

## Pengaruh Campuran Bahan Bakar Pirolisis, Aditif Etanol-Pentanol, dan Variasi Tekanan Injeksi terhadap Kinerja Mesin Diesel

Farid Majedi<sup>1</sup>, Novi Indah Riani<sup>2\*</sup>, Ismail Kholid<sup>3</sup>, Kholis Nur Faizin<sup>4</sup>, Bagas Fajar Prayoga<sup>5</sup>

Email corresponding author: noviindahriani@pnm.ac.id

<sup>1,2,3,4,5</sup>Automotive Engineering Technology Study Program, Department of Engineering, Politeknik Negeri Madiun, Madiun 63133, East Java, Indonesia

Article history: Received: 19 Agustus 2026 | Revised: 28 September 2026 | Accepted: 1 Oktober 2026

**Abstract.** Diesel engines have high thermal efficiency and produce substantial torque, making them widely used across various sectors. However, dependence on fossil fuels and increasing exhaust emissions have driven the need for the development of more environmentally friendly alternative fuels. One of the solutions being developed is the utilization of pyrolysis oil derived from plastic waste as an alternative fuel. Nevertheless, the use of pyrolysis oil still has limitations in combustion quality, thereby requiring the addition of additives. This study was conducted experimentally using a single-cylinder diesel engine operated at a constant speed of 1500 rpm under load variations of 1000, 1500, 2000, 2500 and 3000 W. The tested fuels included solar diesel fuel, a P20 blend (20% plastic waste pyrolysis oil and 80% diesel fuel), and P20 blends supplemented with ethanol and pentanol at specified proportions. The performance parameters evaluated were brake power, torque, Brake Thermal Efficiency (BTE), Specific Fuel Consumption (SFC), and smoke opacity. The research findings showed that increasing the injection pressure from 180 to 210 bar improved engine performance and reduced emissions across all fuel blends. Diesel at 210 bar achieved the highest power (3.70 kW), torque (23.55 N·m), BTE (22.53%), and lowest SFC (0.38 kg/kWh). Among the pyrolysis oil blends, P20E10Pn10 at 210 bar demonstrated the best performance, with 3.60 kW power, 22.93 N·m torque, 21.67% BTE, and 0.39 kg/kWh SFC, while producing the lowest smoke opacity (3.50–18.67%). Thus, P20E10Pn10 at 210 bar was identified as the optimum condition, providing a favorable balance between engine performance and emission reduction.

**Keywords -** Pyrolysis Oil; Ethanol and Pentanol Additives; Injection Pressure; Engine Performance; Diesel Engine.

**Abstrak.** Mesin diesel memiliki efisiensi termal yang tinggi dan menghasilkan torsi yang besar sehingga banyak digunakan dalam berbagai sektor. Namun, ketergantungan terhadap bahan bakar fosil dan peningkatan emisi gas buang mendorong perlunya pengembangan bahan bakar alternatif yang lebih ramah lingkungan. Salah satu solusi yang sedang dikembangkan adalah pemanfaatan minyak pirolisis yang berasal dari limbah plastik sebagai bahan bakar alternatif. Meskipun demikian, penggunaan minyak pirolisis masih memiliki keterbatasan dalam kualitas pembakaran sehingga diperlukan penambahan zat aditif. Penelitian ini dilakukan secara eksperimental menggunakan mesin diesel satu silinder yang dioperasikan pada putaran konstan 1500 rpm dengan variasi beban 1000, 1500, 2000, 2500, dan 3000 W. Bahan bakar yang diuji meliputi bahan bakar diesel, campuran P20 (20% minyak pirolisis limbah plastik dan 80% bahan bakar diesel), serta campuran P20 yang ditambahkan etanol dan pentanol dengan komposisi tertentu. Parameter kinerja yang dievaluasi meliputi daya rem, torsi, *Brake Thermal Efficiency* (BTE), *Specific Fuel Consumption* (SFC), dan opasitas asap. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan tekanan injeksi dari 180 menjadi 210 bar meningkatkan kinerja mesin dan menurunkan emisi pada seluruh variasi bahan bakar. Bahan bakar diesel pada tekanan injeksi 210 bar menghasilkan daya tertinggi sebesar 3,70 kW, torsi 23,55 N·m, BTE 22,53%, dan SFC terendah sebesar 0,38 kg/kWh. Di antara campuran bahan bakar minyak pirolisis, P20E10Pn10 pada tekanan injeksi 210 bar menunjukkan kinerja terbaik dengan daya sebesar 3,60 kW, torsi 22,93 N·m, BTE 21,67%, dan SFC sebesar 0,39 kg/kWh, serta menghasilkan opasitas asap terendah sebesar 3,50–18,67%. Dengan demikian, P20E10Pn10 pada tekanan injeksi 210 bar diidentifikasi sebagai kondisi optimum yang memberikan keseimbangan yang baik antara kinerja mesin dan pengurangan emisi.

**Kata Kunci -** Minyak Pirolisis; Aditif Etanol dan Pentanol; Tekanan Injeksi; Kinerja Mesin; Mesin Diesel.

### PENDAHULUAN

Mesin diesel masih menjadi sumber tenaga utama pada sektor transportasi, pertanian, pembangkit listrik, dan industri karena memiliki efisiensi termal yang lebih tinggi dibandingkan mesin bensin. Efisiensi tersebut diperoleh melalui rasio kompresi yang tinggi sehingga menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna dan konsumsi bahan bakar yang lebih rendah. Namun, tingginya ketergantungan mesin diesel terhadap bahan bakar fosil menimbulkan tantangan serius berupa meningkatnya konsumsi energi tak terbarukan, emisi gas rumah kaca, serta pencemaran

lingkungan. Oleh karena itu, pengembangan bahan bakar alternatif yang mampu mempertahankan performa mesin sekaligus menekan emisi menjadi salah satu fokus utama penelitian di bidang energi dan teknik otomotif [1],[2].

Salah satu sumber energi alternatif yang potensial adalah minyak hasil pirolisis limbah plastik. Peningkatan jumlah limbah plastik yang sulit terurai telah menjadi permasalahan lingkungan global sehingga diperlukan teknologi yang mampu mengubah limbah tersebut menjadi produk bernilai tambah. Teknologi pirolisis memungkinkan konversi plastik seperti *Low-Density Polyethylene* (LDPE), *High-Density Polyethylene* (HDPE), *Polypropylene* (PP), *Polystyrene* (PS), *Polyvinyl Chloride* (PVC), dan *Polyethylene Terephthalate* (PET) menjadi bahan bakar cair melalui proses dekomposisi termal tanpa oksigen. Minyak pirolisis memiliki karakteristik hidrokarbon yang mendekati bahan bakar diesel sehingga berpotensi digunakan sebagai bahan bakar alternatif pada mesin diesel tanpa memerlukan modifikasi yang signifikan [3],[4],[5],[6].

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penggunaan minyak pirolisis mampu menghasilkan performa mesin yang relatif mendekati bahan bakar diesel konvensional. Winangun et al. [7] melaporkan bahwa pencampuran minyak pirolisis LDPE dengan biosolar meningkatkan efisiensi termal dan angka setana, namun masih menghasilkan emisi asap yang relatif tinggi. Sementara itu, Murdieono dan Aklis [3] menunjukkan bahwa bahan bakar pirolisis dapat menghasilkan daya dan torsi yang kompetitif, tetapi kualitas pembakaran masih dipengaruhi oleh sifat fisik bahan bakar seperti viskositas, kandungan oksigen, dan volatilitas. Temuan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kualitas minyak pirolisis masih diperlukan agar mampu menghasilkan pembakaran yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan adalah penambahan alkohol berantai pendek dan menengah sebagai zat aditif oksigenat. Etanol memiliki kandungan oksigen yang tinggi sehingga mampu meningkatkan proses oksidasi selama pembakaran dan menurunkan pembentukan partikulat. Namun, etanol memiliki nilai kalor dan angka setana yang lebih rendah dibandingkan solar sehingga penggunaannya dalam jumlah besar dapat menurunkan performa mesin. Sebaliknya, pentanol memiliki nilai kalor, angka setana, serta stabilitas pencampuran yang lebih baik sehingga mampu mempertahankan karakteristik pembakaran sekaligus mengurangi kelemahan etanol [8]. Oleh karena itu, kombinasi etanol dan pentanol diperkirakan dapat menghasilkan keseimbangan antara peningkatan efisiensi pembakaran dan performa mesin.

Selain meningkatkan performa, penggunaan alkohol juga berpotensi menurunkan emisi gas buang. Liang et al. [9] melaporkan bahwa penambahan etanol pada bahan bakar diesel mampu mengurangi emisi karbon monoksida (CO) dan partikulat pada beban rendah hingga menengah, sedangkan pentanol memberikan stabilitas pembakaran yang lebih baik pada kondisi beban tinggi. Di sisi lain, kualitas atomisasi bahan bakar juga berperan penting terhadap proses pembakaran. Atomisasi yang lebih baik menghasilkan pencampuran bahan bakar dan udara yang lebih homogen sehingga meningkatkan efisiensi pembakaran dan menurunkan emisi hidrokarbon (HC), karbon monoksida (CO), maupun asap (*smoke opacity*) [10], [11]. Dengan demikian, peningkatan karakteristik bahan bakar melalui kombinasi minyak pirolisis dan alkohol diharapkan mampu menghasilkan pembakaran yang lebih optimal.

Meskipun berbagai penelitian mengenai pemanfaatan minyak pirolisis limbah plastik sebagai bahan bakar alternatif telah berkembang pesat, sebagian penelitian masih berfokus pada pencampuran minyak pirolisis dengan solar, biodiesel, atau hanya satu jenis alkohol seperti metanol maupun etanol. Penelitian sebelumnya [12], [5] memanfaatkan metanol dan diethyl ether sebagai aditif, sedangkan penelitian lainnya [13],[14],[15],[16] hanya mengevaluasi penggunaan etanol sebagai *oxygenated additive* untuk memperbaiki karakteristik pembakaran dan emisi bahan bakar pirolisis. Hingga saat ini masih sangat sedikit penelitian yang mengombinasikan minyak pirolisis limbah plastik dengan dua jenis alkohol, yaitu etanol dan pentanol, dalam berbagai variasi komposisi campuran pada mesin diesel satu silinder [17],[18],[19]. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa penambahan senyawa beroksigen dapat memengaruhi proses atomisasi, pencampuran bahan bakar–udara, karakteristik pembakaran, performa, dan pembentukan emisi. Namun, penggunaan satu jenis alkohol masih menghadapi trade-off antara peningkatan kandungan oksigen dan penurunan nilai kalor serta karakteristik penyalaan bahan bakar.

Selain komposisi bahan bakar, karakteristik injeksi merupakan faktor penting yang menentukan kualitas proses pembakaran pada mesin diesel. Tekanan injeksi memengaruhi ukuran droplet, penetrasi semprotan, distribusi bahan bakar di dalam ruang bakar, serta kualitas pencampuran bahan bakar dengan udara [20]. Peningkatan tekanan injeksi pada kondisi tertentu dapat menghasilkan atomisasi yang lebih halus sehingga meningkatkan homogenitas campuran dan memperbaiki pembakaran. Namun, pengaruh tekanan injeksi tidak dapat dipisahkan dari karakteristik fisikokimia bahan bakar yang digunakan. Perubahan viskositas, densitas, volatilitas, nilai kalor, dan kandungan oksigen akibat penggunaan minyak pirolisis dan alkohol dapat menyebabkan respons pembakaran yang berbeda terhadap perubahan tekanan injeksi.

Berdasarkan kajian tersebut, terdapat dua kesenjangan penelitian yang perlu dikaji lebih lanjut. Pertama, masih terbatasnya penelitian yang mengevaluasi penggunaan kombinasi etanol dan pentanol secara simultan sebagai aditif oksigenat pada minyak pirolisis limbah plastik dengan variasi komposisi yang terkontrol. Etanol memiliki kandungan oksigen yang tinggi dan volatilitas yang relatif baik, sedangkan n-pentanol memiliki nilai kalor dan angka setana yang lebih tinggi dibandingkan etanol sehingga karakteristik energinya lebih mendekati bahan bakar diesel [21]. Perbedaan

karakteristik tersebut memungkinkan kombinasi keduanya menghasilkan karakteristik pembakaran yang berbeda dibandingkan penggunaan satu jenis alkohol. Kedua, pengaruh variasi komposisi bahan bakar tersebut pada tekanan injeksi yang berbeda belum banyak dikaji secara terpadu, padahal tekanan injeksi berpengaruh terhadap kualitas atomisasi dan pencampuran bahan bakar–udara yang secara langsung memengaruhi performa dan emisi mesin [22].

Oleh karena itu, penelitian ini dirancang untuk mengkaji pengaruh interaksi antara komposisi bahan bakar berbasis minyak pirolisis ditambah etanol dan pentanol sebagai zat aditif, serta tekanan injeksi terhadap karakteristik performa serta emisi mesin diesel satu silinder. Variasi komposisi bahan bakar digunakan untuk mengevaluasi kontribusi kombinasi etanol dan pentanol terhadap karakteristik pembakaran, sedangkan variasi tekanan injeksi digunakan untuk mengevaluasi pengaruh kualitas atomisasi terhadap respon mesin. Parameter yang dianalisis meliputi daya, torsi, *Brake Thermal Efficiency* (BTE), *Specific Fuel Consumption* (SFC), dan *smoke opacity* pada berbagai tingkat beban mesin.

Kebaruhan penelitian ini terletak pada tiga aspek utama. Pertama, penelitian mengembangkan formulasi bahan bakar minyak pirolisis limbah plastik dengan kombinasi dua alkohol, yaitu etanol dan pentanol, sehingga karakteristik oksigenasi, nilai kalor, dan sifat penyalan campuran dapat dikaji secara simultan. Kedua, penelitian mengevaluasi penggunaan formulasi tersebut pada dua tingkat tekanan injeksi, yaitu 180 bar dan 210 bar, untuk mengetahui respons bahan bakar terhadap perubahan kondisi atomisasi. Ketiga, penelitian menganalisis keterkaitan antara komposisi bahan bakar dan tekanan injeksi terhadap perubahan performa dan emisi mesin, sehingga tidak hanya menentukan karakteristik bahan bakar yang digunakan, tetapi juga mengevaluasi kondisi operasi injeksi yang sesuai untuk formulasi tersebut.

Pendekatan tersebut memberikan perspektif yang berbeda dibandingkan penelitian yang hanya menguji minyak pirolisis dengan satu jenis alkohol atau menggunakan satu kondisi tekanan injeksi. Dengan mempertimbangkan kedua faktor tersebut secara bersamaan, penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara formulasi bahan bakar, karakteristik atomisasi, kualitas pembakaran, performa mesin, dan pembentukan emisi.

Berdasarkan research gap tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi campuran minyak pirolisis limbah plastik dengan kombinasi etanol dan pentanol pada tekanan injeksi yang berbeda terhadap performa dan emisi mesin diesel satu silinder. Hasil penelitian diharapkan dapat mengidentifikasi kecenderungan komposisi bahan bakar dan kondisi tekanan injeksi yang menghasilkan keseimbangan antara performa mesin dan karakteristik emisi. Selain itu, hasil penelitian dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan bahan bakar alternatif berbasis limbah plastik sekaligus mendukung pemanfaatan limbah plastik sebagai sumber energi bernilai tambah dan pengurangan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil.

## METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan kuantitatif. Metode eksperimen digunakan untuk menganalisis pengaruh variasi komposisi bahan bakar dan tekanan injeksi terhadap performa serta emisi mesin diesel satu silinder. Pendekatan kuantitatif digunakan karena seluruh data hasil pengujian dinyatakan dalam bentuk numerik dan dianalisis melalui perhitungan parameter performa serta penyajian dalam bentuk tabel dan grafik.

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah jenis dan komposisi bahan bakar serta tekanan injeksi. Adapun komposisi campuran bahan bakar sebagai berikut:

1. Campuran solar 80% dengan minyak pirolisis 20% ( $P_{20}$ )
2. Campuran bahan bakar  $P_{20}$  80% dengan penambahan zat aditif etanol 10% serta pentanol 10% ( $P_{20}E_{10}Pn_{10}$ )
3. Campuran bahan bakar  $P_{20}$  70% dengan penambahan zat aditif etanol 10% serta pentanol 20% ( $P_{20}E_{10}Pn_{20}$ )

Sedangkan tekanan injeksi yang digunakan adalah 180 bar dan 210 bar. Putaran mesin dijaga konstan pada 1500 rpm, dan beban mesin divariasikan sebesar 1000, 1500, 2000, 2500, serta 3000 W. Pengujian dilakukan pada kondisi operasi yang dikendalikan untuk memastikan bahwa perubahan parameter performa dan emisi yang diperoleh terutama berkaitan dengan perubahan komposisi bahan bakar dan tekanan injeksi.

Setelah sampel bahan bakar tercampur, tahapan selanjutnya adalah pengujian properties berupa:

1. Nilai Viskositas Kinematika (cSt)
2. Nilai Densitas ( $\text{kg/m}^3$ )
3. Nilai Kalor ( $\text{kJ/kg}$ )
4. Nilai *flash point* (%)

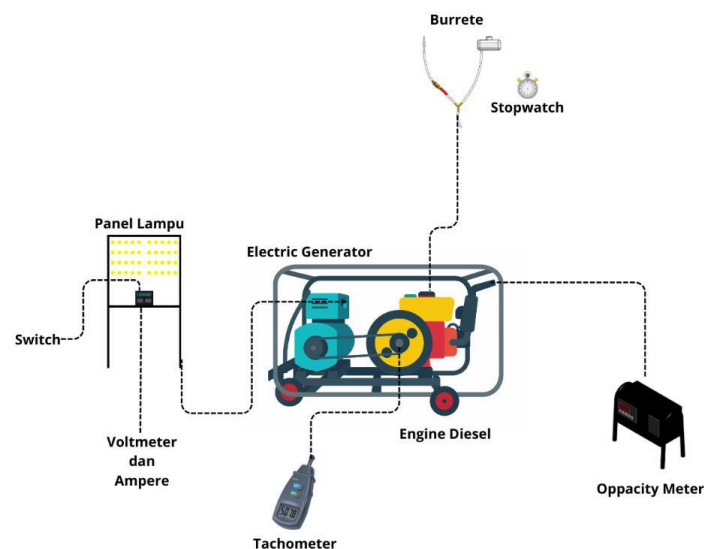
Pengujian dilakukan menggunakan mesin diesel satu silinder dengan sistem injeksi mekanis. Mesin dioperasikan pada putaran konstan 1500 rpm dan dibebani menggunakan electrical load bank berupa lampu dengan variasi beban 1000, 1500, 2000, 2500, dan 3000 W.

Untuk menjamin reproduktibilitas penelitian, karakteristik teknis mesin dan sistem injeksi yang digunakan disajikan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Spesifikasi Teknis Mesin Diesel dan Sistem Pengujian

| Parameter              | Spesifikasi                                                                                                           |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Jenis Mesin            | Mesin Diesel 4-tak 1 silinder (merk: Dongfeng S 195)                                                                  |
| Volume Isi Silinder    | 815 cc (0,815 L)                                                                                                      |
| Sistem Pembakaran      | Injeksi langsung                                                                                                      |
| Perbandingan Kompresi  | 17:1                                                                                                                  |
| Diameter × Langkah     | 95 mm × 115 mm                                                                                                        |
| Tenaga Maksimal        | 13 HP / 2200 rpm                                                                                                      |
| Volume Isi Silinder    | 815 cc (0,815 L)                                                                                                      |
| Sistem Pendinginan     | Hopper                                                                                                                |
| Sistem Pelumasan       | Tekanan / Percikan                                                                                                    |
| Kapasitas Oli          | 3,5 Liter                                                                                                             |
| Putaran pengujian      | 1500 rpm                                                                                                              |
| Variasi beban          | 1000, 1500, 2000, 2500, dan 3000 W                                                                                    |
| Bahan bakar pembanding | Solar 100%                                                                                                            |
| Bahan bakar uji        | P <sub>20</sub> ; P <sub>20</sub> E <sub>10</sub> Pn <sub>10</sub> ; P <sub>20</sub> E <sub>10</sub> Pn <sub>20</sub> |

Adapun desain penelitian ini ditunjukkan pada gambar 1.



**Gambar 1.** Desain Penelitian

Proses Pengambilan Data:

1. Memasang injektor standar untuk tekanan 180 bar.
2. Mempersiapkan panel lampu sebagai pembebanan pada mesin diesel, dengan menyambungkan pada generator. Pembebanan ini digunakan untuk menghitung performa yang dihasilkan mesin diesel.
3. Memasukan bahan bakar pada burette sebagai pengganti tangki bahan bakar. Penggunaan burette agar memudahkan dalam menghitung konsumsi bahan bakar (SFC) dan stopwatch untuk menghitung waktunya.
4. Menyalakan mesin diesel untuk memanaskan mesin yang dilakukan selama 15-30 menit.
5. Mengatur kecepatan mesin diesel pada 1500 rpm dengan menggunakan alat tachometer.
6. Mengambil data penelitian berupa tegangan, arus menggunakan beban lampu 1000, 1500, 2000, 2500, dan 3000 Watt, serta waktu konsumsi bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghabiskan bahan bakar sebanyak 25 ml. Selain itu, mengambil data emisi berupa *smoke opacity* menggunakan alat ukur *opacity smoke meter*. Pengujian dilakukan sebanyak 3 kali pada tiap beban lampu.
7. Mengulangi langkah 3-6 untuk variasi bahan bakar P<sub>20</sub> 80% + zat aditif etanol 10% serta pentanol 10% (P<sub>20</sub>E<sub>10</sub>Pn<sub>10</sub>), serta P<sub>20</sub> 80% + zat aditif etanol 10% serta pentanol 20% (P<sub>20</sub>E<sub>10</sub>Pn<sub>20</sub>)
8. Ulangi langkah 2-6 pada variasi tekanan injektor 210 bar.

## Analisis Data

### a. Performa

Data hasil pengujian selanjutnya digunakan untuk menghitung parameter performa mesin, meliputi, daya, torsi, BTE, dan SFC. Perhitungan dilakukan berdasarkan rumus yang sudah ditetapkan dalam penelitian, dan untuk setiap variasi dihitung melalui nilai rata-rata guna memperoleh hasil yang lebih akurat.

#### a) Daya

Daya adalah besarnya kemampuan mesin dalam menerima beban tertentu. Daya dapat dihitung melalui rumus berikut [23]:

$$Ne = \frac{V \times I \times \cos \theta}{\mu_{generator} \times \mu_{transmisi}} \quad (1)$$

Dengan

Ne : Daya mesin (Watt)

V : Tegangan Listrik (Volt)

I : Arus listrik (Ampere)

Cos  $\theta$  : Faktor daya = 1 (karena beban resistif/lampu pijar)

$\mu_{generator}$  : Efisiensi mekanisme generator = 0,85 (generator AC 1 fasa daya kecil-menengah  $\leq 5$  kW)

$\mu_{transmisi}$  : Efisiensi mesin transmisi (0,95)

#### b) Torsi

Adalah kemampuan mesin dalam melakukan suatu usaha, dapat didefinisikan sebagai gaya yang bekerja pada jarak tertentu dan memiliki satuan Nm atau lbf-ft [23]. Torsi dapat dihitung melalui rumus berikut:

$$M_t = \frac{60000 \times Ne}{2\pi n} \quad (2)$$

Dengan:

$M_t$  : Torsi (N.m)

Ne : Daya (kW)

n : Putaran mesin (rpm)

#### c) SFC

Konsumsi bahan bakar spesifik merupakan jumlah bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan daya tertentu; semakin kecil nilainya, semakin efisien bahan bakar digunakan. Konsumsi bahan bakar spesifik (SFC) dapat dihitung melalui rumus berikut:

$$\dot{m}_{bb} = \rho \frac{V}{t} \quad (3)$$

$$SFC = \frac{\dot{m}_{bb}}{Ne} \times 3600 \quad (4)$$

Dengan:

SFC : Konsumsi bahan bakar (kg/kWh)

$\dot{m}_{bb}$  : Laju aliran massa bahan bakar (kg/s)

$\rho$  : Densitas bahan bakar (kg/m<sup>3</sup>)

t : Waktu konsumsi 25 mL (s)

V : Volume bahan bakar (m<sup>3</sup>)

Ne : Daya (kW)

#### d) BTE

Efisiensi Termal Rem (*Brake Thermal Efficiency*/BTE) adalah rasio energi mekanik yang dihasilkan terhadap energi kimia dalam bahan bakar.

$$BTE = \frac{Ne}{\dot{m}_{bb} \times LHV_{campuran}} \times 100\% \quad (5)$$

Dengan:

BTE : Efisiensi termal (%)

$\dot{m}_{bb}$  : Laju aliran bahan bakar (kg/s)

$LHV_{campuran}$  : Nilai kalor bawah campuran (J/kg)

e) Emisi

*Smoke opacity* merupakan salah satu parameter emisi yang digunakan untuk menunjukkan tingkat kepekatan asap akibat terbentuknya partikel karbon (soot) selama proses pembakaran pada mesin diesel [24]. Emisi opasitas diperoleh menggunakan *smoke opacity meter*.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Pengujian Propertis

Perbedaan komposisi bahan bakar menyebabkan perubahan pada sifat fisik setiap campuran. Oleh karena itu, dilakukan pengujian viskositas kinematika, densitas, nilai kalor, dan flash point sebagai dasar untuk mengetahui perbedaan properti masing-masing bahan bakar.

**Tabel 1.** Propertis Campuran Bahan Bakar

| Bahan Bakar                                      | Viskositas Kinematik<br>(cSt) | Densitas<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Nilai Kalor<br>(kJ/kg) | Flash Point<br>(%) |
|--------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|------------------------|--------------------|
| Solar                                            | 4,5                           | 840                              | 42460                  | 60                 |
| P <sub>20</sub>                                  | 6,5                           | 864                              | 46481                  | 27                 |
| P <sub>20</sub> E <sub>10</sub> Pn <sub>10</sub> | 7,4                           | 852                              | 42640                  | 22                 |
| P <sub>20</sub> E <sub>10</sub> Pn <sub>20</sub> | 5,7                           | 846                              | 40057                  | 28                 |

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.1, campuran P<sub>20</sub> memiliki viskositas, densitas, dan nilai kalor yang lebih tinggi dibandingkan solar. Sementara itu, penambahan etanol dan pentanol pada campuran P<sub>20</sub> menyebabkan perubahan pada setiap properti bahan bakar sesuai dengan komposisi campuran yang digunakan, sedangkan nilai flash point cenderung menurun akibat sifat alkohol yang lebih mudah menguap.

Perbedaan sifat fisik bahan bakar tersebut memengaruhi proses atomisasi, pembentukan campuran udara dan bahan bakar, serta pelepasan energi selama proses pembakaran di dalam silinder. Oleh karena itu, perbedaan sifat fisik pada setiap variasi campuran menjadi dasar dalam menganalisis hasil pengujian performa dan emisi mesin diesel.

### B. Pengujian Performa dan Emisi

**Tabel 2.** Data Perhitungan Daya

| Beban<br>Lampu<br>(Watt) | Nilai Daya (kW) |                 |                                                  |                                                  |                 |                 |                                                  |                                                  |
|--------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
|                          | Tekanan 180 bar |                 |                                                  |                                                  | Tekanan 210 bar |                 |                                                  |                                                  |
|                          | Solar           | P <sub>20</sub> | P <sub>20</sub> E <sub>10</sub> Pn <sub>10</sub> | P <sub>20</sub> E <sub>10</sub> Pn <sub>20</sub> | Solar           | P <sub>20</sub> | P <sub>20</sub> E <sub>10</sub> Pn <sub>10</sub> | P <sub>20</sub> E <sub>10</sub> Pn <sub>20</sub> |
| 1000                     | 1,14            | 1,11            | 1,13                                             | 1,13                                             | 1,24            | 1,22            | 1,21                                             | 1,20                                             |
| 1500                     | 1,71            | 1,67            | 1,70                                             | 1,63                                             | 1,87            | 1,81            | 1,84                                             | 1,80                                             |
| 2000                     | 2,27            | 2,19            | 2,23                                             | 2,12                                             | 2,47            | 2,42            | 2,41                                             | 2,39                                             |
| 2500                     | 2,85            | 2,73            | 2,80                                             | 2,66                                             | 3,10            | 2,99            | 3,04                                             | 2,95                                             |
| 3000                     | 3,43            | 3,28            | 3,35                                             | 3,16                                             | 3,70            | 3,57            | 3,60                                             | 3,53                                             |

**Tabel 3.** Data Perhitungan Torsi

| Beban<br>Lampu<br>(Watt) | Nilai Torsi (N.m) |                 |                                                  |                                                  |                 |                 |                                                  |                                                  |
|--------------------------|-------------------|-----------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
|                          | Tekanan 180 bar   |                 |                                                  |                                                  | Tekanan 210 bar |                 |                                                  |                                                  |
|                          | Solar             | P <sub>20</sub> | P <sub>20</sub> E <sub>10</sub> Pn <sub>10</sub> | P <sub>20</sub> E <sub>10</sub> Pn <sub>20</sub> | Solar           | P <sub>20</sub> | P <sub>20</sub> E <sub>10</sub> Pn <sub>10</sub> | P <sub>20</sub> E <sub>10</sub> Pn <sub>20</sub> |
| 1000                     | 7,29              | 7,05            | 7,17                                             | 7,19                                             | 7,90            | 7,77            | 7,70                                             | 7,67                                             |
| 1500                     | 10,88             | 10,61           | 10,83                                            | 10,39                                            | 11,92           | 11,52           | 11,69                                            | 11,47                                            |
| 2000                     | 14,44             | 13,97           | 14,21                                            | 13,53                                            | 15,75           | 15,42           | 15,37                                            | 15,23                                            |
| 2500                     | 18,14             | 17,39           | 17,81                                            | 16,97                                            | 19,76           | 19,07           | 19,33                                            | 18,82                                            |
| 3000                     | 21,88             | 20,90           | 21,34                                            | 20,14                                            | 23,55           | 22,71           | 22,93                                            | 22,47                                            |

**Tabel 4.** Data Perhitungan SFC

| Beban Lampu (Watt) | Nilai SFC (kg/kW.h) |                 |                                                  |                                                  |                 |                 |                                                  |                                                  |
|--------------------|---------------------|-----------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
|                    | Tekanan 180 bar     |                 |                                                  |                                                  | Tekanan 210 bar |                 |                                                  |                                                  |
|                    | Solar               | P <sub>20</sub> | P <sub>20</sub> E <sub>10</sub> Pn <sub>10</sub> | P <sub>20</sub> E <sub>10</sub> Pn <sub>20</sub> | Solar           | P <sub>20</sub> | P <sub>20</sub> E <sub>10</sub> Pn <sub>10</sub> | P <sub>20</sub> E <sub>10</sub> Pn <sub>20</sub> |
| 1000               | 0,88                | 1,03            | 1,01                                             | 1,08                                             | 0,81            | 0,83            | 0,82                                             | 0,90                                             |
| 1500               | 0,64                | 0,75            | 0,72                                             | 0,80                                             | 0,58            | 0,60            | 0,58                                             | 0,66                                             |
| 2000               | 0,53                | 0,63            | 0,60                                             | 0,66                                             | 0,47            | 0,49            | 0,47                                             | 0,54                                             |
| 2500               | 0,45                | 0,55            | 0,53                                             | 0,58                                             | 0,41            | 0,43            | 0,42                                             | 0,48                                             |
| 3000               | 0,39                | 0,51            | 0,49                                             | 0,53                                             | 0,38            | 0,40            | 0,39                                             | 0,44                                             |

**Tabel 5.** Data Perhitungan BTE

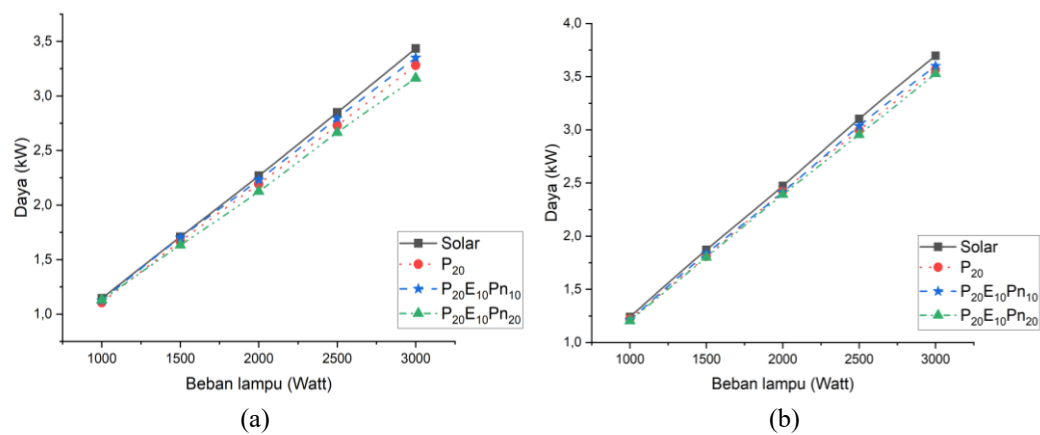
| Beban Lampu (Watt) | Nilai BTE (%)   |                 |                                                  |                                                  |                 |                 |                                                  |                                                  |
|--------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
|                    | Tekanan 180 bar |                 |                                                  |                                                  | Tekanan 210 bar |                 |                                                  |                                                  |
|                    | Solar           | P <sub>20</sub> | P <sub>20</sub> E <sub>10</sub> Pn <sub>10</sub> | P <sub>20</sub> E <sub>10</sub> Pn <sub>20</sub> | Solar           | P <sub>20</sub> | P <sub>20</sub> E <sub>10</sub> Pn <sub>10</sub> | P <sub>20</sub> E <sub>10</sub> Pn <sub>20</sub> |
| 1000               | 9,62            | 7,50            | 8,34                                             | 8,30                                             | 10,52           | 9,36            | 10,25                                            | 10,00                                            |
| 1500               | 13,22           | 10,34           | 11,67                                            | 11,23                                            | 14,62           | 12,85           | 14,49                                            | 13,67                                            |
| 2000               | 16,11           | 12,31           | 14,08                                            | 13,63                                            | 18,12           | 15,91           | 17,80                                            | 16,56                                            |
| 2500               | 18,85           | 13,96           | 15,90                                            | 15,51                                            | 20,76           | 18,00           | 19,94                                            | 18,60                                            |
| 3000               | 21,57           | 15,25           | 17,34                                            | 16,92                                            | 22,53           | 19,53           | 21,67                                            | 20,26                                            |

**Tabel 5.** Data Pengujian Opasitas

| Beban Lampu (Watt) | Nilai Opasitas (%) |                 |                                                  |                                                  |                 |                 |                                                  |                                                  |
|--------------------|--------------------|-----------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
|                    | Tekanan 180 bar    |                 |                                                  |                                                  | Tekanan 210 bar |                 |                                                  |                                                  |
|                    | Solar              | P <sub>20</sub> | P <sub>20</sub> E <sub>10</sub> Pn <sub>10</sub> | P <sub>20</sub> E <sub>10</sub> Pn <sub>20</sub> | Solar           | P <sub>20</sub> | P <sub>20</sub> E <sub>10</sub> Pn <sub>10</sub> | P <sub>20</sub> E <sub>10</sub> Pn <sub>20</sub> |
| 1000               | 11                 | 9               | 7                                                | 9                                                | 9               | 5               | 4                                                | 6                                                |
| 1500               | 29                 | 14              | 12                                               | 14                                               | 15              | 9               | 8                                                | 6                                                |
| 2000               | 56                 | 26              | 24                                               | 23                                               | 26              | 17              | 14                                               | 6                                                |
| 2500               | 71                 | 37              | 35                                               | 33                                               | 44              | 25              | 19                                               | 11                                               |
| 3000               | 81                 | 69              | 50                                               | 43                                               | 69              | 32              | 25                                               | 19                                               |

### C. Analisis Data

Gambar 2(a) dan 2(b) menunjukkan bahwa peningkatan beban lampu dari 1000 hingga 3000 W diikuti oleh peningkatan daya pada seluruh variasi bahan bakar, baik pada tekanan injeksi 180 bar maupun 210 bar. Peningkatan beban menyebabkan bertambahnya torsi tahanan yang diberikan generator sehingga mesin membutuhkan energi mekanis yang lebih besar untuk mempertahankan putaran konstan 1500 rpm. Kondisi tersebut menyebabkan peningkatan energi bahan bakar yang dikonversi menjadi kerja mekanis sehingga daya keluaran meningkat. Pada tekanan injeksi 180 bar, solar menghasilkan daya tertinggi, sedangkan P<sub>20</sub> cenderung menghasilkan daya sedikit lebih rendah. Pada beban 3000 W, daya yang dihasilkan solar sekitar 3,4 kW, sedangkan P<sub>20</sub> sekitar 3,3 kW. Perbedaan tersebut berkaitan dengan karakteristik fisikokimia dan kandungan energi bahan bakar, khususnya nilai kalor yang memengaruhi jumlah energi yang tersedia selama proses pembakaran. Hasil ini sejalan dengan penelitian [25] yang menunjukkan bahwa peningkatan beban meningkatkan *brake power*, sedangkan penggunaan minyak pirolisis dapat menghasilkan daya yang sedikit lebih rendah dibandingkan bahan bakar diesel.

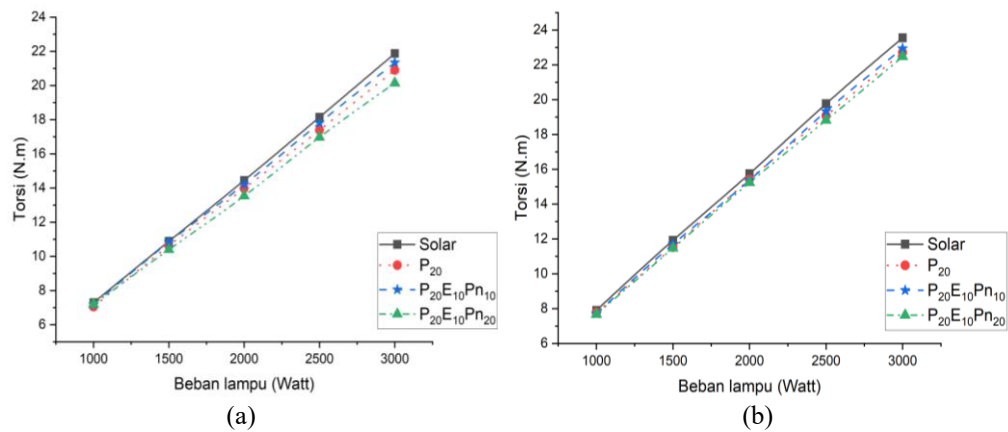


**Gambar 2.** Pengaruh Beban Terhadap Daya; (a) Tekanan 180 Bar dan (b) Tekanan 210 Bar

Penambahan etanol dan pentanol menunjukkan pengaruh yang berbeda terhadap daya mesin. Campuran  $P_{20}E_{10}Pn_{10}$  menghasilkan daya yang relatif lebih tinggi dibandingkan  $P_{20}$ , terutama pada beban menengah hingga tinggi. Pada beban 3000 W dan tekanan injeksi 180 bar,  $P_{20}E_{10}Pn_{10}$  menghasilkan daya sekitar 3,35 kW, sedangkan  $P_{20}E_{10}Pn_{20}$  menghasilkan sekitar 3,2 kW. Peningkatan daya pada  $P_{20}E_{10}Pn_{10}$  menunjukkan bahwa penambahan etanol dan pentanol pada proporsi tertentu dapat memperbaiki karakteristik pembakaran campuran. Kandungan oksigen dalam etanol berpotensi mendukung proses oksidasi bahan bakar, sedangkan pentanol memiliki nilai kalor yang lebih tinggi dibandingkan etanol sehingga dapat membantu mempertahankan kandungan energi campuran. Namun, peningkatan kandungan pentanol pada  $P_{20}E_{10}Pn_{20}$  tidak menghasilkan peningkatan daya lebih lanjut. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh aditif alkohol terhadap daya tidak bersifat linear karena perubahan komposisi juga mengubah nilai kalor dan karakteristik fisikokimia campuran. Dengan demikian, terdapat komposisi tertentu yang lebih sesuai untuk menghasilkan keseimbangan antara kualitas pembakaran dan energi yang tersedia.

Pada tekanan injeksi 210 bar (Gambar 2(b)), daya yang dihasilkan seluruh bahan bakar secara umum lebih tinggi dibandingkan pada tekanan 180 bar. Pada beban 3000 W, daya solar mencapai sekitar 3,7 kW, sedangkan  $P_{20}$ ,  $P_{20}E_{10}Pn_{10}$ , dan  $P_{20}E_{10}Pn_{20}$  masing-masing berada pada kisaran 3,6, 3,65, dan 3,55 kW. Peningkatan tekanan injeksi meningkatkan kecepatan bahan bakar keluar dari nozzle sehingga proses break-up jet dan atomisasi dapat berlangsung lebih baik, menghasilkan droplet yang lebih kecil serta mempercepat proses penguapan dan pencampuran bahan bakar–udara. Kondisi tersebut mendukung proses pembakaran yang lebih efektif sehingga energi kimia bahan bakar dapat dikonversi menjadi energi mekanis secara lebih optimal [22]. Respons  $P_{20}E_{10}Pn_{10}$  yang menghasilkan daya mendekati solar pada tekanan 210 bar menunjukkan bahwa kombinasi formulasi bahan bakar dan kondisi injeksi berperan penting dalam menentukan performa mesin. Dengan demikian, hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan tekanan injeksi dari 180 menjadi 210 bar mampu meningkatkan daya pada seluruh bahan bakar, sementara  $P_{20}E_{10}Pn_{10}$  menunjukkan respons daya yang relatif lebih tinggi dibandingkan  $P_{20}$  dan  $P_{20}E_{10}Pn_{20}$ . Temuan ini mengindikasikan bahwa komposisi bahan bakar dan tekanan injeksi perlu dipertimbangkan secara simultan untuk memperoleh kondisi pembakaran yang lebih efektif, bukan hanya berdasarkan peningkatan kandungan alkohol atau tekanan injeksi secara terpisah.

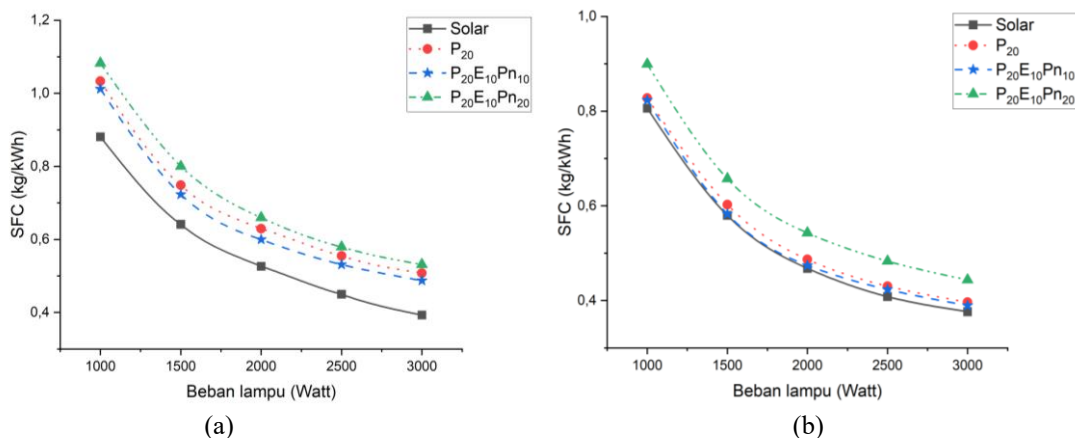
Selanjutnya untuk nilai torsi yang dihasilkan pada mesin diesel satu silinder yang ditunjukkan pada gambar 3, torsi mesin meningkat seiring dengan peningkatan beban lampu dari 1000 hingga 3000 W pada seluruh variasi bahan bakar dan kedua tekanan injeksi. Peningkatan torsi terjadi karena bertambahnya beban generator menyebabkan peningkatan tahanan torsi pada poros mesin, sehingga mesin membutuhkan momen puntir yang lebih besar untuk mempertahankan putaran konstan 1500 rpm. Pada kondisi putaran konstan, peningkatan daya juga berhubungan langsung dengan peningkatan torsi melalui persamaan (2), sehingga kecenderungan torsi pada Gambar 3 konsisten dengan peningkatan daya pada Gambar 2. Pada tekanan injeksi 180 bar dan beban 3000 W, solar menghasilkan torsi tertinggi sebesar 21,88 N·m, sedangkan  $P_{20}$  menghasilkan 20,90 N·m. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa penggunaan minyak pirolisis sebesar 20% menyebabkan penurunan torsi dibandingkan solar, yang dapat dikaitkan dengan perbedaan nilai kalor dan karakteristik fisikokimia bahan bakar. Pada tekanan injeksi 210 bar, torsi seluruh bahan bakar meningkat dibandingkan tekanan 180 bar. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan tekanan injeksi dapat memperbaiki proses atomisasi dan pencampuran bahan bakar–udara, sehingga mendukung pemanfaatan energi bahan bakar yang lebih efektif selama pembakaran [26].



**Gambar 3.** Pengaruh Beban Terhadap Torsi; (a) Tekanan 180 Bar dan (b) Tekanan 210 Bar

Pengaruh komposisi alkohol terlihat lebih jelas pada perbandingan P<sub>20</sub>, P<sub>20</sub>E<sub>10</sub>Pn<sub>10</sub>, dan P<sub>20</sub>E<sub>10</sub>Pn<sub>20</sub>. Pada beban 3000 W dan tekanan injeksi 180 bar, penambahan etanol 10% dan pentanol 10% pada P<sub>20</sub> meningkatkan torsi dari 20,90 N·m menjadi 21,34 N·m atau meningkat sekitar 2,1%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa formulasi P<sub>20</sub>E<sub>10</sub>Pn<sub>10</sub> memberikan kondisi pembakaran yang lebih menguntungkan dibandingkan P<sub>20</sub>. Etanol memiliki kandungan oksigen yang relatif tinggi sehingga penambahannya dapat menyediakan oksigen tambahan di dalam zona pembakaran dan mendukung proses oksidasi bahan bakar. Sementara itu, pentanol memiliki nilai kalor yang lebih tinggi dibandingkan etanol sehingga dapat membantu mempertahankan kandungan energi campuran. Kombinasi keduanya pada proporsi 10%–10% diduga menghasilkan keseimbangan antara kandungan oksigen, energi bahan bakar, dan karakteristik pembakaran, sehingga sebagian penurunan torsi akibat penggunaan minyak pirolisis dapat dikompensasi. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan alkohol tidak hanya berfungsi sebagai penambah oksigen, tetapi perubahan komposisinya juga menentukan keseimbangan energi dan karakteristik pembakaran campuran.

Sebaliknya, peningkatan kandungan pentanol pada P<sub>20</sub>E<sub>10</sub>Pn<sub>20</sub> tidak menghasilkan peningkatan torsi lebih lanjut. Pada beban 3000 W dan tekanan injeksi 180 bar, torsi P<sub>20</sub>E<sub>10</sub>Pn<sub>20</sub> turun menjadi 20,14 N·m, lebih rendah sekitar 5,6% dibandingkan P<sub>20</sub>E<sub>10</sub>Pn<sub>10</sub> dan sekitar 3,6% dibandingkan P<sub>20</sub>. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kandungan pentanol tidak memberikan hubungan linear terhadap torsi. Pada P<sub>20</sub>E<sub>10</sub>Pn<sub>20</sub>, penambahan pentanol yang lebih tinggi menyebabkan proporsi solar dan minyak pirolisis dalam campuran menjadi lebih rendah, sehingga karakteristik energi campuran berubah. Meskipun pentanol mempunyai nilai kalor lebih tinggi daripada etanol, nilai kalor dan karakteristik pembakaran campuran secara keseluruhan tetap ditentukan oleh proporsi seluruh komponennya. Selain itu, peningkatan pentanol dapat mengubah sifat viskositas, volatilitas, dan karakteristik penyalaan campuran, sehingga keuntungan dari peningkatan kandungan alkohol tidak selalu menghasilkan peningkatan energi mekanis. Dengan demikian, hasil tersebut mengindikasikan adanya komposisi alkohol yang lebih sesuai, yaitu P<sub>20</sub>E<sub>10</sub>Pn<sub>10</sub> pada kondisi pengujian ini, karena memberikan keseimbangan antara oksigenasi dan kandungan energi bahan bakar. Kecenderungan peningkatan torsi akibat penambahan alkohol pada komposisi tertentu sejalan dengan penelitian [27], sedangkan peningkatan torsi pada tekanan injeksi yang lebih tinggi konsisten dengan penelitian [26] yang mengaitkan peningkatan tekanan injeksi dengan perbaikan atomisasi dan proses pencampuran bahan bakar–udara.

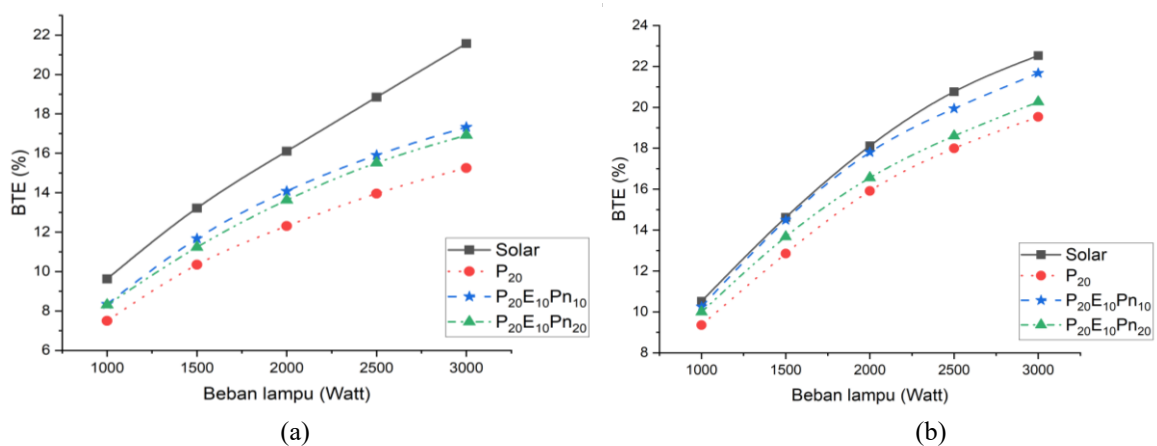


**Gambar 4.** Pengaruh Beban Terhadap SFC; (a) Tekanan 180 Bar dan (b) Tekanan 210 Bar

Berdasarkan gambar 4 (a) dan (b), seluruh bahan bakar mengalami penurunan nilai SFC seiring bertambahnya beban dari 1000 W hingga 3000 W, baik pada tekanan injeksi 180 bar maupun 210 bar. Sebagai contoh, nilai SFC solar pada tekanan 180 bar menurun dari 0,88 kg/kWh menjadi 0,39 kg/kWh, sedangkan pada tekanan 210 bar turun dari 0,81 kg/kWh menjadi 0,38 kg/kWh. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kebutuhan bahan bakar untuk menghasilkan daya tertentu menjadi semakin kecil pada pembebanan yang lebih tinggi.

Pada tekanan injeksi 210 bar menunjukkan nilai SFC yang lebih rendah dibandingkan tekanan injeksi 180 bar. Sebagai contoh, nilai SFC  $P_{20}$  pada beban 1000 W menurun dari 1,03 kg/kWh menjadi 0,83 kg/kWh. Hal tersebut menunjukkan bahwa tekanan injeksi yang lebih tinggi menghasilkan atomisasi bahan bakar yang lebih baik sehingga ukuran droplet menjadi lebih halus dan pencampuran bahan bakar dengan udara berlangsung lebih homogen. Kondisi tersebut mempercepat proses penguapan bahan bakar dan meningkatkan efisiensi pembakaran, sehingga kebutuhan bahan bakar untuk menghasilkan daya tertentu menjadi lebih rendah. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian yang dilaporkan oleh [28] yang menyatakan bahwa peningkatan kualitas pencampuran udara dan bahan bakar pada campuran bahan bakar beralkohol mampu meningkatkan efisiensi pembakaran sehingga nilai SFC cenderung menurun pada kondisi operasi tertentu. Selain itu, [27] juga menjelaskan bahwa kualitas atomisasi bahan bakar yang lebih baik menghasilkan proses pembakaran yang lebih efektif, sehingga kebutuhan bahan bakar untuk menghasilkan daya tertentu menjadi lebih rendah. Hasil tersebut mendukung penelitian ini, di mana tekanan injeksi 210 bar menghasilkan nilai SFC yang lebih rendah dibandingkan tekanan 180 bar pada seluruh variasi bahan bakar.

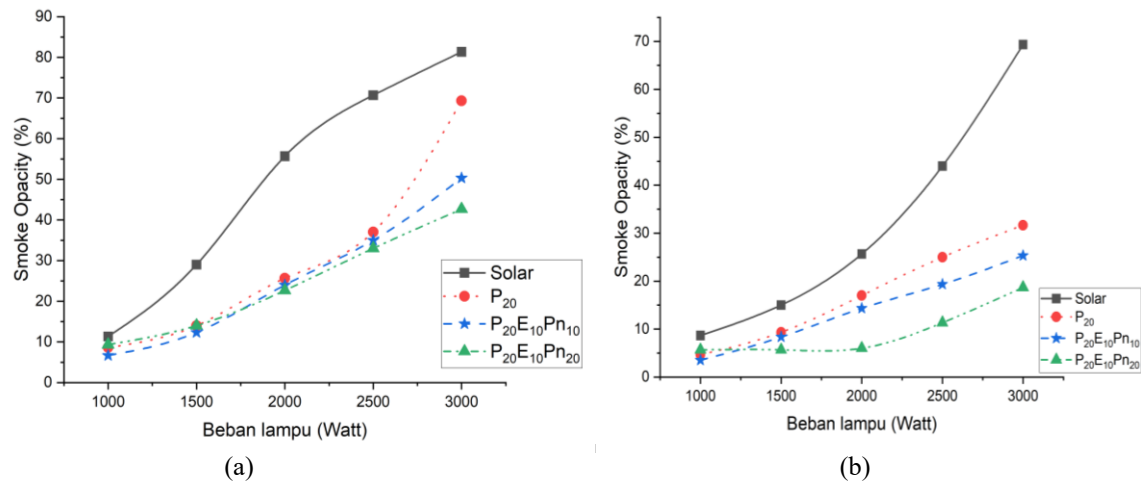
Peningkatan nilai *Brake Thermal Efficiency* (BTE) yang ditunjukkan pada gambar 5 (a) dan (b) mengindikasikan bahwa energi hasil pembakaran dapat dimanfaatkan secara efektif untuk menghasilkan daya mekanis pada pembebanan yang lebih tinggi. Kondisi ini juga didukung dengan meningkatnya daya dan torsi serta menurunnya nilai *Specific Fuel Consumption* (SFC) yang diperoleh pada penelitian ini.



**Gambar 5.** Pengaruh Beban Terhadap BTE; (a) Tekanan 180 Bar dan (b) Tekanan 210 Bar

Pada tekanan injeksi 180 bar, solar menghasilkan nilai BTE tertinggi pada seluruh tingkat pembebanan, yaitu mencapai 21,57% pada beban 3000 Watt, sedangkan  $P_{20}$  menghasilkan nilai terendah sebesar 15,25%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa solar masih memiliki kemampuan konversi energi yang lebih baik dibandingkan campuran minyak pirolisis. Penambahan etanol dan pentanol pada campuran  $P_{20}$  mampu meningkatkan nilai BTE, dimana  $P_{20}E_{10}Pn_{10}$  mencapai 17,34%, lebih tinggi dibandingkan  $P_{20}E_{10}Pn_{20}$  sebesar 16,92% pada beban yang sama. Peningkatan tersebut diduga dipengaruhi oleh kandungan oksigen pada etanol dan pentanol yang mampu memperbaiki proses pembakaran sehingga pembakaran berlangsung lebih sempurna. Namun, peningkatan kadar pentanol pada  $P_{20}E_{10}Pn_{20}$  belum mampu meningkatkan efisiensi termal lebih lanjut karena penurunan nilai kalor campuran mulai memberikan pengaruh terhadap proses pembakaran. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian [29] yang melaporkan bahwa penambahan alkohol pada campuran bahan bakar mampu meningkatkan *Brake Thermal Efficiency* (BTE) karena memperbaiki proses pembakaran dan menghasilkan oksidasi yang lebih efektif. Selain itu, [30] melaporkan bahwa penambahan alkohol seperti 1-pentanol, pada campuran bahan bakar diesel dapat meningkatkan BTE pada komposisi optimum. Namun, peningkatan fraksi pentanol yang lebih tinggi tidak selalu menghasilkan efisiensi termal yang lebih baik karena nilai kalor campuran cenderung menurun. Hal tersebut sesuai dengan hasil penelitian ini, dimana campuran  $P_{20}E_{10}Pn_{10}$  menghasilkan nilai BTE yang lebih tinggi dibandingkan  $P_{20}E_{10}Pn_{20}$ .

Pada penelitian ini, emisi *smoke* dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi campuran bahan bakar minyak pirolisis plastik dengan etanol dan pentanol terhadap tingkat kepekatan asap yang dihasilkan mesin diesel satu silinder.



**Gambar 6.** Pengaruh Beban Terhadap *Smoke Opacity*; (a) Tekanan 180 Bar dan (b) Tekanan 210 Bar

Peningkatan *smoke opacity* pada beban yang semakin tinggi terjadi karena kebutuhan bahan bakar meningkat untuk menghasilkan daya yang lebih besar. Bertambahnya jumlah bahan bakar yang diinjeksikan menyebabkan jumlah bahan bakar di dalam ruang bakar menjadi lebih banyak dibandingkan udara yang tersedia, sehingga oksigen tidak mencukupi untuk membakar seluruh bahan bakar secara sempurna. Akibatnya, terbentuk partikel karbon (*soot*) yang keluar bersama gas buang dan meningkatkan nilai *smoke opacity*. Penambahan etanol dan pentanol pada campuran P<sub>20</sub> dapat mengurangi pembentukan soot karena kedua alkohol tersebut mengandung oksigen yang membantu proses pembakaran. Hal ini terlihat dari nilai *smoke opacity* campuran P<sub>20</sub>E<sub>10</sub>Pn<sub>10</sub> dan P<sub>20</sub>E<sub>10</sub>Pn<sub>20</sub> yang lebih rendah dibandingkan solar maupun P<sub>20</sub>. Peningkatan tekanan injeksi dari 180 menjadi 210 bar mampu menurunkan nilai *opacity* pada mesin diesel satu silinder karena kualitas pengabutan yang lebih baik menghasilkan konsentrasi asap gas buang yang lebih rendah [31].

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, peningkatan tekanan injeksi dari 180 menjadi 210 bar secara umum meningkatkan karakteristik performa dan menurunkan *smoke opacity* pada seluruh bahan bakar yang diuji. Penambahan etanol dan pentanol menunjukkan hasil yang bergantung pada komposisi, dimana P<sub>20</sub>E<sub>10</sub>Pn<sub>10</sub> memberikan karakteristik performa yang lebih baik dibandingkan P<sub>20</sub>, sedangkan peningkatan kandungan pentanol pada P<sub>20</sub>E<sub>10</sub>Pn<sub>20</sub> tidak menghasilkan peningkatan performa secara proporsional.

Pada variasi bahan bakar berbasis minyak pirolisis, P<sub>20</sub>E<sub>10</sub>Pn<sub>10</sub> untuk tekanan injeksi 210 bar menunjukkan kombinasi karakteristik performa dan emisi yang paling seimbang, dengan performa yang mendekati solar serta *smoke opacity* yang lebih rendah. Temuan ini menunjukkan bahwa keberhasilan penggunaan minyak pirolisis tidak hanya ditentukan oleh komposisi bahan bakar, tetapi juga oleh kesesuaian kondisi injeksi.

Dengan demikian, kombinasi campuran bahan bakar dan tekanan injeksi perlu dipertimbangkan secara simultan dalam pengembangan bahan bakar alternatif berbasis minyak pirolisis. P<sub>20</sub>E<sub>10</sub>Pn<sub>10</sub> pada tekanan injeksi 210 bar menunjukkan potensi sebagai formulasi yang dapat meningkatkan kualitas pembakaran sekaligus mempertahankan performa mesin dan menekan pembentukan asap dibandingkan campuran minyak pirolisis tanpa aditif.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada semua pihak baik rekan sejawat dosen maupun mahasiswa di Program Studi Teknologi Rekayasa Otomotif, Politeknik Negeri Madiun yang telah memberikan bantuan moral maupun material selama proses penelitian berlangsung. Tak lupa juga kepada DIPA Politeknik Negeri Madiun tahun 2026 yang telah mendanai penelitian ini.

## REFERENSI

- [1] T. Burhanuddin Sitorus *et al.*, "Performansi Mesin Diesel Menggunakan Biodiesel Dari Campuran Biji Karet-Minyak Pirolisis Limbah Plastik-Minyak Solar," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 16, no. 1, pp. 489–506, Jun. 2025, doi: 10.21776/JRM.V16I1.1765.

- [2] D. Yuventa, B. Sudarmanta, R. P. Putra, M. Martias, and E. Alwi, "Pengaruh Tekanan Injeksi Gas Terhadap Konsumsi Bahan Bakar dan Efisiensi Termal pada Mesin Diesel Dual Fuel," *INVOTEK: Jurnal Inovasi Vokasional dan Teknologi*, vol. 19, no. 1, pp. 35–42, Apr. 2019, doi: 10.24036/INVOTEK.V19I1.349.
- [3] A. Murdieono and N. Aklis, "Kinerja Mesin Diesel dengan Bahan Bakar Minyak Hasil Pirolisis Sampah Plastik," *Prosiding Simposium Nasional Rekayasa Aplikasi Perancangan dan Industri*, pp. 98–108, 2024.
- [4] K. Winangun, W. T. Putra, N. S. Akhmad, and T. Prasetyo, "Pengaruh bahan bakar campuran minyak plastik LDPE dengan biosolar terhadap kinerja dan emisi mesin diesel Effect of LDPE plastik oil mixed fuel with biosolar on diesel engine performance and emissions," vol. 3, pp. 89–95, 2022.
- [5] A. Aulia, I. Abdullah, and A. H. Sebayang, "Evaluation of diesel engine performance and emissions fueled with waste cooking oil biodiesel-plastic pyrolysis oil blends," *Disseminating Information on the Research of Mechanical Engineering-Jurnal Polimesin*, vol. 24, no. 1, 2026.
- [6] H. Yaqoob, H. M. Ali, U. Sajjad, and K. Hamid, "Investigating the potential of plastic pyrolysis oil-diesel blends in diesel engine: Performance, emissions, thermodynamics and sustainability analysis," *Results in Engineering*, vol. 24, p. 103336, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.RINENG.2024.103336.
- [7] K. Winangun, W. T. Putra, N. S. Akhmad, and T. Prasetyo, "Pengaruh bahan bakar campuran minyak plastik LDPE dengan biosolar terhadap kinerja dan emisi mesin diesel," *JTTM : Jurnal Terapan Teknik Mesin*, vol. 3, no. 2, pp. 89–95, Oct. 2022, doi: 10.37373/JTTM.V3I2.300.
- [8] S. Sayyed, R. Kumar, K. Kulkarni, T. Alam, and S. M. Eldin, "Influence of additive mixed ethanol-biodiesel blends on diesel engine characteristics," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 71, pp. 619–629, 2023, doi: 10.1016/j.aej.2023.03.091.
- [9] J. Liang, Q. Zhang, Q. Ma, Z. Chen, and Z. Zheng, "Effect of various ethanol / diesel cosolvents addition on combustion and emission characteristics of a CRDI heavy diesel engine," *Energy Reports*, vol. 8, no. x, pp. 735–748, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2021.12.011.
- [10] A. A. Rahim, I. Saad, N. W. M. Zulkifli, and M. N. A. M. Yusoff, "PERFORMANCE AND EMISSIONS OF DUAL ALCOHOL FUEL BLEND WITH B20 POME BIODIESEL IN DIESEL ENGINE," *J. Teknol.*, vol. 87, no. 3, pp. 455–463, May 2025, doi: 10.11113/JURNALTEKNOLOGI.V87.21791.
- [11] "View of Pengaruh Penggunaan Elektrik Blower Terhadap Konsumsi Bahan Bakar Motor Diesel Satu Silinder." Accessed: Jul. 27, 2026. [Online]. Available: <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/aij/article/view/66444/49567>
- [12] M. Mariappan, M. S. Panithasan, and G. Venkadesan, "Pyrolysis plastic oil production and optimisation followed by maximum possible replacement of diesel with bio-oil/methanol blends in a CRDI engine," *J. Clean. Prod.*, vol. 312, p. 127687, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.127687.
- [13] M. Bhargavi, T. Vinod Kumar, R. Ali Azmath Shaik, S. Kishore Kanna, and S. Padmanabhan, "Effective utilization and optimization of waste plastic oil with ethanol additive in diesel engine using full factorial design," *Mater. Today Proc.*, vol. 52, pp. 930–936, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.10.310.
- [14] A. K. Yadav, S. Maity, S. K. Yadav, V. Madav, G. N. Kumar, and S. Dutta, "Transforming plastic waste into liquid fuels: novel upgrading of polypropylene pyrolysis oil and its utilization in a diesel engine," *RSC Adv.*, vol. 16, no. 24, pp. 21693–21704, 2026, doi: 10.1039/d5ra09026a.
- [15] M. Bhowmik, M. Deb, and G. R. K. Sastry, "Performance and emission assessment of an indirect ignition diesel engine fuelled with waste plastic pyrolysis oil and ethanol blends," *Frontiers in Thermal Engineering*, vol. 5, Apr. 2025, doi: 10.3389/fther.2025.1548806.
- [16] A. Pumpuang, N. Klinkaew, K. Wathakit, A. Sukhom, and E. Sukjit, "The influence of plastic pyrolysis oil on fuel lubricity and diesel engine performance," *RSC Adv.*, vol. 14, no. 14, pp. 10070–10087, 2024, doi: 10.1039/d3ra08150h.
- [17] F. Faisal, M. G. Rasul, M. I. Jahirul, and A. A. Chowdhury, "Waste plastics pyrolytic oil is a source of diesel fuel: A recent review on diesel engine performance, emissions, and combustion characteristics," *Science of the Total Environment*, vol. 886, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.163756.
- [18] A. A. Yusuf *et al.*, "Experimental study on emissions and particulate characteristics of diesel engine fueled with plastic waste oil, acetone-butanol-ethanol and diesel blends," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 191, no. September, pp. 1419–1431, 2024, doi: 10.1016/j.psep.2024.09.060.
- [19] M. K. YEŞİLYURT, B. DOĞAN, and D. EROL, "Experimental assessment of a CI engine operating with 1-pentanol/diesel fuel blends," *International Journal of Automotive Science and Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 70–89, Jun. 2020, doi: 10.30939/IJASTECH.708517.
- [20] L. So Khuong, N. Hashimoto, and O. Fujita, "Spray, droplet evaporation, combustion, and emission characteristics of future transport fuels for compression-ignition engines: A review," *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 11, no. 4, pp. 575–613, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.JTTE.2024.04.003.

- [21] S. B. Ogunjide, W. Zhong, T. Pachiannan, and Y. Zhu, "Assessing the impacts of multiple injections of high n-pentanol blend on low load engine performance and emissions towards improved efficiency and a cleaner future," *Fuel*, vol. 405, p. 136588, Feb. 2026, doi: 10.1016/J.FUEL.2025.136588.
- [22] M. M. Khan, R. Chatterjee, S. M. M. Hasnain, J. Giri, and R. Zairov, "Effect of fuel injection parameters on the performance & emissions of biodiesel based CI engine-A review," *Results in Engineering*, vol. 24, p. 103180, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.RINENG.2024.103180.
- [23] D. H. T. Prasetyo, R. Sidartawan, A. Sanata, D. Yudhistiro, and R. Z. K. Nisak, "Analisis Biodiesel Sebagai Aditif Bahan Bakar Diesel Terhadap Kinerja dan Konsumsi Bahan Bakar Mesin Pembangkit Listrik," *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, vol. 13, no. 2, pp. 423–430, 2024, doi: 10.24127/trb.v13i2.3688.
- [24] H. Venu, P. Appavu, V. R. M., and J. Jayaraman, "Influence of nanoparticles on emission and performance characteristics of biodiesel-diesel blends in a DI diesel engine," *Australian Journal of Mechanical Engineering*, vol. 22, no. 2, pp. 371–386, 2024, doi: 10.1080/14484846.2022.2098574.
- [25] M. Bhowmik, M. Deb, and G. R. K. Sastry, "Performance and emission assessment of an indirect ignition diesel engine fuelled with waste plastic pyrolysis oil and ethanol blends," *Frontiers in Thermal Engineering*, vol. 5, Apr. 2025, doi: 10.3389/fther.2025.1548806.
- [26] M. Wan, F. Huang, L. Shen, and J. Lei, "Experimental investigation on effects of fuel injection and intake parameters on combustion and performance of a turbocharged diesel engine at different altitudes," *Front. Energy Res.*, vol. 10, p. 1090948, Jan. 2023, doi: 10.3389/FENRG.2022.1090948/TEXT.
- [27] Syarifudin, F. Fatkhurrozak, F. L. Sanjaya, E. Yohana, Syaiful, and A. Wibowo, "The Effect of Ethanol on Brake Torque, Brake Specific Fuel Consumption, Smoke Opacity, and Exhaust Gas Temperature of Diesel Engine 4JB1 Fueled by Diesel-Jatropha Oil," *Automotive Experiences*, vol. 5, no. 2, pp. 230–237, Apr. 2022, doi: 10.31603/AE.6447.
- [28] A. A. Rahim, I. Saad, N. W. M. Zulkifli, and M. N. A. M. Yusoff, "PERFORMANCE AND EMISSIONS OF DUAL ALCOHOL FUEL BLEND WITH B20 POME BIODIESEL IN DIESEL ENGINE," *J. Teknol.*, vol. 87, no. 3, pp. 455–463, May 2025, doi: 10.11113/JURNALTEKNOLOGI.V87.21791.
- [29] S. Dey *et al.*, "Optimization of CI Engine Performance and Emissions Using Alcohol–Biodiesel Blends: A Regression Analysis Approach," *Sustainability 2023, Vol. 15, Page 14667*, vol. 15, no. 20, p. 14667, Oct. 2023, doi: 10.3390/SU152014667.
- [30] N. Yilmaz, A. Atmanli, M. J. Hall, and F. M. Vigil, "Determination of the Optimum Blend Ratio of Diesel, Waste Oil Derived Biodiesel and 1-Pentanol Using the Response Surface Method," *Energies 2022, Vol. 15, Page 5144*, vol. 15, no. 14, p. 5144, Jul. 2022, doi: 10.3390/EN15145144.
- [31] F. Majedi, D. Setiyaningrum, S. M. T. Hidayatullah, and A. Abbas, "Effects of Injection Pressure on Output Power, BTE, SFC and Opacity in a Typical Single-Cylinder Diesel Engine," *Automotive Experiences*, vol. 3, no. 1, pp. 20–26, Apr. 2020, doi: 10.31603/AE.V3I1.3006.

Halaman ini sengaja dikosongkan  
(This page is intentionally left blank)