

Research Article

Karakteristik Pembakaran Pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel Menggunakan Biodiesel Minyak Kelapa Sawit (B35 dan B40)

Suluh Pertiwanda¹, Atok Setiyawan²

1. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia; pertiwandasuluh@gmail.com
2. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia; atok_s@me.its.ac.id

Corresponding Author, Email: pertiwandasuluh@gmail.com (Suluh Pertiwanda)

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja pembakaran campuran biodiesel B35 dan B40 pada pembangkit listrik tenaga diesel berkapasitas 3 MW, dengan pengujian pada variasi beban 50%, 75%, dan 100%. Pengukuran kinerja dilakukan dengan memperhatikan parameter seperti Specific Fuel Consumption (SFC), Brake Mean Effective Pressure (BMEP), dan daya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan B40 meningkatkan daya sebesar 3,06% dan BMEP sebesar 2,29% dibandingkan dengan B35. Meskipun terjadi kenaikan SFC sebesar 0,60% pada B40, hal ini menunjukkan bahwa pengaruh positif dari peningkatan kandungan oksigen dalam campuran biodiesel lebih dominan daripada penurunan nilai kalori. Namun, viskositas B40 yang lebih tinggi menyebabkan peningkatan ignition delay (ID) sebesar 0,92° CA, penurunan tekanan silinder sebesar 1,67%, dan pergeseran tekanan puncak sebesar 0,73° menjauhi titik mati atas (TMA). Secara keseluruhan, biodiesel B40 menunjukkan potensi peningkatan kinerja mesin yang signifikan. Meskipun demikian, tantangan terkait peningkatan SFC yang perlu diatasi menjadi aspek penting untuk penelitian selanjutnya, guna memaksimalkan efisiensi dan manfaat penggunaan biodiesel.

Kata Kunci: Biodiesel; B35; B40; SFC; Keterlambatan Pembakaran; Variasi Beban.

PENDAHULUAN

Cadangan bahan bakar fosil global diperkirakan hanya cukup untuk sekitar 50 tahun ke depan berdasarkan tingkat produksi pada akhir tahun 2019, menjadikan pencarian bahan bakar alternatif sebagai prioritas utama di seluruh dunia (Iskandar et al., 2018; Setiawan & Setiyo, 2022). Krisis ini semakin diperparah oleh dampak negatif sektor transportasi terhadap polusi udara dan pemanasan global, di mana sektor ini merupakan salah satu penyumbang emisi terbesar setelah sektor industri. Meskipun berbagai kebijakan telah diterapkan, dampak jangka panjang dari penggunaan bahan bakar fosil belum sepenuhnya dapat dipulihkan. Oleh karena itu, peralihan dari bahan bakar fosil menuju bahan bakar alternatif yang lebih ramah lingkungan sangat diperlukan, terutama dalam sektor energi dan transportasi. Dalam hal ini, biodiesel menjadi solusi yang menjanjikan, khususnya untuk mesin dengan sistem pembakaran kompresi (*compression ignition*), seperti mesin diesel, yang menjadi fokus penelitian ini. Penggunaan bahan bakar alternatif pada mesin diesel telah menunjukkan performa yang hampir setara dengan diesel murni (Bo) dan sekaligus mampu mengurangi emisi polutan (Miron et al., 2021).

Biodiesel dari minyak nabati, khususnya minyak kelapa sawit, merupakan bahan bakar alternatif yang telah menunjukkan kinerja hampir setara dengan diesel murni (Bo), sembari memberikan manfaat pengurangan emisi polutan (Miron et al., 2021). Indonesia, yang pada tahun 2016 memiliki luas perkebunan kelapa sawit mencapai 11,67 juta hektar, menunjukkan potensi besar dalam pemanfaatan biodiesel sebagai alternatif bahan bakar yang dapat memperbaiki ketahanan energi nasional (Setiyawan et al., 2022). Selain itu, produksi minyak nabati global pada tahun 2020/21 diperkirakan mencapai 610 juta ton, dengan Indonesia dan Malaysia menjadi penghasil utama (Global oilseed trade forecast, 2019). Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa penggunaan biodiesel B20 (Ileri et al., 2016; Yilmaz & Morton, 2011) sebanding dengan penggunaan diesel murni, dengan performa yang tetap optimal.

Namun, meskipun biodiesel menawarkan banyak keuntungan, penggunaan bahan bakar ini masih menghadapi sejumlah tantangan, terutama terkait dengan viskositas tinggi yang dapat memengaruhi proses pembakaran dan kinerja mesin (Altin et al., 2001; Hossain & Davies, 2010; Kalam et al., 2003; Misra & Murthy, 2010). Penundaan pengapian (*ignition delay*) menjadi salah satu isu penting dalam pembakaran mesin diesel, di mana waktu antara awal penyemprotan bahan bakar dan tercapainya titik nyala pertama dapat memengaruhi efisiensi pembakaran dan emisi gas buang (Siagian & Silaban, 2013). Hal ini menunjukkan perlunya penelitian lebih lanjut untuk memahami karakteristik pembakaran ketika menggunakan campuran biodiesel, khususnya pada campuran B35 dan B40.

Beberapa studi sebelumnya telah mengeksplorasi pengaruh biodiesel terhadap kinerja mesin diesel, tetapi sebagian besar fokus pada biodiesel dengan kandungan yang lebih rendah, seperti B20. Penelitian tentang penggunaan campuran biodiesel B35 dan B40, yang lebih tinggi dari B20, masih terbatas, terutama terkait dengan dampaknya terhadap parameter pembakaran seperti *ignition delay*, tekanan silinder, serta efisiensi bahan bakar (Aldhaidhawi et al., 2017; Byrne & O'Shaughnessy, 2020; Yilmaz et al., 2014). Beberapa peneliti juga telah menyoroti peningkatan konsumsi

bahan bakar spesifik (SFC) yang terjadi akibat penggunaan biodiesel, meskipun ada peningkatan daya dan tekanan yang dihasilkan oleh mesin (Arumugam et al., 2014; Labeckas & Slavinskas, 2006). Oleh karena itu, penting untuk mengeksplorasi lebih lanjut bagaimana campuran B35 dan B40 mempengaruhi kinerja pembangkit listrik diesel, terutama dalam konteks pembakaran yang lebih optimal dan pengurangan emisi.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis kinerja mesin diesel yang menggunakan campuran biodiesel B35 dan B40 pada pembangkit listrik tenaga diesel berkapasitas 3 MW dengan variasi beban 50%, 75%, dan 100%. Fokus utama penelitian ini adalah untuk mengevaluasi dampak dari peningkatan kandungan biodiesel terhadap parameter pembakaran seperti ignition delay, start of combustion (SOC), tekanan silinder, daya, dan Brake Mean Effective Pressure (BMEP). Penelitian ini bertujuan untuk memberikan pemahaman lebih dalam mengenai bagaimana perubahan komposisi biodiesel mempengaruhi karakteristik pembakaran dan kinerja mesin diesel dalam kondisi pembebanan yang berbeda.

Ruang lingkup penelitian ini mencakup pengujian campuran biodiesel B35 dan B40 pada mesin diesel dengan kapasitas 3 MW, yang merupakan bagian dari jaringan kelistrikan interkoneksi di Indonesia. Penelitian ini difokuskan pada pengukuran parameter pembakaran, konsumsi bahan bakar, dan performa mesin, tanpa melakukan modifikasi pada konfigurasi mesin. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan kebijakan energi terbarukan di Indonesia, khususnya dalam memanfaatkan biodiesel sebagai bahan bakar alternatif untuk pembangkit listrik tenaga diesel.

METODE

Engine Setup

Penelitian ini menganalisis kinerja mesin diesel yang merupakan bagian dari jaringan kelistrikan interkoneksi di Indonesia, dengan spesifikasi detail tertera pada Tabel 1. Fokus utama studi ini adalah mengevaluasi perubahan kinerja mesin saat beralih dari penggunaan bahan bakar B35 ke B40, tanpa melakukan modifikasi apa pun pada konfigurasi mesin. Pengujian mesin dilakukan pada berbagai tingkat beban: beban maksimum 3 MW, serta pada 50%, 75%, dan 100% dari beban tersebut. Proses pengujian berlangsung selama dua hari berturut-turut. Pada hari pertama, mesin diuji menggunakan bahan bakar B35, sedangkan pada hari kedua, pengujian dilakukan dengan bahan bakar B40. Untuk pengumpulan data, peneliti menggunakan Halyza Machinery Analyzer untuk merekam informasi terkait proses pembakaran. Sementara itu, Flue Gas Analyzer Sauermann digunakan untuk mengukur data emisi yang dihasilkan.

Mekanisme penyaluran kedua jenis bahan bakar biodiesel ini identik, yakni melalui penyuntikan langsung ke ruang bakar. Aliran biodiesel diatur oleh injektor yang terhubung ke pompa injeksi, dengan waktu injeksi diatur pada 20° BTDC (Sebelum Titik Mati Atas).

Pengukuran aliran bahan bakar biodiesel dilakukan menggunakan flowmeter yang dipasang sebelum bahan bakar masuk ke dalam mesin. Data dari flowmeter ini kemudian menjadi dasar untuk perhitungan Specific Fuel Consumption (SFC) aktual. Selama pengujian, beban mesin divariasikan pada level 50%, 75%, dan 100%. Pada setiap tingkat beban, pengambilan data dilakukan secara serentak oleh operator menggunakan metode time stamp.

Tabel 1. Spesifikasi Mesin Diesel

Description	Specification
Manufacture	Werkspoor
Desain dan tipe	9 TM 410RR
Seri	3325
Rate output	3 MW at 500 rpm
Jumlah silinder	9 cilinder
Stroke Length	470 mm
Rod Length	700 mm
Piston Diameter	410 mm
Timing Injector	340°

The fuels characteristics

Dalam eksperimen ini, bahan bakar biodiesel yang berasal dari minyak kelapa sawit mentah (CPO) menjadi fokus utama. Biodiesel CPO B100 dipasok oleh APROBI (Asosiasi Produsen Biofuel Indonesia), sementara Bo (diesel murni) diperoleh dari PT Pertamina (Persero). Proses pencampuran bahan bakar dilakukan menggunakan alat blending milik LEMIGAS Indonesia. Sifat-sifat karakteristik dari bahan bakar yang digunakan dapat dilihat secara rinci pada Tabel 2. Pengujian dilakukan secara bergantian: B35 digunakan pada hari pertama, diikuti oleh B40 pada hari kedua. Setelah penggantian bahan bakar, dilakukan variasi pembebanan pada setiap jenis biodiesel, yaitu sebesar 50%, 75%, dan 100% dari beban maksimum.

Tabel 2. Properties B35 dan B40

No	Properties	Satuan	Batas		B35	B40
			Min.	Max		
1	Angka Setana		49	-	53.53	55.28
2	Berat Jenis 150C	kg/m ³	815	880	855.77	856.73
3	Viskositas 400C	mm ² /s	2.0	5.0	3.38	3.46
4	Kandungan Sulfur	% m/m	-	0.20	0.11	0.06
5	Distilasi	oC	-	370	340.98	339.57
6	Kandungan Air	mg/kg	-	400	253.33	250.00

7	Kandungan FAME	% v/v	40 (+-2%)		35.32	40.32
8	Bilangan Asam Kuat	mgKOH/g	0		0.00	0.00
9	Bilangan Asam Total	mgKOH/g	-	0.60	0.23	0.32
10	Nilai Kalor	MJ/kg	-	-	44.36	43.76

HASIL DAN PEMBAHASAN

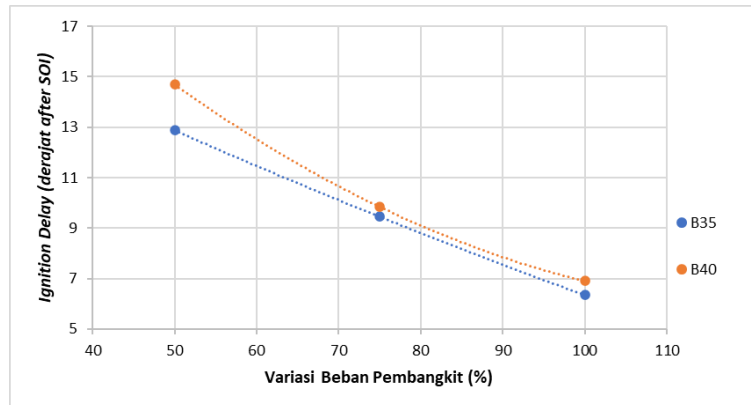
Karakteristik Pembakaran

Bagian ini mendalami parameter-parameter inti yang secara langsung memengaruhi proses pembakaran dalam silinder mesin. Pembahasan akan mencakup rata-rata tekanan silinder, ignition delay (ID), awal pembakaran (SOC), tekanan puncak (CA @ Peak), SFC, Daya dan BMEP.

1. Ignition Delay (ID), Start of Combustion (SOC), dan Peak Pressure (CA @ peak)

Ignition delay (ID) adalah durasi waktu antara dimulainya injeksi bahan bakar dan permulaan proses pembakaran (Hejwood, 1988). Meskipun awal injeksi bahan bakar mudah dikenali dari terangkatnya jarum injektor, penentuan awal pembakaran jauh lebih kompleks. Titik ini bisa diidentifikasi melalui beberapa indikator, seperti perubahan drastis pada gradien tekanan silinder, emisi cahaya, peningkatan suhu, mulainya pembakaran massa bahan bakar, atau perubahan kemiringan pada profil pelepasan panas (Hoang & Thi, 2015). ID memiliki pengaruh langsung terhadap laju pelepasan panas, dan secara tidak langsung berdampak pada tingkat kebisingan mesin serta emisi gas buang yang dihasilkan. Periode ID sendiri terbagi menjadi dua fase yang terjadi bersamaan: penundaan fisik dan penundaan kimia (Kim et al., 2010; Pulkrabek, 2004).

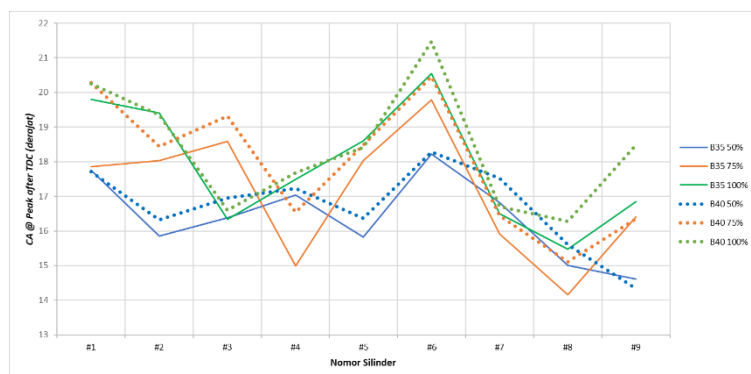
Dalam studi ini, ignition delay (ID) dihitung menggunakan hubungan Arrhenius yang diusulkan oleh Watson (Watson et al., 1980). Berbagai penelitian sebelumnya (Buyukkaya, 2010; Golovitchev & Yang, 2009; Kavtaradze et al., 2005; Korakianitis et al., 2011; Mancaruso et al., 2011; Rajasekar & Selvi, 2014; Rakopoulos, 2012; Rodríguez et al., 2011; Senatore et al., 2000) secara konsisten menunjukkan bahwa peningkatan kandungan biodiesel dalam campuran cenderung memperpendek ID. Namun, beberapa studi literatur lain (Can, 2014; Lahane & Subramanian, 2015; Tsolakis et al., 2007) justru mengindikasikan bahwa ID dapat memanjang seiring dengan peningkatan kecepatan dan beban mesin. Fenomena ini diduga terjadi karena pada kecepatan dan beban yang lebih tinggi, terjadi peningkatan suhu pembakaran dan pengenceran gas buang. Untuk tujuan penelitian ini, Sudut Awal Injeksi (SOI) dijaga konstan pada 20 ° BTDC untuk semua kondisi, menjadikannya variabel tetap yang tidak diubah.



Grafik 1. Ignition delay terhadap variasi beban

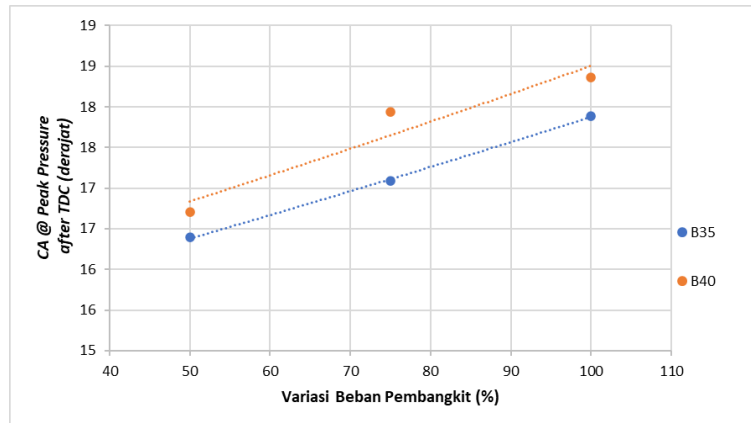
Hasil penelitian yang disajikan pada Grafik 1 menunjukkan bahwa ignition delay (ID) mengalami penurunan seiring dengan peningkatan beban untuk kedua campuran biodiesel yang diuji. Kendati demikian, ID B40 secara konsisten lebih panjang dibandingkan B35 pada semua tingkat beban, dengan rata-rata perbedaan sebesar 0.92° CA. Sebagai konsekuensi langsung dari ID yang lebih panjang ini, start of combustion (SOC) bergeser maju (lebih dekat ke Titik Mati Atas/TMA) seiring dengan peningkatan beban. Lebih lanjut, SOC B40 secara konsisten sedikit lebih lambat (lebih jauh dari TMA atau lebih dekat ke CA puncak) dibandingkan B35 pada semua kondisi beban yang diamati. Perbandingan spesifik menunjukkan bahwa pada beban 50%, SOC B40 adalah 5.31° BTDC berbanding 7.13° BTDC untuk B35; pada beban 75%, SOC B40 tercatat 10.16° sementara B35 pada 10.55° ; dan pada beban 100%, SOC B40 berada di 13.1° BTDC sedangkan B35 pada 13.65° BTDC.

2. Peak Pressure (CA @Peak)



Grafik 2 Crank Angle @ Peak pada setiap silinder

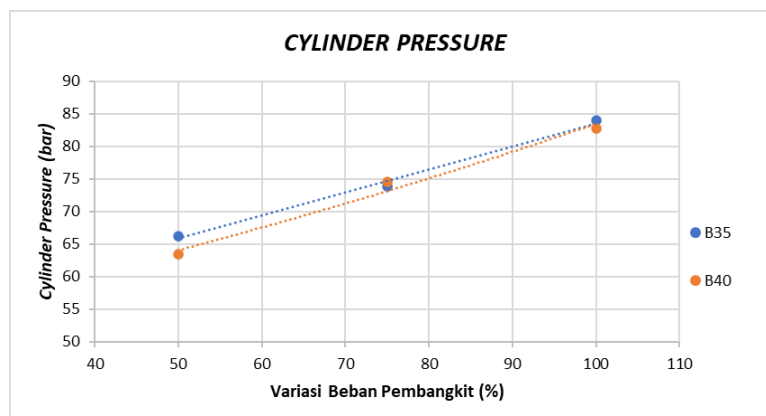
Grafik 2 mengindikasikan bahwa pada setiap beban, CA @ Peak di semua silinder menunjukkan pergeseran menjauhi Titik Mati Atas (TMA). Pola pergeseran ini terlihat konsisten di setiap silinder. Ini menunjukkan bahwa ignition delay (ID) yang lebih panjang memang memengaruhi posisi CA @ Peak pada masing-masing silinder.



Grafik 3 Crank Angle @ Peak after TDC terhadap variasi beban

Data dari Grafik 3 lebih lanjut mengonfirmasi adanya perubahan pada CA @ Peak, menunjukkan bahwa rata-rata CA @ Peak bergeser 0.54° lebih jauh dari Titik Mati Atas (TMA). Ignition delay (ID) yang lebih panjang pada B40 ini diatributkan pada viskositasnya yang lebih tinggi dibandingkan B35. Viskositas dan densitas yang meningkat cenderung menghambat pembentukan campuran bahan bakar-udara yang optimal, menghasilkan banyak zona yang tidak homogen. Akibatnya, proses pembakaran menjadi lebih panjang, tekanan di dalam silinder menurun, dan laju pelepasan panas berkurang, terutama pada fase akhir pembakaran (Guido et al., 2013; Subramaniam et al., 2013). Secara langsung, ID yang lebih panjang pada B40 menyebabkan start of combustion (SOC) yang lebih lambat. SOC yang tertunda ini, pada gilirannya, mengakibatkan waktu pencapaian tekanan puncak (CA @ Peak) bergeser lebih jauh setelah TMA.

3. Cylinder Pressure



Grafik 4. Cylinder Pressure terhadap variasi beban

Grafik 4 memperlihatkan bahwa rata-rata tekanan silinder meningkat seiring dengan peningkatan beban, namun dengan pola perbandingan yang bervariasi antara B35 dan B40. Pada beban 50%, B35 menghasilkan tekanan rata-rata yang lebih tinggi (66.3 bar) dibandingkan B40 (63.5 bar). Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh

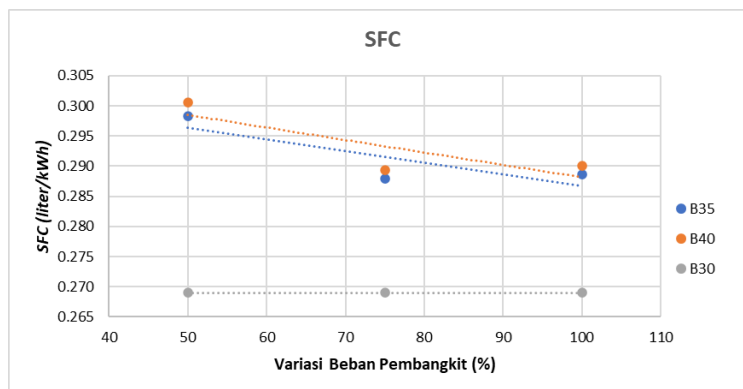
ID B40 yang jauh lebih panjang dan SOC yang lebih lambat, yang bisa membuat pelepasan panas awal lebih tersebar atau terjadi lebih jauh dari Titik Mati Atas (TMA), meskipun total energi (daya/BMEP) B40 sedikit lebih tinggi. Sebaliknya, pada beban 75%, B40 justru menunjukkan tekanan rata-rata yang sedikit lebih tinggi (74.5 bar) dibanding B35 (73.9 bar). Hal ini mengindikasikan bahwa pada beban menengah, perbedaan ID dan SOC menjadi lebih kecil, dan efek positif dari kandungan oksigen pada B40 mulai lebih menonjol, mendukung pembakaran yang lebih lengkap.

Namun, pada beban 100%, B35 kembali mencatatkan tekanan rata-rata yang lebih tinggi (83.9 bar) dibandingkan B40 (82.7 bar), meskipun B40 menghasilkan daya yang lebih besar. Fenomena ini mungkin menunjukkan bahwa B35, dengan ID yang lebih pendek, memiliki laju pelepasan panas puncak yang lebih tajam atau lebih optimal terjadi di sekitar TMA, yang berkontribusi pada tekanan silinder rata-rata yang lebih tinggi. Secara keseluruhan, rata-rata terjadi penurunan tekanan silinder sebesar 1.67% di seluruh silinder dan beban saat menggunakan B40.

4. SFC (Specific Fuel Consumption)

Konsumsi Bahan Bakar Spesifik Rem (BSFC) adalah indikator seberapa efisien mesin menggunakan bahan bakar, diukur dari jumlah bahan bakar yang diperlukan untuk menghasilkan setiap kilowatt daya. Berbagai studi menunjukkan bahwa penggunaan biodiesel dan campurannya pada mesin diesel cenderung meningkatkan BSFC. Artinya, mesin akan memerlukan lebih banyak bahan bakar untuk menghasilkan *output* daya yang sama dibandingkan dengan penggunaan diesel murni. Alasan utamanya adalah kandungan energi biodiesel yang lebih rendah dibanding diesel konvensional.

Sebagai contoh, Labeckas dan Slavinskas (Labeckas & Slavinskas, 2009) menemukan bahwa biodiesel *rapeseed* menghasilkan BSFC 18.7% hingga 23.2% lebih tinggi dari diesel pada kondisi torsi dan daya spesifik. Peneliti lain (Arumugam et al., 2014; Erazo Jr et al., 2010; Karabektas et al., 2013) juga melaporkan adanya peningkatan BSFC hingga 12% seiring dengan peningkatan persentase biodiesel dalam campuran. Temuan ini selaras dengan fakta bahwa nilai kalor dan densitas energi biodiesel 8–12% lebih rendah dari diesel, sehingga memang logis jika diperlukan lebih banyak biodiesel untuk mencapai daya yang sama (Labeckas & Slavinskas, 2006; Raheman & Ghadge, 2008).

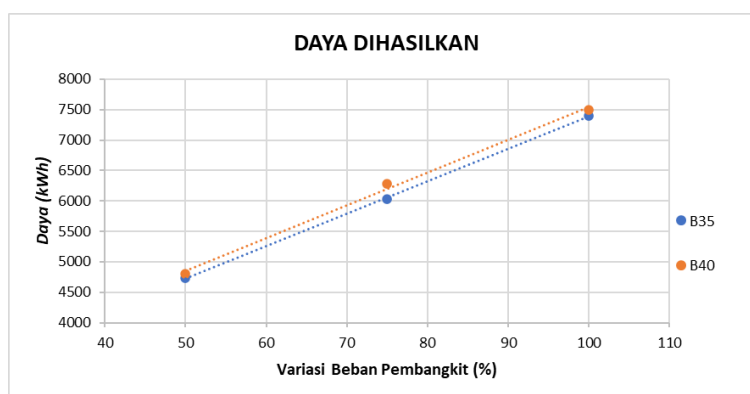


Grafik 5. SFC terhadap variasi beban

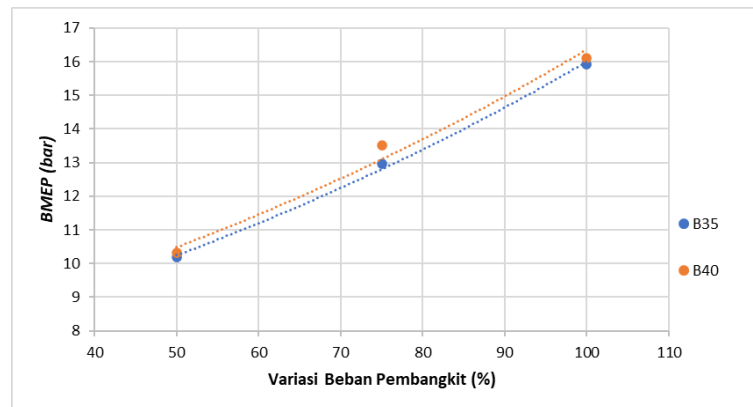
Grafik 5 menunjukkan bahwa Specific Fuel Consumption (SFC) untuk B40 secara konsisten lebih tinggi dibanding B35 pada semua tingkat beban yang diuji. Pada beban 50%, SFC B40 tercatat 0.301 L/kWh, sementara B35 adalah 0.289 L/kWh. Perbedaan ini sedikit berkurang pada beban 75%, di mana SFC B40 sebesar 0.289 L/kWh dan B35 0.288 L/kWh. Demikian pula pada beban 100%, SFC B40 (0.290 L/kWh) sedikit lebih tinggi dari B35 (0.289 L/kWh). Secara keseluruhan, rata-rata kenaikan SFC saat menggunakan B40 adalah sekitar 0.60% di semua beban.

Peningkatan SFC pada B40 ini, meskipun mungkin ada sedikit peningkatan efisiensi termal, terutama disebabkan oleh nilai kalor (Lower Heating Value/LHV) biodiesel yang lebih rendah dibandingkan dengan solar murni (Altın et al., 2001). Hal ini berarti biodiesel mengandung lebih sedikit energi per satuan volume atau massa dibanding solar. Akibatnya, untuk menghasilkan daya yang sama, mesin harus menginjeksikan volume bahan bakar B40 yang sedikit lebih banyak, yang kemudian tercermin pada nilai SFC yang sedikit lebih tinggi.

5. Daya dan BMEP



Grafik 6 Daya terhadap variasi beban



Grafik 7 BMEP terhadap variasi beban

Grafik 6 dan 7 memperlihatkan bahwa Brake Mean Effective Pressure (BMEP) dan daya yang dihasilkan mengalami peningkatan seiring dengan penambahan beban untuk kedua jenis campuran bahan bakar. Menariknya, B40 secara konsisten menghasilkan daya yang sedikit lebih tinggi dengan kenaikan 3.06% dan BMEP yang juga sedikit lebih tinggi dibandingkan B35, dengan kenaikan 2.29%.

Peningkatan ini pada B40 mengindikasikan bahwa, meskipun ada perbedaan dalam karakteristik pembakaran awal seperti *ignition delay* yang lebih panjang, bahan bakar ini tetap mampu menghasilkan *output* kerja yang superior. Ini menunjukkan bahwa total pelepasan energi dari B40, yang didukung oleh kandungan oksigennya, cukup signifikan untuk mengkompensasi atau bahkan mengungguli faktor-faktor lain yang mungkin memengaruhi performa.

KESIMPULAN

Penelitian ini menganalisis dampak penggunaan campuran biodiesel B35 dan B40 terhadap karakteristik pembakaran dan performa mesin diesel. Temuan utama menunjukkan bahwa penggunaan B40 secara konsisten menghasilkan *ignition delay* (ID) yang lebih panjang dibandingkan B35, dengan rata-rata pergeseran sebesar $0,92^{\circ}$ CA. Peningkatan ID pada B40 ini disebabkan oleh viskositasnya yang lebih tinggi, yang mengganggu pembentukan campuran bahan bakar-udara yang homogen. Konsekuensinya, *start of combustion* (SOC) B40 lebih lambat, bergeser mendekati titik puncak tekanan silinder, dan menyebabkan *crank angle at peak pressure* (CA @ peak) B40 bergeser menjauh dari Titik Mati Atas (TMA), dengan rata-rata pergeseran $0,54^{\circ}$ CA.

Dalam hal tekanan silinder, B40 menunjukkan pola yang bervariasi. Pada beban 50%, tekanan rata-rata B40 lebih rendah, kemungkinan karena pelepasan panas yang lebih tersebar akibat ID yang panjang. Namun, pada beban 75%, B40 sedikit unggul, yang mungkin mengindikasikan efek positif dari kandungan oksigennya mulai dominan. Pada beban 100%, B35 kembali menunjukkan tekanan silinder rata-rata yang lebih tinggi, mungkin karena laju pelepasan panas puncak yang lebih optimal di sekitar TMA. Secara keseluruhan, rata-rata terjadi penurunan tekanan silinder sebesar 1,67% dengan B40.

Meskipun demikian, B40 secara konsisten menghasilkan daya yang sedikit lebih tinggi (peningkatan 3,06%) dan Brake Mean Effective Pressure (BMEP) yang lebih tinggi (peningkatan 2,29%) dibandingkan B35. Ini menunjukkan bahwa total pelepasan energi dari B40, didukung oleh kandungan oksigennya, cukup untuk menghasilkan output kerja yang lebih besar. Namun, peningkatan performa ini datang dengan kompromi pada efisiensi konsumsi bahan bakar. Specific Fuel Consumption (SFC) B40 secara konsisten lebih tinggi daripada B35, rata-rata 0,60%, utamanya disebabkan oleh nilai kalor (Lower Heating Value/LHV) biodiesel yang lebih rendah. Ini berarti mesin membutuhkan volume B40 yang sedikit lebih banyak untuk menghasilkan daya yang sama.

Implikasi dari temuan ini menunjukkan bahwa meskipun B40 dapat meningkatkan daya dan BMEP, tantangan terkait dengan peningkatan SFC tetap menjadi masalah yang perlu diatasi. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut perlu dilakukan untuk mengoptimalkan formulasi biodiesel agar mengurangi SFC, misalnya dengan memperbaiki proses pemurnian biodiesel atau menyesuaikan komposisi campuran biodiesel untuk mengurangi viskositasnya. Selain itu, kebijakan yang mendukung penelitian lebih lanjut dan penerapan teknologi yang efisien dalam pembangkit listrik berbasis biodiesel sangat diperlukan untuk mendorong penggunaan biodiesel secara lebih luas di sektor energi, terutama dalam konteks pembangkit listrik tenaga diesel.

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah untuk mengembangkan teknologi yang dapat mengurangi viskositas biodiesel, seperti pemanasan awal bahan bakar atau penggunaan aditif tertentu yang dapat meningkatkan kecepatan pembakaran tanpa meningkatkan SFC secara signifikan. Penelitian ini juga dapat memperluas penggunaan campuran biodiesel dengan proporsi yang lebih tinggi dari B40, untuk mengeksplorasi potensi peningkatan performa lebih lanjut dalam berbagai kondisi operasi pembangkit listrik.

Bibliography

- Aldhaidhawi, M., Chiriac, R., Bădescu, V., Descombes, G., & Podevin, P. (2017). Investigation on the mixture formation, combustion characteristics and performance of a Diesel engine fueled with Diesel, Biodiesel B20 and hydrogen addition. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(26), 16793–16807.
- Altın, R., Cetinkaya, S., & Yücesu, H. S. (2001). The potential of using vegetable oil fuels as fuel for diesel engines. *Energy Conversion and Management*, 42(5), 529–538.
- Arumugam, S., Sriram, G., & Ellappan, R. (2014). Bio-lubricant-biodiesel combination of rapeseed oil: An experimental investigation on engine oil tribology, performance, and emissions of variable compression engine. *Energy*, 72, 618–627.
- Buyukkaya, E. (2010). Effects of biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics. *Fuel*, 89(10), 3099–3105.
- Byrne, G., & O'Shaughnessy, S. M. (2020). Performance characteristics and exhaust gas analysis of a diesel engine using biodiesel fuel blends. *Biofuels*, 11(3), 297–308.
- Can, Ö. (2014). Combustion characteristics, performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with a waste cooking oil biodiesel mixture. *Energy*

- Conversion and Management*, 87, 676–686.
- Erazo Jr, J. A., Parthasarathy, R., & Gollahalli, S. (2010). Atomization and combustion of canola methyl ester biofuel spray. *Fuel*, 89(12), 3735–3741.
- Golovitchev, V. I., & Yang, J. (2009). Construction of combustion models for rapeseed methyl ester bio-diesel fuel for internal combustion engine applications. *Biotechnology Advances*, 27(5), 641–655.
- Guido, C., Beatrice, C., & Napolitano, P. (2013). Application of bioethanol/RME/diesel blend in a Euro5 automotive diesel engine: Potentiality of closed loop combustion control technology. *Applied Energy*, 102, 13–23.
- Hejwood, J. B. (1988). Internal combustion engines fundamentals. *McCraw-Hill Book*.
- Hoang, V. N., & Thi, L. D. (2015). Experimental study of the ignition delay of diesel/biodiesel blends using a shock tube. *Biosystems Engineering*, 134, 1–7.
- Hossain, A. K., & Davies, P. A. (2010). Plant oils as fuels for compression ignition engines: A technical review and life-cycle analysis. *Renewable Energy*, 35(1), 1–13.
- Ileri, E., Atmanli, A., & Yilmaz, N. (2016). Comparative analyses of n-butanol–rapeseed oil–diesel blend with biodiesel, diesel and biodiesel–diesel fuels in a turbocharged direct injection diesel engine. *Journal of the Energy Institute*, 89(4), 586–593.
- Iskandar, M. J., Baharum, A., Anuar, F. H., & Othaman, R. (2018). Palm oil industry in South East Asia and the effluent treatment technology—A review. *Environmental Technology & Innovation*, 9, 169–185.
- Kalam, M. A., Husnawan, M., & Masjuki, H. H. (2003). Exhaust emission and combustion evaluation of coconut oil-powered indirect injection diesel engine. *Renewable Energy*, 28(15), 2405–2415.
- Karabektas, M., Ergen, G., & Hosoz, M. (2013). Effects of the blends containing low ratios of alternative fuels on the performance and emission characteristics of a diesel engine. *Fuel*, 112, 537–541.
- Kavtaradze, R. Z., Zeilinger, K., & Zitzler, G. (2005). Ignition delay in a diesel engine utilizing different fuels. *High Temperature*, 43, 951–960.
- Kim, S., Hwang, J. W., & Lee, C. S. (2010). Experiments and modeling on droplet motion and atomization of diesel and bio-diesel fuels in a cross-flowed air stream. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 31(4), 667–679.
- Korakianitis, T., Namasivayam, A. M., & Crookes, R. J. (2011). Diesel and rapeseed methyl ester (RME) pilot fuels for hydrogen and natural gas dual-fuel combustion in compression-ignition engines. *Fuel*, 90(7), 2384–2395.
- Labeckas, G., & Slavinskas, S. (2006). Performance of direct-injection off-road diesel engine on rapeseed oil. *Renewable Energy*, 31(6), 849–863.
- Labeckas, G., & Slavinskas, S. (2009). Study of exhaust emissions of direct injection diesel engine operating on ethanol, petrol and rapeseed oil blends. *Energy Conversion and Management*, 50(3), 802–812.
- Lahane, S., & Subramanian, K. A. (2015). Effect of different percentages of biodiesel–diesel blends on injection, spray, combustion, performance, and emission characteristics of a diesel engine. *Fuel*, 139, 537–545.
- Mancaruso, E., Sequino, L., & Vaglieco, B. M. (2011). First and second generation biodiesels spray characterization in a diesel engine. *Fuel*, 90(9), 2870–2883.

- Miron, L., Chiriac, R., Brabec, M., & Bădescu, V. (2021). Ignition delay and its influence on the performance of a Diesel engine operating with different Diesel–biodiesel fuels. *Energy Reports*, 7, 5483–5494.
- Misra, R. D., & Murthy, M. S. (2010). Straight vegetable oils usage in a compression ignition engine—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3005–3013.
- Pulkrabek, W. W. (2004). *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*.
- Raheman, H., & Ghadge, S. V. (2008). Performance of diesel engine with biodiesel at varying compression ratio and ignition timing. *Fuel*, 87(12), 2659–2666.
- Rajasekar, E., & Selvi, S. (2014). Review of combustion characteristics of CI engines fueled with biodiesel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 390–399.
- Rakopoulos, D. C. (2012). Heat release analysis of combustion in heavy-duty turbocharged diesel engine operating on blends of diesel fuel with cottonseed or sunflower oils and their bio-diesel. *Fuel*, 96, 524–534.
- Rodriguez, R. P., Sierens, R., & Verhelst, S. (2011). Ignition delay in a palm oil and rapeseed oil biodiesel fuelled engine and predictive correlations for the ignition delay period. *Fuel*, 90(2), 766–772.
- Senatore, A., Cardone, M., Rocco, V., & Prati, M. V. (2000). *A comparative analysis of combustion process in DI diesel engine fueled with biodiesel and diesel fuel*. SAE International Warrendale, PA, USA.
- Setiawan, I. C., & Setiyo, M. (2022). Renewable and Sustainable Green Diesel (D100) for Achieving Net Zero Emission in Indonesia Transportation Sector. *Automotive Experiences*, 5(1), 1–2.
- Setiyawan, A., Winangun, K., & Sania, V. (2022). Effect of Stored Dexlite and Palm Oil Biodiesel on Fuel Properties, Performance, and Emission of Single-Cylinder Diesel Engines. In *Recent Advances in Renewable Energy Systems: Select Proceedings of ICOME 2021* (pp. 333–340). Springer.
- Siagian, A., & Silaban, M. (2013). Prediksi Ignition Delay Mesin Diesel Berbahan Bakar Ganda. *Jurnal Teknik Mesin*, 14(1), 1–6.
- Subramaniam, D., Murugesan, A., Avinash, A., & Kumaravel, A. (2013). Bio-diesel production and its engine characteristics—An expatiate view. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 361–370.
- Tsolakis, A., Megaritis, A., Wyszynski, M. L., & Theinnoi, K. (2007). Engine performance and emissions of a diesel engine operating on diesel-RME (rapeseed methyl ester) blends with EGR (exhaust gas recirculation). *Energy*, 32(11), 2072–2080.
- Watson, N., Pilley, A. D., & Marzouk, M. (1980). *A combustion correlation for diesel engine simulation*. SAE Technical Paper.
- Yilmaz, N., & Morton, B. (2011). Comparative characteristics of compression ignited engines operating on biodiesel produced from waste vegetable oil. *Biomass and Bioenergy*, 35(5), 2194–2199.
- Yilmaz, N., Vigil, F. M., Donaldson, A. B., & Darabseh, T. (2014). Investigation of CI engine emissions in biodiesel–ethanol–diesel blends as a function of ethanol concentration. *Fuel*, 115, 790–793.

Suluh Pertiwanda¹, Atok Setiyawan²

Karakteristik Pembakaran Pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel Menggunakan Biodiesel Minyak Kelapa Sawit (B₃₅ dan B₄₀)