



Review article

## Karakteristik *Palm Oil* Biodiesel dan Performa Mesin Diesel : A Review

*Hutomo Jiwo Satrio*<sup>1\*</sup>, *Yulianto Joko Sumbogo*<sup>2</sup>, *Wibi Pramanda*<sup>3</sup>

<sup>1,\*</sup>Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro dan Informatika, Universitas Surakarta, **Indonesia**

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Mesin, Program Studi Teknik Mesin, Akademi Teknik Wacana Manunggal, **Indonesia**

<sup>3</sup>Program Studi Teknologi Rekayasa Pemeliharaan Alat Berat Politeknik Jambi, **Indonesia**

\*Corresponding author: [riohutomo@gmail.com](mailto:riohutomo@gmail.com)

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received : 29 June 2024

Revised : 18 August 2024

Accepted : 22 August 2024

Available online: 29 August 2024

**Keywords:** *crude palm oil, palm oil biodiesel, diesel engine, fuel, emissions*

**Kata Kunci:** *crude palm oil, palm oil biodiesel, diesel engine, bahan bakar, emisi*

### ABSTRACT

*This article is a descriptive review study on palm oil biodiesel and its comparison with diesel fuel. Crude Palm Oil (CPO) is the best raw material for biodiesel because it has similar fuel specifications to diesel fuel. Fuel specifications according to American Standard Testing and Material (ASTM) and European Standard (EN) specifications are kinematic viscosity, density, and flash point. Palm oil biodiesel has a higher Brake Specific Fuel Consumption (BSFC) value and a lower Brake Thermal Efficiency (BTE) value compared to diesel. Palm oil biodiesel has higher NOx emissions, but lower HC and CO emissions, than diesel. In addition, palm oil biodiesel can be used in diesel engines with little or no modification. It has higher density, cooler flow problems and lower calorific value. Biodiesel can be blended with diesel and used in various concentration ratios to produce biodiesel blends that have properties that comply with international standards on diesel engine fuel and emissions, resulting in improved diesel engine performance and reduced emissions.*

### ABSTRAK

Artikel ini merupakan studi review deskriptif tentang palm oil biodiesel dan perbandingannya dengan bahan bakar solar. *Crude Palm Oil* (CPO) merupakan bahan baku terbaik untuk biodiesel karena memiliki kesamaan spesifikasi bahan bakar dengan solar. Spesifikasi bahan bakar menurut standard *American Standard Testing and Material* (ASTM) dan spesifikasi *European*

*Standard* (EN) adalah viskositas kinematik, densitas, dan titik nyala (*flash point*). *Palm oil* biodiesel memiliki nilai *Brake Specific Fuel Consumption* (BSFC) lebih tinggi dan nilai *Brake Thermal Efficiency* (BTE) lebih rendah dibandingkan dengan solar. *Palm oil* biodiesel memiliki emisi NO<sub>x</sub> yang lebih tinggi, tetapi emisi HC dan CO lebih rendah, daripada solar. Selain itu, *palm oil* biodiesel dapat digunakan pada mesin diesel tanpa atau sedikit modifikasi. Biodiesel ini memiliki kepadatan yang lebih tinggi, masalah aliran yang lebih dingin dan nilai kalori lebih rendah. Biodiesel dapat dicampur dengan solar dan digunakan dalam berbagai konsentrasi rasio untuk menghasilkan biodiesel campuran yang mempunyai properties sesuai dengan standar internasional mengenai bahan bakar pada mesin diesel dan emisi, menghasilkan kinerja mesin diesel yang meningkat dan emisi berkurang.

---

## 1. PENDAHULUAN

Kondisi saat ini kebutuhan bahan bakar fosil berupa minyak bumi meningkat mengikuti meningkatnya populasi masyarakat dan teknologi yang berkembang, sumber daya minyak bumi dari bahan baku dasar fosil akan semakin menipis dikarenakan sifatnya yang tidak dapat diperbaharui [1]. Dalam kondisi seperti itu usaha mencari sumber energi alternatif sifatnya yang bisa diperbaharui (*renewable*) harus ditingkatkan. Bahan bakar minyak bumi berpotensi memberikan dampak buruk untuk lingkungan, karena emisi gas buang dapat menurunkan kualitas udara [2]. Sumber daya alami dapat digunakan sebagai pengganti minyak bumi seperti minyak nabati dan lemak hewani [3]. Biodiesel merupakan bahan bakar atau salah satu sumber energi alternatif yang banyak digunakan. Biodiesel yang diolah dari minyak nabati dapat digunakan sebagai pengganti minyak bumi karena bisa diperbaharui (*renewable*) dan dapat diproduksi dalam jumlah yang besar dan tidak mencemari lingkungan atau ramah lingkungan. [4] [5][6].

Minyak kelapa sawit olahan dari kelapa sawit merupakan minyak nabati yang dapat digunakan sebagai campuran biodiesel ini [7]-[8]. Penggunaan minyak kelapa sawit karena pada daerah di Indonesia terdapat banyak sekali potensi kelapa sawit yang dibudidayakan di sejumlah daerah di Indonesia khususnya di Sumatra dan Kalimantan.

Biodiesel terbuat dari konversi minyak nabati dan lemak hewani berbentuk trigliserida menjadi ester terutama methyl ester melalui proses esterifikasi atau Biodiesel bisa juga disebut *fatty acid methyl ester* (FAME) [9][10][11]. Biodiesel mempunyai sifat fisik yang mirip seperti dengan bahan bakar diesel petroleum atau diesel dari sumber daya fosil tetapi tidak beracun, dapat terbiodegradasi, dan ramah lingkungan [12][13]. Pembuatan produk biodiesel supaya komposisi dan karakteristik mirip dengan minyak diesel turunan minyak bumi (*diesel petroleum*) dapat dilakukan dengan metode seperti pencampuran dengan *diesel petroleum*, mikroemulsi, pirolisis, dan transesterifikasi [14][15].

Biodiesel bisa dicampur dengan diesel petroleum menggunakan rasio percampuran yang sudah diteliti. Pada umumnya campuran biodiesel dibawah 20% (B20), bisa digunakan pada mesin diesel konvensional tanpa modifikasi maupun sedikit modifikasi [16]-[17]. Akan tetapi, pabrik yang

merekomendasikan mengoperasikan mesin buaatannya dengan rasio campuran yang lebih tinggi dari B5 [18][19]. Nilai campuran bisa lebih ditingkatkan apabila kualitas bahan bakar biodiesel meningkat. Di Indonesia sendiri melalui Kementerian Sumber Daya Mineral (ESDM) membuat kebijakan untuk menerapkan B30 pada tahun ini dan juga untuk kemajuan penelitian meningkatkan pencampuran biodiesel sampai B100 atau biodiesel tanpa campuran dari diesel petroleum (biodiesel murni).

Biodiesel dengan campuran minyak kelapa sawit terdapat emisi NOx lebih tinggi daripada diesel petroleum atau bahan bakar solar akibat adanya campuran 20% (B20) [20][21]. Meningkatnya emisi NOx dalam biodiesel ini terkait injeksi bahan bakar pada mesin diesel karena mempunyai kepadatan yang lebih tinggi daripada dengan diesel petroleum atau solar. Injeksi akan lebih cepat memasuki ruang bakar dan waktu tunggu lebih lama pada saat proses pembakaran yang sedang terjadi [22][23]. Peristiwa ini juga bisa disebut dengan ignition delay. Ignition delay mengakibatkan biodiesel bercampur dengan udara sebelum terjadinya proses pembakaran. Apabila campuran udara dan bahan bakar semakin besar terjadi pembakaran yang sempurna dan lebih cepat diikuti dengan adanya peningkatan suhu maupun tekanan pada silinder [24][25].

Perkembangan biodiesel dari minyak kelapa sawit ini akan terus menjadi tantangan bagi peneliti dan industri kendaraan. Karakteristik dari *Crude Palm Oil* (CPO) sendiri harus diketahui karena dapat mempengaruhi dari performa mesin diesel yang akan digunakan. Oleh karena itu, tujuan dari artikel review ini adalah untuk memberikan gambaran kepada pembaca tentang studi terbaru yang dilakukan untuk mengurangi konsumsi penggunaan diesel petroleum (solar) digantikan dengan *palm oil* biodiesel dan mengetahui karakteristik dari *palm oil* biodiesel yang akan digunakan pada kendaraan bermesin diesel.

## 2. PALM OIL BIODIESEL

*Palm Oil* Biodiesel digunakan sebagai pengganti dari diesel petroleum (solar) tidak dapat secara langsung digunakan pada mesin diesel [26]. Biodiesel sendiri mempunyai viskositas yang lebih tinggi ketika bahan bakar diinjeksikan ke dalam ruang bakar, pengaruh buruk terhadap spray bahan bakar, proses pencampuran dan penguapan bahan bakar udara dapat menyebabkan kandungan emisi yang tinggi yaitu berupa emisi CO dan HC [27][28]. Dampak buruk yang akan terjadi adalah penyumbatan pada saringan bahan bakar, injektor tersumbat, pembentukan karbon deposit dan mempercepat minyak pelumas [29][30][31].

Penggunaan minyak kelapa sawit sebagai bahan bakar biodiesel tidak praktis karena molekulnya yang besar, volatilitas rendah, dan viskositas yang tinggi yang akan mengurangi kinerja pada mesin diesel [32]. Senyawa pada minyak nabati ini dapat menyebabkan kerusakan pada mesin karena menyebabkan terbentuknya deposit pada nozzle dan pompa injektor bahan bakar [33][34][35]. Dalam spesifikasi *American Standard Testing and Material* (ASTM) dan spesifikasi *European Standard* (EN) telah mengatur kesesuaian dari komposisi biodiesel sendiri agar dapat digunakan sebagai bahan bakar mesin diesel. Berikut ini merupakan rangkuman karakteristik dan komposisi biodiesel berdasarkan standard.

**Tabel 1.** Komposisi Standard Biodiesel [36]-[37]

| <i>Properties</i>                                  | <b>EN 14214</b> | <b>ASTM D6751</b> |
|--|-----------------|-------------------|
| <i>Flash point, min (°C)</i>                       | ≥120            | 100–170           |
| <i>Cloud point(°C)</i>                             | -               | -3–12             |
| <i>Pour point (°C)</i>                             | -               | -15–16            |
| <i>Viscosity kinematic 40°C (mm<sup>2</sup>/s)</i> | 3.5–5.0         | 1.9–6.0           |
| <i>Specific gravity (Sg) 15 °C (kg/L)</i>          | 0.86–0.90       | 0.88              |
| <i>Density at 15 °C (kg/m<sup>3</sup>)</i>         | 820–900         | 820–900           |
| <i>Cetana number, min</i>                          | 51              | 47                |
| <i>Iodine number, max</i>                          | 120             | -                 |
| <i>Acid number, max (mg KOH/g)</i>                 | 0.50            | 0.50              |
| <i>Ash (wt %)</i>                                  | -               | 0.02              |
| <i>Sulphated ash, max % (m/m)</i>                  | 0.02            | 0.02              |
| <i>Oxidation stability, min (h, 110 °C)</i>        | 6               | 3                 |
| <i>Water and sediment, max (v/v %)</i>             | 0.03            | 0.05              |
| <i>Content water, max</i>                          | 500 (mg/kg)     | 0.03 (v/v)        |
| <i>Free glycerol, max (mass %)</i>                 | 0.02            | 0.02              |
| <i>Total glycerol, max (mass %)</i>                | 0.25            | 0.24              |
| <i>Sulphur , max</i>                               | 10 mg/kg        | 0.05% (m/m)       |
| <i>Phosphor, max</i>                               | 10 mg/kg        | 0.001% (m/m)      |

Biodiesel dapat dibuat dari bahan baku minyak nabati dan minyak hewani. Sifat kimia dan sifat fisik biodiesel dihasilkan dan dipengaruhi dari bahan baku yang digunakan [38]. Komposisi biodiesel dari berbagai jenis bahan baku untuk membuatnya dapat dilihat pada tabel 2 berikut ini

**Tabel 2.** Komposisi berbagai jenis biodiesel [39]-[40]

| Jenis Biodiesel        | Kinematik Viscositas (40°C;mm <sup>2</sup> /s) | Nilai Iodin | Angka Setana | Angka Saponifikasi | Nilai kalor |
|------------------------|--|-------------|--------------|--------------------|-------------|
| <i>Petro-diesel</i>    | 2.5–5.7  | -           | 45–55        | -                  | 42–44.3     |
| <i>Palm oil</i>        | 4.42–4.76                                      | 35–61       | 59.9–62.8    | 186–209            | 37.2–39.91  |
| <i>Soybean</i>         | 4.08–4.42                                      | 117–143     | 37–52        | 201                | 37.3–39.6   |
| <i>Rapeseed</i>        | 4.59–5.83.                                     | 94–120      | 37.6–56      | - *                | 37.3–39.9   |
| <i>Sunflower</i>       | 4.38–4.90                                      | 110–143     | 45–51        | 200                | 37.5–39.95  |
| <i>Peanut</i>          | 4.42–5.25                                      | 67.45       | 54           | 200                | 39.7        |
| <i>Cotton seed</i>     | 4.0–9.6  | 90–119      | 41.2–59.5    | 204                | 37.5–41.68  |
| <i>Jatropha curcas</i> | 3.7–5.8  | 92–112      | 46–55        | 177–189            | 42.67       |
| <i>Fungi</i>           | 4.52–4.69                                      | 54.81–91.50 | 56.22–61.24  | 190–217            | 39.63–40.49 |
| <i>Yeast</i>           | 3.6–6.44                                       | 37.8–65.7   | 50.8–59.0    | 168.5–190.81       | 36.77–41.25 |

Tabel 2 menunjukkan biodiesel berbahan baku dasar *crude palm oil* (CPO) menunjukkan sifat yang lebih baik dibandingkan biodiesel yang dibuat dari bahan lain terutama pada komposisi angka setana dan nilai iodin [41][42][43]. Komposisi terpenting dari bahan bakar adalah angka setana [44]. Angka setana menunjukkan nilai waktu pembakaran yang mempengaruhi kualitas pembakaran [45]. Angka setana tinggi memiliki keunggulan terutama menyangkut emisi gas buang yang semakin bersih dan meningkatkan performa kinerja engine diesel [46]. Biodiesel dengan kelapa sawit (*palm oil* biodiesel) memiliki angka setana yang tinggi berarti pada proses pembakaran bahan bakar cepat terbakar habis dan kinerja mesin berjalan lancar dengan lebih sedikit adanya knocking [47].

Komposisi dari biodiesel berupa viskositas kinematik mempengaruhi ukuran butiran, aliran, atomisasi, dan proses pembakaran. Nilai iodin juga menunjukkan ketidakjenuhan asam lemak sebagai penyusun minyak dan lemak sehingga mempengaruhi pada titik lebur stabilitas oksidatif, dan kualitas penyimpanan. Angka saponifikasi dalam biodiesel menunjukkan jumlah asam lemak dan bersama iodin mempengaruhi nilai kalor [48].

Biodiesel dihasilkan dari berbagai sumber daya alam dan terbarukan merupakan alternatif untuk menggantikan diesel petroleum (solar) sebagai bahan bakar alat transportasi bermesin diesel. Pada Tabel 2 menunjukkan bahwa beberapa sumber daya sebagai bahan baku biodiesel memiliki keunggulan dalam komposisi dibandingkan dengan diesel petroleum (solar). Sebagai contoh adalah angka setana yang tinggi dapat meningkatkan performa kinerja mesin dan mengurangi emisi, kadar abu rendah, dan residu karbon rendah, sedangkan untuk komposisi yang lainnya dianggap masih kurang dan dapat ditingkatkan dengan menggunakan beberapa proses pencampuran. Suatu parameter emisi gas buang dari biodiesel yang berbahan baku rapesees methyl ester menghasilkan emisi CO dan NO<sub>x</sub> yang rendah dimana sebagai salah satu perhatian utama untuk perancangan mesin atau bahan bakar [49].

### **3. PERBANDINGAN SOLAR DENGAN *PALM OIL BIODIESEL***

Biodiesel merupakan bahan bakar terbarukan yang berkelanjutan yang dapat diproduksi dalam jumlah yang besar, dengan demikian biodiesel dapat mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar bersumber dari minyak bumi (solar). Dalam komposisi atau properties dalam biodiesel memiliki titik nyala yang lebih tinggi daripada bahan bakar diesel petroleum atau solar sehingga lebih aman dalam segi penyimpanan, emisi yang dihasilkan rendah dan ramah lingkungan, biodegradable, tidak beracun, tumpahan dari bahan bakar biodiesel lebih mudah untuk dibersihkan sehingga biaya pembersihan murah [50].

Biodiesel tidak mengandung sulfur, hidrokarbon aromatik dan logam mentah, berdasarkan komposisi dari residu dan komposisi gas buang memiliki efisiensi lebih tinggi, mengandung jumlah kadar oksigen dalam bahan bakar yang tinggi 10% sampai 12% berat yang secara signifikan dapat berkontribusi dalam proses pembakaran. Biodiesel bisa digunakan langsung sebagai bahan bakar tanpa adanya modifikasi karena kompatibel dengan mesin diesel yang sudah ada. Biodiesel juga memiliki kandungan emisi NO<sub>x</sub> relatif tinggi selama proses pembakaran

dibandingkan solar. Penggunaan dalam bentuk biodiesel murni akan mengkristal menjadi gel sehingga lebih sering mengganti penyaring bahan bakar terutama pada tahap awal penggunaan biodiesel [51].

Biodiesel dalam kandungannya mempunyai viskositas yang lebih tinggi sehingga menghasilkan atomisasi bahan bakar yang buruk dan mengakibatkan pembakaran menjadi tidak sempurna. Biodiesel menghasilkan kinerja mesin yang lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar solar, sehingga konsumsi bahan bakar mesin menjadi lebih tinggi daripada bahan bakar solar [52].

Biodiesel memiliki nilai kalor dan volatilitas yang lebih rendah, stabilitas oksidasi lebih rendah, higroskopis, dan bersifat sebagai pelarut, yang menyebabkan korosi pada komponen mesin, pada komponen berbahan plastik yang digunakan untuk klem, selang, cat, dan coating, dapat mengakibatkan pengenceran dan polimerisasi pada minyak pelumas mesin.

Nilai efisiensi pembakaran biodiesel dinilai lebih baik dan kandungan angka setana yang lebih tinggi dibandingkan solar. Dibandingkan dengan solar biodiesel memiliki kandungan aromatik dan senyawa sulfur rendah sehingga emisi gas buang berbahaya yang dihasilkan akan rendah. Biodiesel juga dapat terdegradasi alami secara biologis mencapai lebih dari 90% dalam waktu 21 hari [53]. Kandungan biodiesel tidak beracun dan ramah lingkungan. Biodiesel ini kompatibel dengan mesin diesel yang ada sehingga tanpa perlu modifikasi biodiesel ini dapat digunakan. Sumber biodiesel merupakan terbaharukan yang tersedia di berbagai tempat dan jumlahnya yang banyak. Berikut ini Tabel 3 merupakan perbandingan kandungan atau properties utama yang menyangkut pembakaran pada biodiesel dan solar.

**Tabel 3.** Perbandingan kandungan solar dengan biodiesel[12][14][54]

| <b>Propertis bahan bakar</b>                        | <b>Palm biodiesel</b> | <b>Palm biodiesel Methyl ester</b> | <b>Solar</b> |
|---|-----------------------|------------------------------------|--------------|
| Densitas pada 15 °C, g/ml                           | 0.925                 | 0.877                              | 0.827        |
| Kinematik Viskositas pada 40 °C, mm <sup>2</sup> /s | 41                    | 4.56                               | 2.28         |
| Titik nyala, °C                                     | 260                   | 196                                | 64           |

Pada Tabel 3 menunjukkan biodiesel dapat menjadi pilihan pengganti solar karena memiliki kandungan atau properties yang hampir sama. Properties ini sangat penting karena biodiesel dapat digunakan langsung sebagai bahan bakar tanpa harus mengubah sistem bahan bakar dan sistem pengapian pada mesin diesel yang tersedia.

*Crude Palm Oil* (CPO) yang dihasilkan dari minyak kelapa sawit dapat digunakan secara langsung tanpa adanya modifikasi. Biodiesel dapat dicampur dengan solar dengan berbagai tingkat presentase. Berikut ini merupakan perbandingan kandungan campuran dari biodiesel dengan solar.



**Tabel 4.** Perbandingan kandungan campuran solar dengan biodiesel [14][39][55]

| Bahan Bakar              | Densitas pada 15°C g/ml | Kinematik viscositas pada 40 °C, mm <sup>2</sup> /s | Titik nyala, °C |
|--------------------------|-------------------------|---|-----------------|
| Petroleum Diesel (Solar) | 0.827                   | 2.28  | 64              |
| B5                       | 0.830                   | 2.34  | 66              |
| B10                      | 0.833                   | 2.49  | 69              |
| B15                      | 0.834                   | 2.67  | 70.5            |
| B20                      | 0.835                   | 2.82  | 71.5            |
| B30                      | 0.841                   | 2.85  | 82              |
| B100                     | 0.877                   | 4.56  | 196             |

Pada Tabel 4 menunjukkan bahwa pencampuran biodiesel dengan solar mempengaruhi nilai densitas, kinematik viskositas, dan titik nyala. Semakin sedikit biodiesel dicampur dengan solar maka nilainya akan semakin tinggi. Dengan demikian kandungan biodiesel murni atau B100 mempunyai kandungan yang efisien untuk menggantikan bahan bakar solar.

#### 4. PENGARUH PALM OIL BIODIESEL TERHADAP PERFORMA MESIN DIESEL

*Palm Oil* Biodiesel mampu menurunkan emisi gas rumah kaca sampai 50% - 70% dibandingkan dengan solar. Dalam penelitian pada bus dengan mesin mercedes (diesel engine) bahan bakar biodiesel ini mampu menempuh jarak 300.000 hingga 350.000 km. Dalam pengoperasian menggunakan bahan bakar biodiesel, kendaraan bus ini mampu dijalankan dengan baik meskipun mesin dirancang menggunakan bahan bakar solar dan tidak adanya modifikasi dalam mesin. Selama pengoperasian menggunakan bahan bakar palm oil biodiesel tidak terjadi adanya knocking dan suara mesin halus ketika mesin start. Setelah kendaraan menempuh batas jarak tertentu, dilakukan pengecekan dalam oli mesin hasilnya bagus dan menunjukkan performa normal. Emisi yang dihasilkan menggunakan bahan bakar biodiesel jauh lebih bersih, penumpukan karbon pada nozzle engine dalam batas normal dan konsumsi bahan bakar sebanding dengan bahan bakar solar. Biodiesel memiliki titik nyala yang tinggi sehingga tidak menghasilkan uap yang mudah meledak. Kelemahan dari pemakaian biodiesel ini adanya kerusakan pada bahan pengikat, hose and seal, yang terbuat dari karet dan produk plastik rendah [56].

Biodiesel digunakan sebagai pengganti solar, ditemukan bahwa *Brake Specific Fuel Consumption* (BSFC) dan *Brake Thermal Efficiency* (BTE) kondisinya menurun. Akan tetapi, gas buang emisi CO, hidrokarbon, dan asap berkurang [57].

Performa mesin diesel dan karakteristik emisi gas buang untuk tiga jenis biodiesel yaitu yang berasal dari *Crude Palm Oil* (CPO), limbah minyak jarak, dan limbah minyak goreng diuji dengan torsi yang sama pada tiap variasi putaran mesin 1200 rpm, 1600 rpm, dan 2000 rpm dan ditemukan bahwa performa mesin yang menggunakan bahan bakar *Crude Palm Oil* (CPO) meningkat, *Brake Thermal Efficiency* (BTE) sedikit meningkat, sedangkan *Brake Specific Fuel Consumption* (BSFC) dan emisi gas buang menurun dibandingkan solar. Untuk bahan bakar dari *Crude Palm*

*Oil* (CPO) terjadi pengurangan emisi CO, CO<sub>2</sub>, dan HC [58].

Secara signifikan terjadi penurunan emisi NO<sub>x</sub> lebih rendah dengan bahan bakar biodiesel minyak kelapa sawit dibandingkan dengan solar yang dicampur dengan 20% dan 50% palm biodiesel. Solar memberikan emisi lebih tinggi dibandingkan dengan biodiesel B10, B30, dan B50 pada variasi torsi dan putaran konstan. Dalam pengujian emisi kondisi steady-state menggunakan kecepatan dan nilai beban konstan yang mewakili kondisi kendaraan saat berkendara di jalan dan melaporkan penurunan emisi NO<sub>x</sub> 5% untuk biodiesel B100 [59].

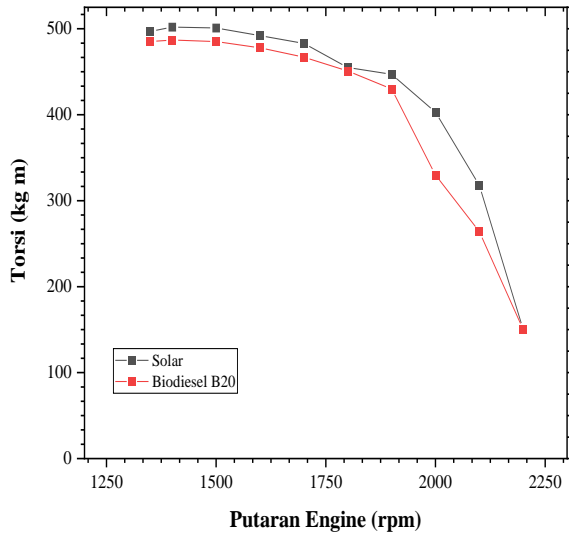
*Palm Oil* Biodiesel menunjukkan kemampuan untuk disimpan dengan sedikit degradasi dalam karakteristik bahan bakar. Akan tetapi, warna bahan bakar biodiesel ini mengalami perubahan warna dari orange ke kuning muda setelah disimpan selama lebih dari enam bulan. Perubahan warna ini disebabkan oleh pemecahan karoten dalam ester metil. Selain itu, palm oil biodiesel dengan titik tuang rendah menunjukkan sifat bahan bakar yang sebanding dengan solar [60].

Biodiesel B20, B35, B100 memiliki torsi yang lebih rendah dibandingkan dengan solar. *Brake Specific Fuel Consumption* (BSFC) lebih tinggi pada B100 diikuti dengan B35 dan B20 jika dibandingkan dengan solar. Emisi CO<sub>2</sub> biodiesel B20 dan B35 lebih rendah dibandingkan dengan solar, akan tetapi biodiesel B100 lebih tinggi dari pada solar. Sedangkan emisi NO<sub>x</sub> biodiesel lebih tinggi dibandingkan dengan solar. Emisi CO lebih rendah dari solar. Emisi HC, pada B25 menunjukkan lebih tinggi dari solar sedangkan B50, B75 dan B100 lebih rendah dari solar. Sedangkan CO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> emisi lebih tinggi dari solar karena pembakaran yang terjadi lebih sempurna, suhu pembakaran lebih tinggi dan kandungan oksigen dalam bahan bakar tinggi [61]. Emisi yang dihasilkan biodiesel berupa HC dan CO lebih rendah dibandingkan dengan solar. Emisi HC lebih tinggi pada beban parsial dan lebih rendah pada beban yang lebih tinggi dibandingkan dengan solar dan NO<sub>x</sub> lebih rendah daripada solar. Emisi asap lebih tinggi pada beban rendah dan menjadi lebih rendah pada beban yang lebih tinggi dibandingkan dengan solar. Biodiesel B20, B30, B40, B100 pada hasil penelitian menunjukkan bahwa *Brake Thermal Efficiency* (BTE) lebih rendah dari solar dan akan berkurang seiring dengan peningkatan rasio campuran, sedangkan *Brake Specific Fuel Consumption* (BSFC) lebih tinggi dari solar dan akan meningkat seiring dengan rasio campuran [62] [63].

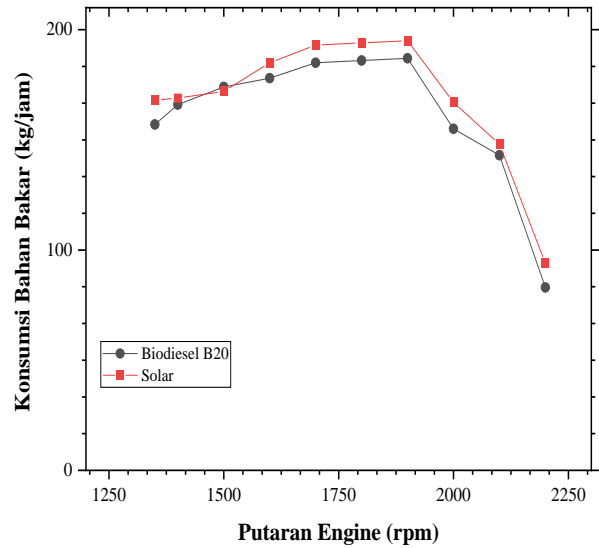
Biodiesel untuk B10, B20, B30, B40, B50 memiliki *Brake Thermal Efficiency* (BTE) lebih rendah daripada solar dan akan bertambah seiring meningkatnya beban. Akan tetapi, untuk rasio campuran biodiesel yang lebih rendah dapat meningkatkan *Brake Thermal Efficiency* (BTE), untuk *Brake Specific Fuel Consumption* (BSFC) juga akan meningkat. Secara keseluruhan HC dan CO yang dihasilkan biodiesel ini lebih rendah dari solar. Selain itu, formasi NO<sub>x</sub> memiliki kandungan yang lebih tinggi dari solar dan nilainya semakin meningkat seiring dengan bertambahnya rasio campuran volume biodiesel dikarenakan suhu yang dihasilkan lebih tinggi pada pembakaran dan adanya oksigen pada bahan bakar campuran biodiesel. Pada bahan bakar biodiesel B100 *Brake Thermal Efficiency* (BTE) yang diteliti dan diuji hampir identik dengan bahan bakar solar sementara itu *Brake Specific Fuel Consumption* (BSFC) mempunyai nilai lebih tinggi, sedangkan HC, asap, dan NO<sub>x</sub> lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar solar [64][65][66].



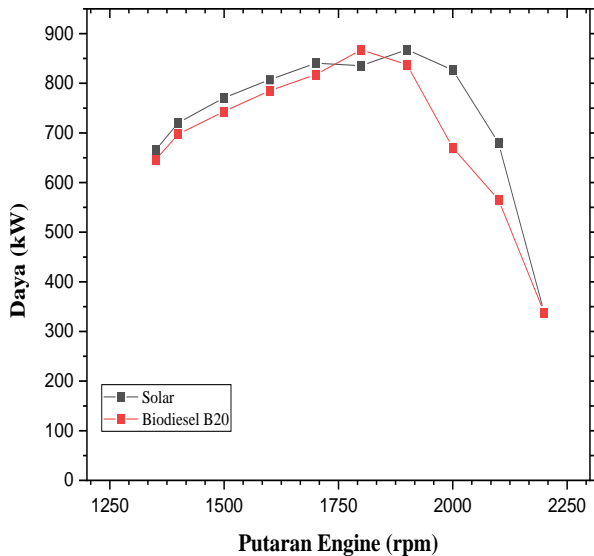
Perbandingan dalam performa mesin diesel berbahan bakar solar dan biodiesel akan disajikan dalam bentuk grafik. Perbandingan yang akan disajikan antara lain : perbandingan konsumsi bahan bakar solar dengan biodiesel, torsi, daya, *Brake Specific Fuel Consumption* (BSFC), dan *Brake Thermal Efficiency* (BTE).



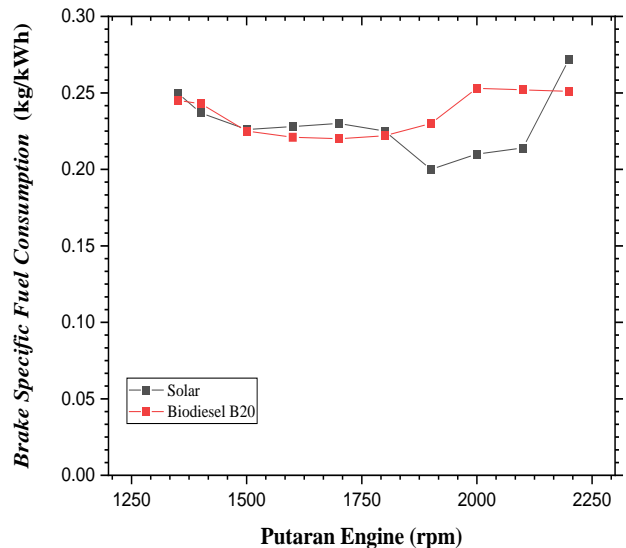
a. Torsi



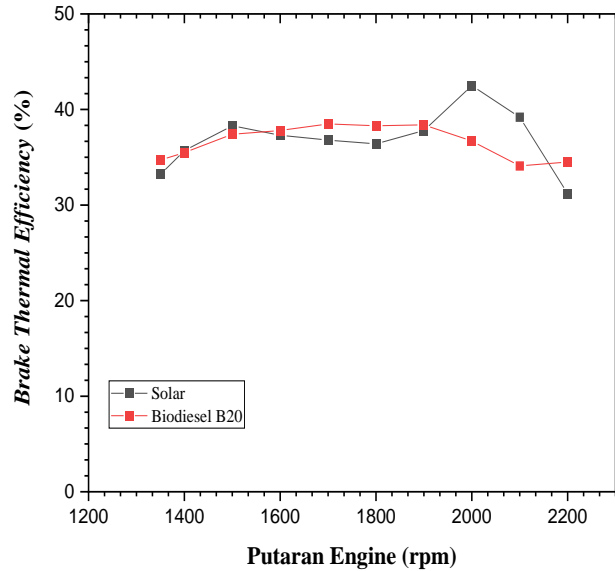
b. Bahan Bakar



c. Daya



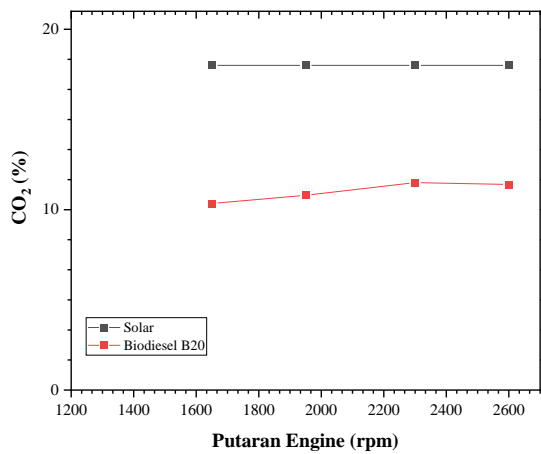
d. Brake Specific Fuel Consumption (BSFC)



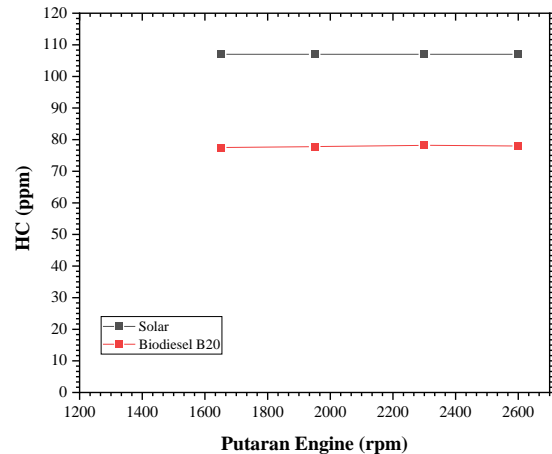
d. Brake Thermal Efficiency (BTE)

**Gambar 1.** Perbandingan Putaran Engine dengan Bahan Bakar, Torsi, Daya, BSFC, dan BTE [23] [45][67] [68]

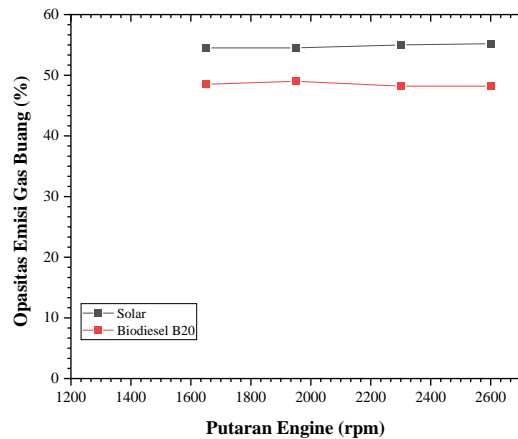
Berikut ini merupakan perbandingan emisi gas buang yang dihasilkan kendaraan menggunakan bahan bakar solar dengan biodiesel. Perbandingan yang akan disajikan antara lain kandungan emisi HC, CO, dan opasitas gas buang terhadap putaran mesin.



(a) CO<sub>2</sub>



(b) HC



(c) Opasitas Gas Buang

**Gambar 2.** Perbandingan Emisi Gas Buang [47][53][63]

Hasil review penelitian-penelitian yang sudah dijelaskan menunjukkan bahwa biodiesel crude palm oil (CPO) yang berasal dari minyak kelapa sawit bisa digunakan secara langsung pada mesin diesel (diesel engine) tanpa adanya modifikasi bisa juga dengan sedikit modifikasi. Akan tetapi, beberapa peneliti melaporkan bahwa palm oil biodiesel ini dan campuran dari biodiesel memiliki *Brake Thermal Efficiency* (BTE) lebih rendah dibandingkan dengan solar sedangkan untuk nilai *Brake Specific Fuel Consumption* (BSFC) palm oil biodiesel dan campurannya memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan solar. Untuk dari segi emisi gas buang yang dihasilkan oleh bahan bakar palm oil biodiesel dan campurannya menghasilkan NO<sub>x</sub> lebih tinggi dibandingkan solar sedangkan untuk emisi HC dan CO palm oil biodiesel lebih rendah dibandingkan dengan solar. Emisi asap yang dihasilkan dari biodiesel lebih tinggi pada beban rendah dan menjadi lebih rendah pada beban yang lebih tinggi dibandingkan dengan bahan bakar solar.

## 5. KESIMPULAN

*Crude Palm Oil* (CPO) yang dimanfaatkan sebagai bahan bakar berupa biodiesel memiliki performa yang hampir mirip dengan bahan bakar solar. Biodiesel juga dapat meningkatkan kinerja performa mesin diesel karena memiliki angka setana yang lebih tinggi. Emisi yang dihasilkan dari biodiesel dapat dikurangi karena memiliki angka setana yang tinggi. Pengaruh dari palm oil biodiesel dalam mesin diesel adalah nilai *Brake Thermal Efficiency* (BTE) dan *Brake Consumption Fuel Consumption* (BSFC) menurun. Akan tetapi, dari segi emisi gas buang CO & HC, suhu, dan asap yang dihasilkan berkurang. Komposisi biodiesel B10, B20, B30, B50, B100 atau campuran biodiesel menunjukkan emisi gas buang CO dan HC sedikit lebih rendah dibandingkan dengan solar. Sedangkan, emisi NO<sub>x</sub> yang dihasilkan dari biodiesel memiliki kandungan yang lebih tinggi daripada bahan bakar solar.

Karakteristik dari biodiesel dapat digunakan secara langsung pada mesin diesel tanpa adanya modifikasi atau sedikit modifikasi karena biodiesel memiliki properties yang hampir sama

dengan bahan bakar solar seperti nilai heating value. Biodiesel tidak mengandung belerang, hidrokarbon aromatik, dan logam mentah, berdasarkan properties dari residu dan komposisi gas buang memiliki efisiensi pembakaran yang lebih tinggi, mengandung jumlah Oksigen 10% sampai 12% berat.

*Palm oil* biodiesel dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif yang dapat diperbaharui karena ramah lingkungan dan mempunyai komposisi karakteristik yang hampir sama dengan bahan bakar solar. *Standard American Standard Testing and Material (ASTM)* dan *European Standard (EN)* telah mengatur kesesuaian komposisi biodiesel yang digunakan sebagai acuan penggunaan biodiesel karena dapat dipakai langsung sebagai bahan bakar pengganti solar tanpa harus mengubah sistem bahan bakar pada mesin diesel standard.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Sinha, A. K. Agarwal, and S. Garg, "Biodiesel development from rice bran oil: Transesterification process optimization and fuel characterization," *Energy Conversion and Management*, vol. 49, no. 5, pp. 1248–1257, 2008, doi: 10.1016/j.enconman.2007.08.010.
- [2] S. Mekhilef, S. Siga, and R. Saidur, "A review on palm oil biodiesel as a source of renewable fuel," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 4, pp. 1937–1949, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.12.012.
- [3] P. D. Patil and S. Deng, "Optimization of biodiesel production from edible and non-edible vegetable oils," *Fuel*, vol. 88, no. 7, pp. 1302–1306, 2009, doi: 10.1016/j.fuel.2009.01.016.
- [4] J. Van Gerpen, "Biodiesel processing and production," *Fuel Processing Technology*, vol. 86, no. 10, pp. 1097–1107, 2005, doi: 10.1016/j.fuproc.2004.11.005.
- [5] A. Talebian-Kiakalaieh, N. A. S. Amin, and H. Mazaheri, "A review on novel processes of biodiesel production from waste cooking oil," *Applied Energy*, vol. 104, pp. 683–710, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.11.061.
- [6] J. A. Ramirez, R. J. Brown, and T. J. Rainey, "A review of hydrothermal liquefaction bio-crude properties and prospects for upgrading to transportation fuels," *Energies*, vol. 8, no. 7, pp. 6765–6794, 2015, doi: 10.3390/en8076765.
- [7] H. Altitude, E. Research, and P. Refining, "COMBUSTION OF FAT A N D VEGETABLE OIL DERIVED FUELS IN DIESEL ENGINES Michael S. Graboski\* and Robert L. McCormick," *Science*, vol. 24, no. 97, pp. 125–164, 1998.
- [8] A. Demirbas, "Progress and recent trends in biodiesel fuels," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 1, pp. 14–34, 2009, doi: 10.1016/j.enconman.2008.09.001.
- [9] N. Yilmaz and B. Morton, "Effects of preheating vegetable oils on performance and emission characteristics of two diesel engines," *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 5, pp. 2028–2033, 2011, doi: 10.1016/j.biombioe.2011.01.052.
- [10] L. T. Thanh, K. Okitsu, L. Van Boi, and Y. Maeda, "Catalytic technologies for biodiesel fuel production and utilization of glycerol: A review," *Catalysts*, vol. 2, no. 1, pp. 191–222, 2012, doi: 10.3390/catal2010191.
- [11] K. J. Harrington, "Chemical and physical properties of vegetable oil esters and their effect on diesel fuel performance," *Biomass*, vol. 9, no. 1, pp. 1–17, 1986, doi: 10.1016/0144-4565(86)90008-9.
- [12] J. Xue, T. E. Grift, and A. C. Hansen, "Effect of biodiesel on engine performances and emissions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 2, pp. 1098–1116, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.11.016.
- [13] A. E. Atabani, A. S. Silitonga, I. A. Badruddin, T. M. I. Mahlia, H. H. Masjuki, and S. Mekhilef, "A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics,"

- Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, no. 4, pp. 2070–2093, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.01.003.
- [14] S. Bari, T. H. Lim, and C. W. Yu, “Effects of preheating of crude palm oil (CPO) on injection system, performance and emission of a diesel engine,” *Renewable Energy*, vol. 27, no. 3, pp. 339–351, 2002, doi: 10.1016/S0960-1481(02)00010-1.
- [15] A. Demirbaş, “Fuel properties and calculation of higher heating values of vegetable oils,” *Fuel*, vol. 77, no. 9–10, pp. 1117–1120, 1998, doi: 10.1016/S0016-2361(97)00289-5.
- [16] W. N. M. Wan Ghazali, R. Mamat, H. H. Masjuki, and G. Najafi, “Effects of biodiesel from different feedstocks on engine performance and emissions: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, pp. 585–602, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.06.031.
- [17] E. N. Ali and C. I. Tay, “Characterization of biodiesel produced from palm oil via base catalyzed transesterification,” *Procedia Engineering*, vol. 53, pp. 7–12, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.02.002.
- [18] A. Ahmad, A. Buang, and A. H. Bhat, “Renewable and sustainable bioenergy production from microalgal co-cultivation with palm oil mill effluent (POME): A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65, pp. 214–234, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.06.084.
- [19] S. Kamat, M. Khot, S. Zinjarde, A. RaviKumar, and W. N. Gade, “Coupled production of single cell oil as biodiesel feedstock, xylitol and xylanase from sugarcane bagasse in a biorefinery concept using fungi from the tropical mangrove wetlands,” *Bioresource Technology*, vol. 135, pp. 246–253, 2013, doi: 10.1016/j.biortech.2012.11.059.
- [20] M. A. Vieira da Silva, B. Lagnier Gil Ferreira, L. G. da Costa Marques, A. Lamare Soares Murta, and M. A. Vascelos de Freitas, “Comparative study of NO<sub>x</sub> emissions of biodiesel-diesel blends from soybean, palm and waste frying oils using methyl and ethyl transesterification routes,” *Fuel*, vol. 194, pp. 144–156, 2017, doi: 10.1016/j.fuel.2016.12.084.
- [21] O. Schröder, J. Krahl, A. Munack, and J. Bünger, “Environmental and health effects caused by the use of biodiesel,” *SAE Technical Papers*, no. 724, 1999, doi: 10.4271/1999-01-3561.
- [22] R. P. Rodríguez, R. Sierens, and S. Verhelst, “Ignition delay in a palm oil and rapeseed oil biodiesel fuelled engine and predictive correlations for the ignition delay period,” *Fuel*, vol. 90, no. 2, pp. 766–772, 2011, doi: 10.1016/j.fuel.2010.10.027.
- [23] C. Yi Linn and M. R. Abu Mansor, “Performance and Emission of Palm Oil Methyl Ester Biodiesel with Various Additives in Direct Injection Diesel Engine,” *Journal of Advanced Research in Materials Science*, vol. 72, no. 1, pp. 1–14, 2020, doi: 10.37934/arms.72.1.114.
- [24] M. Pugazhavadivu and K. Jeyachandran, “Investigations on the performance and exhaust emissions of a diesel engine using preheated waste frying oil as fuel,” *Renewable Energy*, vol. 30, no. 14, pp. 2189–2202, 2005, doi: 10.1016/j.renene.2005.02.001.
- [25] N. H. Abu-Hamdeh, R. A. R. Bantan, A. Alimoradi, and S. H. Pourhoseini, “The effect of injection pressure on the thermal performance and emission characteristics of an oil burner operating on B20 palm oil biodiesel-diesel blend fuel,” *Fuel*, vol. 278, no. December 2019, p. 118174, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.118174.
- [26] S. H. Pourhoseini, M. Namvar-Mahboub, E. Hosseini, and A. Alimoradi, “A comparative exploration of thermal, radiative and pollutant emission characteristics of oil burner flame using palm oil biodiesel-diesel blend fuel and diesel fuel,” vol. 217. Elsevier Ltd, 2021. doi: 10.1016/j.energy.2020.119338.
- [27] M. Canakci, A. N. Ozsezen, E. Arcaklioglu, and A. Erdil, “Prediction of performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with biodiesel produced from waste frying palm oil,” *Expert Systems with Applications*, vol. 36, no. 5, pp. 9268–9280, 2009, doi: 10.1016/j.eswa.2008.12.005.
- [28] C. C. Chong et al., “A review over the role of catalysts for selective short-chain polyglycerol production from biodiesel derived waste glycerol,” *Environmental Technology and Innovation*, vol. 19, p. 100859, 2020, doi: 10.1016/j.eti.2020.100859.
- [29] P. Benjumea, J. Agudelo, and A. Agudelo, “Basic properties of palm oil biodiesel-diesel blends,” *Fuel*,

- vol. 87, no. 10–11, pp. 2069–2075, 2008, doi: 10.1016/j.fuel.2007.11.004.
- [30] P. Benjumea, J. Agudelo, and A. Agudelo, “Effect of altitude and palm oil biodiesel fuelling on the performance and combustion characteristics of a HSDI diesel engine,” *Fuel*, vol. 88, no. 4, pp. 725–731, 2009, doi: 10.1016/j.fuel.2008.10.011.
- [31] S. Eiadtrong, K. Maliwan, G. Prateepchaikul, T. Kattiyawan, P. Thephsorn, and T. Leevijit, “Preparation, important fuel properties, and comparative use of un-preheated palm fatty acid distillate-diesel blends in a single cylinder diesel engine,” *Renewable Energy*, vol. 134, pp. 1089–1098, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.09.043.
- [32] M. Athar and S. Zaidi, “A review of the feedstocks, catalysts, and intensification techniques for sustainable biodiesel production,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 8, no. 6, p. 104523, 2020, doi: 10.1016/j.jece.2020.104523.
- [33] S. Nagaraja, K. Sooryaprakash, and R. Sudhakaran, “Investigate the Effect of Compression Ratio Over the Performance and Emission Characteristics of Variable Compression Ratio Engine Fueled with Preheated Palm Oil - Diesel Blends,” *Procedia Earth and Planetary Science*, vol. 11, pp. 393–401, 2015, doi: 10.1016/j.proeps.2015.06.038.
- [34] A. Datta and B. K. Mandal, “A comprehensive review of biodiesel as an alternative fuel for compression ignition engine,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 799–821, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.170.
- [35] X. Liu, F. Zhu, R. Zhang, L. Zhao, and J. Qi, “Recent progress on biodiesel production from municipal sewage sludge,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 135, no. March 2020, p. 110260, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110260.
- [36] P. Deshpande and K. Kulkarni, “Production and Evaluation of Biodiesel from Palm Oil and Ghee (Clarified Butter),” *Chemical and Process Engineering Research*, vol. 2, pp. 33–42, 2012.
- [37] I. Thushari and S. Babel, “Sustainable utilization of waste palm oil and sulfonated carbon catalyst derived from coconut meal residue for biodiesel production,” *Bioresource Technology*, vol. 248, pp. 199–203, 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2017.06.106.
- [38] S. M. Mudge and G. Pereira, “Stimulating the biodegradation of crude oil with biodiesel preliminary results,” *Spill Science and Technology Bulletin*, vol. 5, no. 5–6, pp. 353–355, 1999, doi: 10.1016/S1353-2561(99)00075-4.
- [39] M. Habibullah, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, I. M. Rizwanul Fattah, A. M. Ashraful, and H. M. Mobarak, “Biodiesel production and performance evaluation of coconut, palm and their combined blend with diesel in a single-cylinder diesel engine,” *Energy Conversion and Management*, vol. 87, pp. 250–257, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.07.006.
- [40] A. Liennard, D. Pioch, N. Chirat, P. Lozano, and G. Vaitilingom, “Energy Generation From ‘ Neat ’ Vegetable Oils”.
- [41] M. Mofijur, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, A. E. Atabani, I. M. R. Fattah, and H. M. Mobarak, “Comparative evaluation of performance and emission characteristics of Moringa oleifera and Palm oil based biodiesel in a diesel engine,” *Industrial Crops and Products*, vol. 53, pp. 78–84, 2014, doi: 10.1016/j.indcrop.2013.12.011.
- [42] H. A. Allami, M. Tabasizadeh, A. Rohani, A. Farzad, and H. Nayebzadeh, “Precise evaluation the effect of microwave irradiation on the properties of palm kernel oil biodiesel used in a diesel engine,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 241, p. 117777, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117777.
- [43] A. S. Silitonga, H. H. Masjuki, T. M. I. Mahlia, H. C. Ong, A. E. Atabani, and W. T. Chong, “A global comparative review of biodiesel production from jatropha curcas using different homogeneous acid and alkaline catalysts: Study of physical and chemical properties,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 514–533, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.03.044.
- [44] P. Adewale, M. J. Dumont, and M. Ngadi, “Recent trends of biodiesel production from animal fat wastes and associated production techniques,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 574–588, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.02.039.



- [45] A. M. Ashraful et al., "Production and comparison of fuel properties, engine performance, and emission characteristics of biodiesel from various non-edible vegetable oils: A review," *Energy Conversion and Management*, vol. 80, pp. 202–228, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.01.037.
- [46] M. M. Musthafa, T. A. Kumar, T. Mohanraj, and R. Chandramouli, "A comparative study on performance, combustion and emission characteristics of diesel engine fuelled by biodiesel blends with and without an additive," *Fuel*, vol. 225, no. February 2017, pp. 343–348, 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2018.03.147.
- [47] P. Shrivastava, T. N. Verma, and A. Pugazhendhi, "An experimental evaluation of engine performance and emission characteristics of CI engine operated with Roselle and Karanja biodiesel," *Fuel*, vol. 254, no. February, p. 115652, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.115652.
- [48] J. C. Ge, H. Y. Kim, S. K. Yoon, and N. J. Choi, "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*, vol. 260, no. September 2019, p. 116326, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2019.116326.
- [49] K. Srinivas, B. Balu Naik, and K. Kalyani Radha, "Impact of Fuel Injection Pressure and Compression Ratio on Performance and Emission Characteristics of VCR CI Engine Fueled with Palm Kernel Oil-Eucalyptus Oil Blends," *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 2, pp. 2222–2230, 2017, doi: 10.1016/j.matpr.2017.02.069.
- [50] A. Khalid, S. A. Osman, M. N. M. Jaat, N. Mustaffa, S. M. Basharie, and B. Manshoor, "Performance and emissions characteristics of diesel engine fuelled by biodiesel derived from palm oil," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 315, no. April 2015, pp. 517–522, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.315.517.
- [51] A. S. Silitonga, H. C. Ong, T. M. I. Mahlia, H. H. Masjuki, and W. T. Chong, "Biodiesel conversion from high FFA crude jatropha curcas, calophyllum inophyllum and ceiba pentandra oil," *Energy Procedia*, vol. 61, pp. 480–483, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.11.1153.
- [52] H. Hazar and H. Aydin, "Performance and emission evaluation of a CI engine fueled with preheated raw rapeseed oil (RRO)-diesel blends," *Applied Energy*, vol. 87, no. 3, pp. 786–790, 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.05.021.
- [53] M. Elkelawy et al., "Experimental studies on the biodiesel production parameters optimization of sunflower and soybean oil mixture and DI engine combustion, performance, and emission analysis fueled with diesel/biodiesel blends," *Fuel*, vol. 255, no. May, p. 115791, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.115791.
- [54] H. Shahmirzae Jeshvaghani, M. Fallahipanah, M. Hashemi Gahruei, and L. Chen, "Performance analysis of Diesel engines fueled by biodiesel blends via thermodynamic simulation of an air-standard Diesel cycle," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 11, no. 1, pp. 139–148, 2014, doi: 10.1007/s13762-013-0274-4.
- [55] M. Veinblat, V. Baibikov, D. Katoshevski, Z. Wiesman, and L. Tartakovsky, "Impact of various blends of linseed oil-derived biodiesel on combustion and particle emissions of a compression ignition engine – A comparison with diesel and soybean fuels," *Energy Conversion and Management*, vol. 178, no. August, pp. 178–189, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.10.028.
- [56] A. Z. Abdullah, B. Salamatinia, H. Mootabadi, and S. Bhatia, "Current status and policies on biodiesel industry in Malaysia as the world's leading producer of palm oil," *Energy Policy*, vol. 37, no. 12, pp. 5440–5448, 2009, doi: 10.1016/j.enpol.2009.08.012.
- [57] M. N. A. Hassan, P. Jaramillo, and W. M. Griffin, "Life cycle GHG emissions from Malaysian oil palm bioenergy development: The impact on transportation sector's energy security," *Energy Policy*, vol. 39, no. 5, pp. 2615–2625, 2011, doi: 10.1016/j.enpol.2011.02.030.
- [58] S. Lim and L. K. Teong, "Recent trends, opportunities and challenges of biodiesel in Malaysia: An overview," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 3, pp. 938–954, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.10.027.
- [59] H. Sharon, K. Karuppasamy, D. R. Soban Kumar, and A. Sundaresan, "A test on DI diesel engine

- fueled with methyl esters of used palm oil,” *Renewable Energy*, vol. 47, no. X, pp. 160–166, 2012, doi: 10.1016/j.renene.2012.04.032.
- [60] V. Plata, Ó. Rojas, and P. Gauthier-Maradei, “Improvement of palm oil biodiesel filterability by treatment with reactivated spent bleaching earths,” *Fuel*, vol. 260, no. May 2019, p. 116198, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2019.116198.
- [61] F. Harahap, S. Silveira, and D. Khatiwada, “Cost competitiveness of palm oil biodiesel production in Indonesia,” *Energy*, vol. 170, pp. 62–72, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.12.115.
- [62] S. Bari and S. N. Hossain, “Performance and emission analysis of a diesel engine running on palm oil diesel (POD),” *Energy Procedia*, vol. 160, no. 2018, pp. 92–99, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.123.
- [63] G. R. Kannan, K. R. Balasubramanian, S. P. Sivapirakasam, and R. Anand, “Studies on biodiesel production and its effect on diesel engine performance, emission and combustion characteristics,” *International Journal of Ambient Energy*, vol. 32, no. 4, pp. 179–193, 2011, doi: 10.1080/01430750.2011.625722.
- [64] V. Perumal and M. Ilangkumaran, “The influence of copper oxide nano particle added pongamia methyl ester biodiesel on the performance, combustion and emission of a diesel engine,” *Fuel*, vol. 232, no. March, pp. 791–802, 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2018.04.129.
- [65] S. Sumathi, S. P. Chai, and A. R. Mohamed, “Utilization of oil palm as a source of renewable energy in Malaysia,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 9, pp. 2404–2421, 2008, doi: 10.1016/j.rser.2007.06.006.
- [66] A. L. S. Murta, M. A. V. De Freitas, C. G. Ferreira, and M. M. Da Costa Lima Peixoto, “The use of palm oil biodiesel blends in locomotives: An economic, social and environmental analysis,” *Renewable Energy*, vol. 164, pp. 521–530, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2020.08.094.
- [67] S. M. Reza Miri, S. R. Mousavi Seyedi, and B. Ghobadian, “Effects of biodiesel fuel synthesized from non-edible rapeseed oil on performance and emission variables of diesel engines,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 142, pp. 3798–3808, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.082.
- [68] M. N. Nabi, M. G. Rasul, M. Anwar, and B. J. Mullins, “Energy, exergy, performance, emission and combustion characteristics of diesel engine using new series of non-edible biodiesels,” *Renewable Energy*, vol. 140, pp. 647–657, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.03.066.