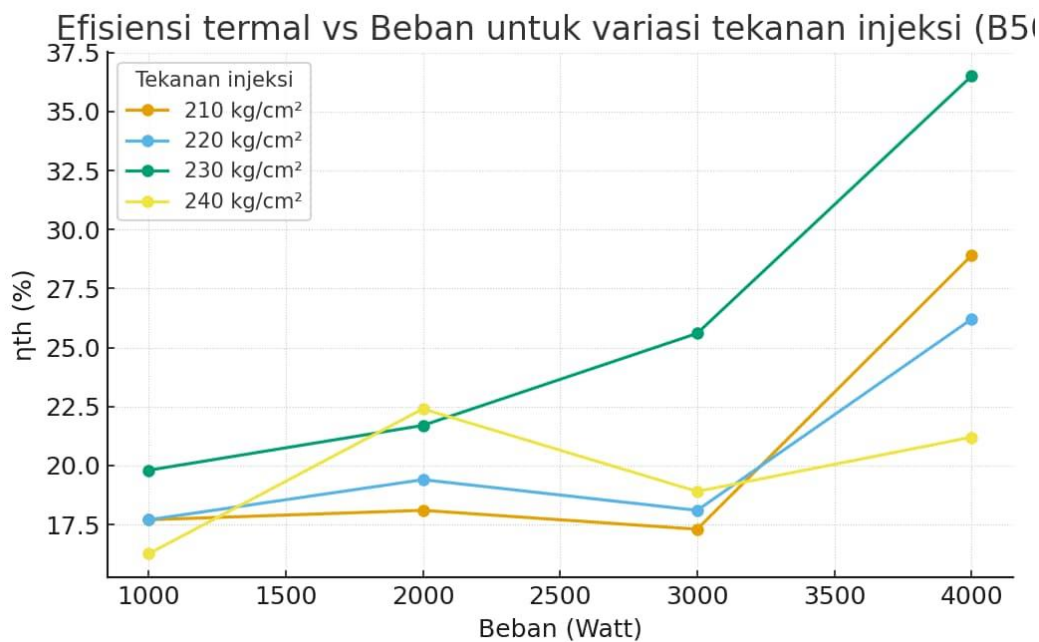
Penelitian (Ochoa et al., 2020) melaporkan bahwa peningkatan tekanan injeksi biodiesel dari 200 menjadi 240 bar meningkatkan puncak tekanan silinder dan menghasilkan peningkatan torsi yang signifikan. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa tekanan injeksi yang lebih tinggi memperbaiki penyebaran spray dan meningkatkan energi dorong piston.



Gambar 7. *Specific Fuel Consumption (SFC) Fungsi Beban*

Berdasarkan grafik SFC pada Gambar kurva di atas, terlihat bahwa nilai *Specific Fuel Consumption* cenderung menurun seiring peningkatan beban dari 1000 sampai 4000 W pada seluruh variasi tekanan injeksi. Pola ini menunjukkan bahwa pada beban tinggi, sebagian besar energi pembakaran biodiesel B50 dimanfaatkan menjadi daya poros secara lebih efektif, sehingga kebutuhan bahan bakar per satuan daya menurun. Tekanan injeksi 230 kg/cm² memperlihatkan nilai SFC terendah dibandingkan tekanan lainnya pada setiap level beban, sehingga dapat diinterpretasikan bahwa atomisasi, evaporasi, dan pembakaran

berada pada kondisi yang paling seimbang pada tekanan tersebut. Hal ini konsisten dengan laporan bahwa peningkatan tekanan injeksi hingga zona “optimum atomization window” dapat menurunkan SFC biodiesel karena *spray cone angle* dan *Sauter mean diameter* menjadi lebih ideal terhadap kemajuan front pembakaran di ruang bakar diesel langsung. Temuan ini sejalan dengan kesimpulan literatur bahwa peningkatan tekanan injeksi dalam rentang moderat memperbaiki homogenitas campuran dan meningkatkan efisiensi konversi energi, sehingga menurunkan *Brake Specific Fuel Consumption* (Mejiá et al., 2020). Fenomena penurunan SFC pada beban tinggi juga sesuai dengan konsep dasar efisiensi pembakaran mesin diesel, dimana proporsi *heat losses* terhadap *useful work* pada beban rendah lebih besar, dan sebaliknya ketika beban meningkat, fraksi energi yang berubah menjadi kerja mekanik ikut meningkat sehingga SFC membaik. Dengan demikian, berdasarkan pola kurva eksperimen B50 ini, tekanan injeksi 230 kg/cm² merupakan kondisi paling efisien untuk menekan SFC pada konfigurasi mesin dan bahan bakar yang diuji.



Gambar 8 Efisiensi Thermal

Efisiensi termal menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan peningkatan tekanan injeksi hingga 230 kg/cm². Pada tekanan injeksi ini, efisiensi termal tertinggi dicapai sebesar sekitar 37%, yang menunjukkan kemampuan mesin dalam mengubah energi panas dari bahan bakar menjadi energi mekanik secara lebih efektif. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya efisiensi pembakaran dan penurunan kerugian panas akibat pembakaran tidak sempurna. Namun, pada tekanan injeksi yang terlalu tinggi seperti 240 kg/cm², efisiensi termal cenderung menurun kembali, kemungkinan karena penetrasi semprotan bahan bakar yang terlalu dalam sehingga menyebabkan pendinginan lokal dan ketidaksempurnaan pembakaran. Fenomena ini didukung oleh temuan (Altaie, 2020; Vergel et al., 2021) yang menunjukkan bahwa efisiensi termal biodiesel meningkat pada tekanan injeksi optimum dan menurun ketika tekanan terlalu tinggi akibat degradasi kualitas pembakaran.

IV. PEMBAHASAN

Studi ini menginvestigasi pengaruh variasi tekanan injeksi bahan bakar terhadap performa dan emisi asap pada mesin diesel yang dioperasikan menggunakan campuran biodiesel minyak kelapa sawit. Metode yang digunakan adalah eksperimen, dengan menerapkan beberapa tingkat tekanan injeksi selama pengoperasian mesin. Evaluasi dilakukan terhadap parameter kinerja mesin, termasuk daya, torsi, konsumsi bahan bakar spesifik, dan efisiensi termal. Di samping itu, pengujian emisi asap dilakukan untuk mengkaji perubahan karakteristik emisi gas buang akibat perbedaan tekanan injeksi yang diterapkan. Pembahasan hasil penelitian dikaitkan dengan teori proses pembakaran dan karakteristik injeksi bahan bakar yang relevan. Validasi dilakukan dengan membandingkan tren perubahan performa dan emisi dengan temuan penelitian sebelumnya sehingga menghasilkan analisis yang komprehensif. Pada Tabel 3. Disajikan hasil penelitian yang peneliti lakukan.

Tabel 3. Data Hasil Eksperimen

Bahan Bakar	Beban Watt	Tekanan Injeksi (kg/cm ²)	Pelec (W)	Daya (HP)	Torsi (kg/cm)	SFC (kg/HP/jam)	η_{th} (%)
B50	1000	210	1100	1.7	61.92	0.05537	17.7
		220	1100	1.7	61.92	0.06229	17.7
		230	1440	2.2	81.06	0.05644	19.8
		240	1440	2.2	81.06	0.06721	16.26
	2000	210	1760	2.7	99.08	0.03459	18.1
		220	2200	3.4	123.8	0.03107	19.4
		230	3120	4.8	175.6	0.02603	21.7
		240	2640	4.0	148.6	0.03666	22.4
	3000	210	2860	4.4	161.008	0.02132	17.3
		220	3300	5.1	185.77	0.02079	18.1
		230	4560	7.07	256.71	0.01778	25.6
		240	4080	6.3	229.68	0.02371	18.9
	4000	210	3740	5.7	210.54	0.01631	28.9
		220	3960	6.1	222.93	0.0173	26.2
		230	5520	8.55	310.75	0.01472	36.5
		240	5040	7.8	283.73	0.01919	21.2

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian performa mesin diesel Yanmar TF105MR-di menggunakan bahan bakar B50 dengan variasi tekanan injeksi 210–240 kg/cm², maka penelitian ini berhasil menjawab tujuan penelitian, yaitu mengetahui pengaruh tekanan injeksi terhadap performa mesin dan parameter konsumsi bahan bakar.:

1. Variasi tekanan injeksi terbukti memberikan pengaruh signifikan terhadap daya dan torsi. Tekanan injeksi 230 kg/cm² menghasilkan performa terbaik pada seluruh rentang beban, ditunjukkan oleh daya maksimum 8.55 HP dan torsi tertinggi 310.75 kg·cm pada beban 4000 W. Hal ini membuktikan bahwa tekanan injeksi optimal mampu meningkatkan kualitas atomisasi sehingga pembakaran lebih sempurna dan efisiensi konversi energi meningkat.
2. Nilai SFC menurun seiring kenaikan beban dan mencapai nilai terendah pada tekanan injeksi 230 kg/cm², yaitu 0.01472 kg/HP·jam. Hal ini menunjukkan bahwa tekanan injeksi 230 kg/cm² memberikan kombinasi terbaik antara suplai bahan bakar dan pembakaran sehingga energi per satuan bahan bakar dimanfaatkan paling efisien.
3. Waktu habisnya volume tetap (50 ml) semakin cepat pada beban tinggi, menunjukkan pemanfaatan energi yang lebih efektif. Nilai tercepat diperoleh pada tekanan 240 kg/cm² (1020 s), tetapi peningkatan debit bahan bakar ini tidak diikuti peningkatan performa atau efisiensi, sehingga tidak dapat dianggap sebagai kondisi optimum.
4. Berdasarkan keseluruhan parameter performa mekanik (daya, torsi), parameter energi (SFC, efisiensi termal), dan karakter konsumsi bahan bakar, tekanan injeksi 230 kg/cm² adalah kondisi paling optimum untuk operasi mesin diesel berbahan bakar B50 pada penelitian ini. Tekanan 240 kg/cm² meningkatkan aliran bahan bakar namun tidak meningkatkan efisiensi atau performa, sehingga tidak direkomendasikan sebagai kondisi optimum

VI. REFERENCE

- Altaie, M. A. H. (2020). Performance and emission analysis of enriched biodiesel and its combined blends with petrodiesel. *Biofuels*, 11(3), 251–260. <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1358949>
- Chattha, J. A., Bannikov, M. G., & Iqbal, S. (2011). The Performance and Emissions of a Direct Injection Diesel Engine Fueled with Pongamia Pinnata Methyl Esters. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 33(9), 890–897. <https://doi.org/10.1080/15567030903330777>
- Ge, J. C., Kim, H. Y., Yoon, S. K., & Choi, N. J. (2020). Optimization of palm oil biodiesel blends and engine operating parameters to improve performance and PM morphology in a common rail direct injection diesel engine. *Fuel*, 260. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116326>
- Hawi, M., Kosaka, H., Sato, S., Nagasawa, T., Elwardany, A., & Ahmed, M. (2019). Effect of injection pressure and ambient density on spray characteristics of diesel and biodiesel surrogate fuels. *Fuel*, 254, 115674. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115674>
- Heywood, J. B. . (1988). *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill Book Company.
- Khalid, A., Osman, S. A., Jaat, M. N. M., Mustaffa, N., Basharie, S. M., & Manshoor, B. (2013). Performance and emissions characteristics of diesel engine fuelled by biodiesel derived from palm

- oil. *Applied Mechanics and Materials*, 315, 517–522.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.315.517>
- Kim, H. Y., Ge, J. C., & Choi, N. J. (2019). Effects of Fuel Injection Pressure on Combustion and Emission Characteristics under Low Speed Conditions in a Diesel Engine Fueled with Palm Oil Biodiesel. *Energies*, 12(17), 3264. <https://doi.org/10.3390/en12173264>
- Mejiá, A., Leiva, M., Rincón-Montenegro, A., Gonzalez-Quiroga, A., & Duarte-Forero, J. (2020). Experimental assessment of emissions maps of a single-cylinder compression ignition engine powered by diesel and palm oil biodiesel-diesel fuel blends. *Case Studies in Thermal Engineering*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100613>
- Mekhilef, S., Siga, S., & Saidur, R. (2011). A review on palm oil biodiesel as a source of renewable fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1937–1949. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.12.012>
- Mohammed, A. S., Atnaw, S. M., Ramaya, A. V., & Alemayehu, G. (2023). A comprehensive review on the effect of ethers, antioxidants, and cetane improver additives on biodiesel-diesel blend in CI engine performance and emission characteristics. *Journal of the Energy Institute*, 108, 101227. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101227>
- Musthafa, M. M., Kumar, T. A., Mohanraj, T., & Chandramouli, R. (2018). A comparative study on performance, combustion and emission characteristics of diesel engine fuelled by biodiesel blends with and without an additive. *Fuel*, 225, 343–348. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.147>
- Ndayishimiye, P., & Tazerout, M. (2011). Use of palm oil-based biofuel in the internal combustion engines: Performance and emissions characteristics. *Energy*, 36(3), 1790–1796. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.046>
- Ochoa, G. V., Peñaloza, C. A., & Forero, J. D. (2020). Combustion and performance study of low-displacement compression ignition engines operating with diesel-biodiesel blends. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/app10030907>
- Onuh, E. I., & Inambao, F. L. (2018). An evaluation of neat biodiesel/diesel performance, emission pattern of NO_x and CO in compression ignition engine. In *Int. J. Global Warming* (Vol. 14, Number 1).
- Putranto, W. A., Khaeroman, K., Susanto, S., & Suharso, A. R. (2023). Simulasi dan Eksperimen Pengaruh Variasi Tekanan Injeksi Bahan Bakar Diesel Liquid pada Mesin Induk Kapal Terhadap Karakteristik Semprotan Injektor. *Jurnal Ilmiah Momentum*, 19(1), 1. <https://doi.org/10.36499/jim.v19i1.8296>
- Shote, A. S., Betiku, E., & Asere, A. A. (2019). Characteristics of CO and NO_x emissions from combustion of transmethylated palm kernel oil-based biodiesel blends in a compression ignition engine. In *Journal of King Saud University - Engineering Sciences* (Vol. 31, Number 2, pp. 178–183). King Saud University. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2018.02.005>
- Singh, B., Gupta, A., & Kumar Behera, D. (2026). Fueling the future: Graphene-enhanced waste cooking oil biodiesel for reduced exhaust emission in diesel engines. *Next Energy*, 12, 100685. <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2026.100685>
- Sureshchandra Bhurat, S., Pandey, S., Chintala, V., Ranjit, S., & Bhurat, S. S. (2019). ScienceDirect Experimental study on performance and emissions characteristics of single cylinder diesel engine with ethanol and biodiesel blended fuels with diesel. In *Materials Today: Proceedings* (Vol. 17). www.sciencedirect.com

- Topayung, C. Y., Nuryadin, S., & Sentanuhady, J. (2024). Karakteristik dan Temperatur Nyala Api Pembakaran Biodiesel Berdasarkan Kadar Fatty Acid Methyl Esters. *Journal of Mechanical Design and Testing*, 6(1), 47. <https://doi.org/10.22146/jmdt.95190>
- Tutunea, D., Bica, M., Dumitru, I., & Dima, A. (2016). Study of Emission of a Mono Cylindrical Diesel Engine Fueled with Biodiesel of Palm Oil. *Applied Mechanics and Materials*, 823, 297–302. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.823.297>
- Vergel-Ortega, M., Valencia-Ochoa, G., & Duarte-Forero, J. (2021). Experimental study of emissions in single-cylinder diesel engine operating with diesel-biodiesel blends of palm oil-sunflower oil and ethanol. *Case Studies in Thermal Engineering*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101190>
- Yoon, S. H., & Lee, C. S. (2011). Effect of biofuels combustion on the nanoparticle and emission characteristics of a common-rail DI diesel engine. *Fuel*, 90(10), 3071–3077. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.007>
- Yuvenda, D., Sudarmanta, B., Putra, R. P., Martias, M., & Alwi, E. (2019). Pengaruh Tekanan Injeksi Gas Terhadap Konsumsi Bahan Bakar dan Efisiensi Termal pada Mesin Diesel Dual Fuel. *INVOTEK: Jurnal Inovasi Vokasional Dan Teknologi*, 19(1), 35–42. <https://doi.org/10.24036/invotek.v19i1.349>