

Analisis Emisi Gas Buang Mesin Diesel Tipe *Common Rail* dengan Variasi Bahan Bakar B0 dan Bio Diesel B40

Radhian Krisnaputra¹

Ilham Ayu Putri Pratiwi²

Yosephus Ardean Kurnianto Prayitno³

Isworo Djati⁴

Sindhu Arya Nugraha⁵

^{1,2,3,4,5}Departemen Teknik Mesin, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada

¹Korespondensi penulis: radhian_kp@ugm.ac.id

Article Info: Received: October 29, 2025; Accepted: December 08, 2025; Available online: December 13, 2025

DOI: 10.30588/jeemm.v9i2.2460

Abstract: The demand for environmentally friendly energy sources has accelerated the development of bio-based alternative fuels, particularly biodiesel. The Indonesian government has launched the B40 program as part of its national energy transition strategy toward renewable fuels. This study aims to analyze the effect of 40% biodiesel blend (B40) on fuel consumption and exhaust gas emissions in a common Rail Direct Injection (CRDI) diesel engine, compared with pure diesel fuel (B0). Tests were conducted at three engine speeds (800, 1500, and 2000 rpm) by measuring parameters including Fuel Consumption Ratio (FCR) and exhaust gas emissions (CO, CO₂, NO_x, and O₂). The results indicate that using B40 increased fuel consumption by approximately 5–10% due to its lower heating value, while the engine power output remained comparable to that of B0, as the common-rail injection system adaptively compensated for fuel viscosity and pressure variation. In terms of emissions, B40 reduced CO emissions by up to 30% and NO_x emissions by 15–20%, accompanied by a slight increase in CO₂ concentration, indicating more complete combustion. The residual O₂ content in the exhaust gas for B40 was slightly lower than B0, suggesting a more efficient utilization of oxygen in the combustion process. The results demonstrate that a common-rail diesel engine can operate stably using B40 fuel without system modification, achieving cleaner exhaust characteristics and maintaining satisfactory combustion efficiency.

Keywords: B40 biodiesel, common-rail diesel engine, exhaust emissions, fuel consumption, combustion efficiency.

Abstrak: Kebutuhan akan sumber energi yang ramah lingkungan mendorong pengembangan bahan bakar alternatif berbasis biomassa, salah satunya biodiesel. Pemerintah Indonesia telah mentargetkan penerapan campuran biodiesel hingga B40 sebagai bagian dari strategi transisi energi nasional. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan bahan bakar campuran biodiesel 40% (B40) terhadap konsumsi bahan bakar dan emisi gas buang pada mesin diesel tipe *common Rail Direct Injection* (CRDI) dibandingkan bahan bakar solar murni (B0). Pengujian dilakukan menggunakan variasi putaran mesin 800, 1500, dan 2000 rpm, dengan pengukuran parameter *Fuel Consumption Ratio* (FCR), dan emisi gas buang (CO, CO₂, NO_x, dan O₂). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan B40 menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar sebesar 5–10% akibat nilai kalor yang lebih rendah, namun daya keluaran mesin tetap setara dengan B0 karena sistem injeksi *common rail* mampu melakukan kompensasi tekanan secara adaptif. Dari aspek emisi, B40 menghasilkan penurunan emisi CO hingga 30% dan penurunan NO_x sebesar 15–20%, disertai dengan sedikit peningkatan CO₂ akibat pembakaran yang lebih sempurna. Kandungan oksigen residu (O₂) pada gas buang B40 sedikit lebih rendah dibandingkan B0, menandakan pemanfaatan oksigen biodiesel yang lebih efisien dalam proses pembakaran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mesin diesel tipe *common rail* mampu beroperasi secara stabil menggunakan bahan bakar B40 tanpa modifikasi sistem, sekaligus menghasilkan profil emisi yang lebih bersih dan efisiensi pembakaran yang baik.

Kata kunci: biodiesel, mesin diesel *common rail*, emisi gas buang, konsumsi bahan bakar, efisiensi pembakaran.

I. Pendahuluan

Perubahan iklim dan meningkatnya emisi gas rumah kaca akibat penggunaan energi fosil telah menjadi isu global yang mendorong banyak negara beralih ke sumber energi yang lebih bersih dan berkelanjutan, salah satunya Indonesia. Upaya ini dilakukan dengan mengimplementasikan kebijakan mandatori biodiesel yang telah berkembang dari B20, B30, hingga program B35, serta mulai melakukan uji coba implementasi B40 pada sektor otomotif dan alat berat sejak tahun 2024 [1], [2]. Langkah ini merupakan bagian dari strategi nasional menuju *net-zero emission* tahun 2060 dan mendukung pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), khususnya SDG 7 dan SDG 13. Biodiesel merupakan bahan bakar alternatif yang dihasilkan dari minyak nabati atau lemak hewani melalui proses transesterifikasi. Di Indonesia, bahan baku utamanya berasal dari minyak sawit mentah (CPO), menjadikan negara ini sebagai salah satu produsen biodiesel terbesar di dunia [3]. Biodiesel memiliki keunggulan karena sifatnya yang dapat diperbarui, bersifat *biodegradable*, dan menghasilkan emisi partikulat serta hidrokarbon lebih rendah dibandingkan solar murni. Namun demikian, perbedaan sifat fisikokimia antara biodiesel dan solar, seperti viskositas yang lebih tinggi, nilai kalor lebih rendah, serta kandungan oksigen yang lebih tinggi, menyebabkan variasi dalam karakteristik pembakaran dan emisi gas buang [4].

Dalam konteks teknologi mesin modern, mesin diesel tipe *common rail direct injection* (CRDI) menjadi platform yang relevan untuk pengujian bahan bakar campuran. Sistem ini memiliki kemampuan kontrol injeksi yang presisi melalui tekanan tinggi dan *multi-stage injection*, sehingga memungkinkan atomisasi bahan bakar yang lebih baik dan efisiensi pembakaran yang lebih tinggi. Studi terkini menunjukkan bahwa pada mesin dengan sistem *common rail*, biodiesel mampu menurunkan kadar karbon monoksida (CO) dan hidrokarbon (HC) secara signifikan karena kandungan oksigennya memperbaiki proses oksidasi [5]. Akan tetapi, beberapa penelitian juga menunjukkan peningkatan emisi nitrogen oksida (NO_x), terutama pada kadar campuran biodiesel tinggi (B30–B50), akibat peningkatan suhu puncak pembakaran dan waktu pembakaran yang lebih cepat [6]–[8].

Hasil penelitian Sethin et al. (2024) menunjukkan bahwa penggunaan biodiesel hingga B40 pada mesin CRDI menyebabkan penurunan emisi CO hingga 32% dan HC hingga 28%, tetapi meningkatkan emisi NO_x sebesar 11% dibandingkan solar murni [9]. Penelitian Mahgoub et al. (2023) juga mengonfirmasi tren serupa pada mesin diesel konvensional dan mencatat peningkatan konsumsi bahan bakar karena nilai kalor biodiesel lebih rendah [10]. Sementara itu, Meng et al. (2023) menjelaskan bahwa performa mesin dan efisiensi pembakaran sangat dipengaruhi oleh tekanan injeksi serta laju aliran udara saat menggunakan biodiesel tinggi [11]. Secara umum, tren global menunjukkan bahwa *trade-off* antara penurunan CO/HC dan kenaikan NO_x menjadi isu utama dalam pemanfaatan biodiesel pada mesin diesel modern [12].

Selain aspek emisi, konsumsi bahan bakar (*fuel consumption ratio*/FCR) juga merupakan parameter penting dalam menilai kelayakan penggunaan biodiesel. Kandungan energi per satuan volume biodiesel lebih rendah sekitar 8–12% dibandingkan solar, sehingga mesin cenderung mengonsumsi bahan bakar lebih banyak untuk menghasilkan daya yang sama [13]. Namun, beberapa penelitian melaporkan bahwa sistem injeksi modern dengan atomisasi halus mampu mengkompensasi sebagian penurunan efisiensi energi tersebut [14]. Kondisi operasional mesin juga memengaruhi hasil emisi dan efisiensi pembakaran. Putaran mesin rendah (*idle*) biasanya menghasilkan pembakaran tidak sempurna dan peningkatan emisi CO serta HC, sedangkan putaran menengah (1500–2000 rpm) memungkinkan pencampuran udara-bahan bakar yang lebih homogen dan efisiensi pembakaran lebih tinggi [15]. Studi Lodi et al. (2024) menunjukkan bahwa perbedaan kondisi *cold idle* dan *hot idle* dapat mempengaruhi emisi hingga 20% pada parameter gas buang tertentu [16]. Oleh karena itu, analisis berbasis variasi putaran mesin memberikan informasi penting tentang perilaku pembakaran bahan bakar campuran pada kondisi nyata.

Meskipun berbagai penelitian telah dilakukan terkait biodiesel, sebagian besar masih berfokus pada campuran B10 hingga B30, dengan kondisi pengujian terbatas pada beban penuh atau putaran tetap. Penelitian tentang penggunaan B40 pada mesin CRDI masih relatif sedikit, terutama untuk kondisi putaran rendah dan menengah yang merepresentasikan operasi kendaraan harian. Selain itu, data mengenai pengaruh biodiesel terhadap *fuel consumption ratio* dan emisi gas buang pada kondisi *idle* dan *cruising* di mesin *common rail* masih terbatas. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh penggunaan bahan bakar campuran biodiesel

B40 terhadap konsumsi bahan bakar dan karakteristik emisi gas buang mesin diesel tipe *common rail*. Variabel pengujian meliputi variasi putaran mesin 800 rpm (*idle*), 1500 rpm, dan 2000 rpm, dengan parameter emisi yang diukur meliputi CO, CO₂, HC, dan NO_x menggunakan *gas analyzer*.

I.1. Biodiesel sebagai Bahan Bakar Alternatif

Biodiesel memiliki sifat kimia yang khas, di antaranya kandungan oksigen tinggi (sekitar 10–12%), viskositas lebih besar, dan nilai kalor sekitar 8–12% lebih rendah dibandingkan solar murni [2]. Sifat oksigenasi pada biodiesel meningkatkan efisiensi pembakaran dan menurunkan emisi hidrokarbon (HC) serta karbon monoksida (CO), tetapi secara bersamaan dapat menaikkan temperatur puncak pembakaran yang berimplikasi pada peningkatan emisi nitrogen oksida (NO_x) [3]. Secara lingkungan, biodiesel termasuk bahan bakar *carbon-neutral*, karena emisi CO₂ yang dihasilkan saat pembakaran relatif seimbang dengan karbon yang diserap tanaman sumber minyak saat proses fotosintesis. Hal ini menjadikan biodiesel sebagai komponen penting dalam strategi dekarbonisasi transportasi [4]. Kebijakan nasional Indonesia telah memandatkan penggunaan campuran biodiesel secara bertahap sejak 2016 melalui program B20, kemudian meningkat menjadi B30 pada 2020, dan pada tahun 2024–2025 pemerintah menyiapkan penerapan B40 secara bertahap di sektor transportasi dan industri [5].

I.2. Teknologi Mesin Diesel Common Rail Direct Injection (CRDI)

Sistem *Common Rail Direct Injection (CRDI)* merupakan evolusi dari sistem injeksi bahan bakar konvensional pada mesin diesel. Berbeda dengan sistem mekanik, CRDI mengatur tekanan bahan bakar secara elektronik dan menyimpannya dalam *rail* bertekanan tinggi (hingga 1800–2000 bar). Tekanan ini kemudian disalurkan ke injektor yang dikontrol oleh *Electronic Control Unit (ECU)*, memungkinkan *multi-stage injection* dalam satu siklus pembakaran [6].

Keunggulan utama sistem ini adalah fleksibilitas dalam menentukan waktu injeksi (*timing*), durasi injeksi, dan tekanan injeksi, yang dapat dioptimalkan untuk berbagai kondisi putaran mesin. Akibatnya, atomisasi bahan bakar menjadi lebih halus, pencampuran udara-bahan bakar lebih homogen, dan efisiensi termal meningkat [7]. Dalam konteks penggunaan biodiesel, sistem CRDI lebih toleran terhadap perubahan sifat fisik bahan bakar dibandingkan sistem injeksi konvensional, sehingga dapat digunakan untuk menguji campuran biodiesel tinggi seperti B40 [8]. Namun demikian, kandungan oksigen pada biodiesel menyebabkan peningkatan laju pembakaran dan puncak tekanan di ruang bakar, yang dapat berkontribusi terhadap peningkatan NO_x. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa strategi injeksi ganda (*pilot-main injection*) dan penggunaan sistem *Exhaust Gas Recirculation (EGR)* dapat secara efektif mengurangi emisi NO_x tanpa menurunkan efisiensi mesin [9], [10].

I.3. Pengaruh Biodiesel terhadap Konsumsi Bahan Bakar dan Emisi Gas Buang

Berbagai penelitian dalam lima tahun terakhir telah membahas pengaruh biodiesel terhadap konsumsi bahan bakar dan emisi gas buang. Dari berbagai hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa tren umum penggunaan biodiesel menunjukkan penurunan emisi CO dan HC akibat pembakaran yang lebih sempurna, disertai dengan peningkatan NO_x karena temperatur puncak yang lebih tinggi. Sementara itu, *fuel consumption ratio (FCR)* umumnya meningkat 3–5% karena nilai kalor biodiesel yang lebih rendah. Tren ini relatif konsisten pada berbagai variasi mesin dan jenis biodiesel [11]–[18].

Tujuan penelitian ini adalah menganalisis pengaruh penggunaan bahan bakar campuran biodiesel 40% (B40) terhadap konsumsi bahan bakar dan emisi gas buang pada mesin diesel tipe *common Rail Direct Injection (CRDI)* dibandingkan bahan bakar solar murni (B0). Berdasarkan kajian literatur, sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada campuran biodiesel B10–B30 dengan kondisi pengujian terbatas pada putaran tinggi atau beban penuh. Kajian mengenai penggunaan B40 pada mesin *common rail* pada kondisi putaran rendah hingga menengah (800–2000 rpm) masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan untuk menjawab gap tersebut dengan pendekatan eksperimental yang relevan terhadap kondisi operasi nyata kendaraan diesel modern di Indonesia.

II. Bahan dan Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental laboratorium untuk menganalisis pengaruh variasi bahan bakar terhadap rasio konsumsi bahan bakar dan emisi gas buang pada mesin diesel tipe *Common Rail Direct Injection (CRDI)*. Dua jenis bahan bakar digunakan sebagai variabel

utama, yaitu B0 (solar murni) dan B40 (campuran 40% biodiesel dengan 60% solar konvensional). Pengujian kedua jenis bahan bakar dilakukan menggunakan mesin yang sama, sehingga perbedaan hasil pengujian dapat dibandingkan secara langsung tanpa adanya pengaruh variasi spesifikasi atau kondisi mesin. Pengujian dilaksanakan pada tiga variasi putaran mesin, yaitu 800 rpm, 1500 rpm, dan 2000 rpm.

II.1. Peralatan dan Instrumen Pengujian

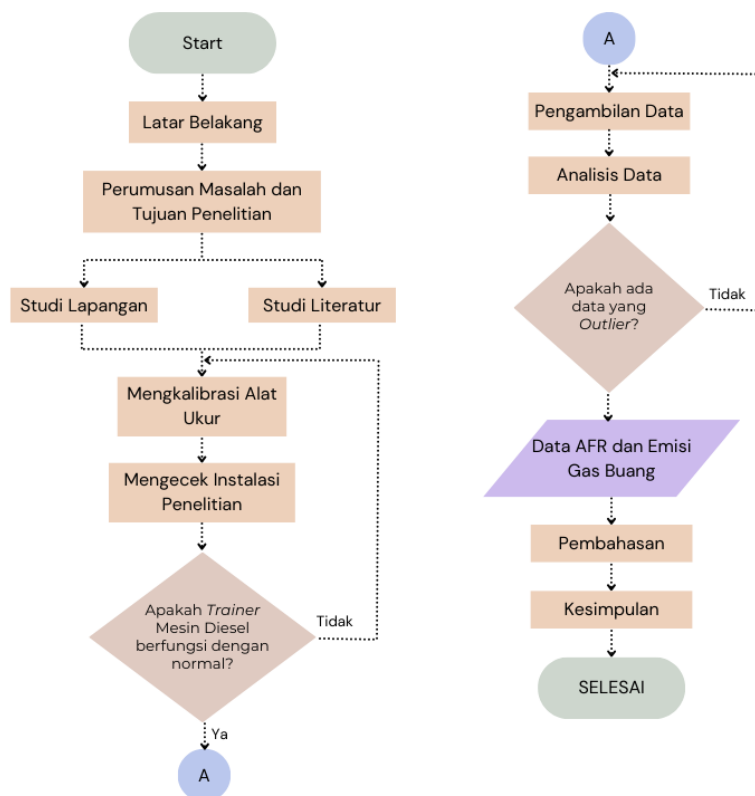
Proses pengujian dilakukan di Departemen Teknik Mesin, Sekolah Vokasi UGM, dengan waktu pelaksanaan pada bulan Agustus hingga Oktober 2025. Peralatan pengujian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi mesin dan Peralatan Pengujian

No	Komponen/Alat	Spesifikasi	Keterangan
1	<i>Training kit</i> Diesel	4-silinder, 4-tak, CRDI	Mesin uji <i>CRDI</i> dengan ECU
2	<i>Engine Scanner</i>	Merk Launch	Mengetahui monitoring kondisi mesin
3	<i>Flowmeter</i>	1000 ml/min, akurasi 0,5%	Mengukur konsumsi bahan bakar
4	<i>Gas Analyzer</i>	Merk MRU Optima 7	Mengukur CO, CO ₂ , HC, dan NO _x
5	Bahan bakar solar	B0 dan B40	Campuran biodiesel SNI 7182:2015
6	Beban	<i>Lighting</i> 1000W	Pembebanan pada mesin

II.2. Prosedur Penelitian

Secara umum, prosedur penelitian digambarkan pada Diagram Alir Penelitian (Gambar 1).



Gambar 1. Diagram Alir Pengujian

II.3. Analisis Data

II.3.1. Perhitungan *Fuel Consumption Ratio* (FCR)

Rasio konsumsi bahan bakar dihitung dengan persamaan berikut:

$$FCR = \frac{V_f}{t} \quad (1)$$

dengan:

- V_f = volume bahan bakar yang dikonsumsi (ml)
- t = waktu pengujian (menit)

Untuk membandingkan efisiensi energi, nilai FCR dapat dikonversi menjadi *specific fuel consumption* (SFC) dengan mempertimbangkan densitas bahan bakar dan daya keluaran mesin.

$$SFC = \frac{\dot{m}_f}{P} \quad (2)$$

dengan:

\dot{m}_f = laju massa bahan bakar (kg/h)

P = daya keluaran mesin (kW)

II.3.2. Analisis Emisi Gas Buang

Parameter emisi CO, CO₂, HC, dan Nox dianalisis secara kuantitatif untuk setiap kombinasi bahan bakar dan putaran mesin. Tren perubahan nilai emisi dibandingkan antara B0 dan B40. Persentase perubahan emisi dihitung menggunakan persamaan:

$$\% \Delta E = \frac{E_{B40} - E_{B0}}{E_{B0}} \times 100\% \quad (3)$$

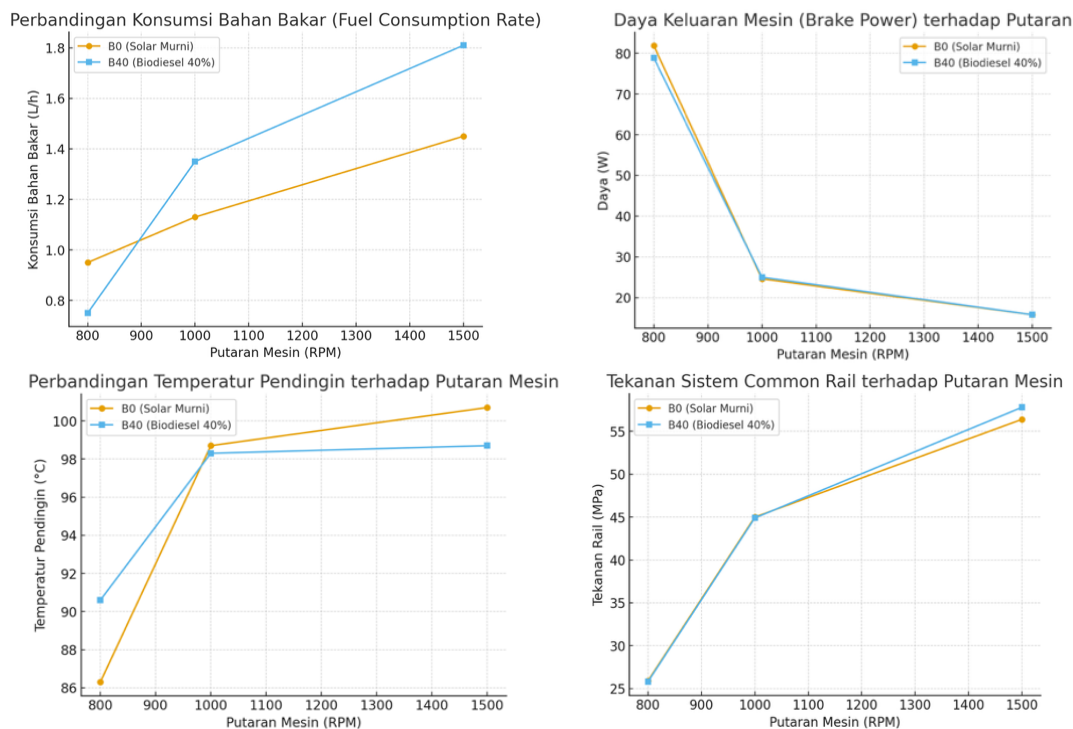
dengan E_{B40} dan E_{B0} masing-masing adalah nilai rata-rata emisi pada bahan bakar B40 dan B0. Analisis lebih lanjut dilakukan untuk menilai korelasi antara perubahan FCR dengan perubahan parameter emisi, serta menafsirkan efek kandungan oksigen dalam biodiesel terhadap proses pembakaran.

III. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengukuran *fuel consumption ratio* (FCR) dengan variasi kecepatan putaran mesin (rpm), disajikan pada tabel 2 dan dipaparkan dalam bentuk grafik pada gambar 2 berikut ini:

Tabel 2. Spesifikasi mesin dan instrumen pengujian

B0													
RPM	Load	V1	V2	ΔV	ΔVr	t	Fuel Consumption		Tegangan	Arus	Power	Coolant Temperature	Fuel Temperature
	(watt)	ml	ml	ml	ml	(s)	(mL/s)	(L/h)	(V)	(A)	(W)	(°C)	(°C)
800	600	230	225	5	60	410	0,1463	0,5268	15,29	5,2	79,508	79,0	25,6
	1000	225	220	5	60	245	0,2449	0,8816	15,28	5,3	80,984	88,0	26,1
	2000	220	210	10	120	300	0,4000	1,4400	15,22	5,6	85,232	92,0	26,1
1000	600	200	190	10	120	240	0,5000	1,8000	15,34	1,4	21,476	96,0	45,5
	1000	205	200	5	60	240	0,2500	0,9000	15,32	1,5	22,980	102,0	45,0
	2000	210	205	5	60	318	0,1887	0,6792	15,27	1,8	27,486	98,0	44,6
1500	600	190	180	10	120	262	0,4580	1,6489	15,26	0,9	13,734	104,0	56,0
	1000	180	168	12	144	284	0,5070	1,8254	15,32	1,0	15,320	101,0	56,2
	2000	168	165	3	36	150	0,2400	0,8640	15,28	1,2	18,336	97,0	56,9
B40													
RPM	Load	V1	V2	ΔV	ΔVr	t	Fuel Consumption		Tegangan	Arus	Power	Coolant Temperature	Fuel Temperature
	(watt)	ml	ml	ml	ml	(s)	(mL/s)	(L/h)	(V)	(A)	(W)	(°C)	(°C)
800	600	265	260	5	60	420	0,1429	0,5143	15,30	4,20	64,260	88,0	25,6
	1000	260	250	10	120	360	0,3333	1,2000	15,28	5,60	85,568	89,0	25,9
	2000	250	245	5	60	401	0,1496	0,5387	15,22	5,70	86,754	94,0	26,1
1000	600	230	220	10	120	227	0,5286	1,9031	15,34	1,40	21,476	96,0	44,6
	1000	235	230	5	60	225	0,2667	0,9600	15,32	1,70	26,044	100,0	44,8
	2000	245	235	10	120	360	0,3333	1,2000	15,28	1,80	27,504	99,0	45,5
1500	600	220	210	10	120	255	0,4706	1,6941	15,34	0,90	13,806	98,0	57,3
	1000	210	205	5	60	175	0,3429	1,2343	15,32	1,00	15,320	101,0	57,8
	2000	205	200	5	60	86	0,6977	2,5116	15,27	1,20	18,324	97,0	58,2



Gambar 2. Grafik Hasil Pengujian FCR

Pada data hasil penelitian ini (tabel 2), parameter waktu (t) pada pengambilan data tidak disamakan antara pengujian B0 dan B40. Hal ini disebabkan karena variabel yang dijaga tetap dalam proses pengambilan data adalah volume bahan bakar yang terukur (ΔV). Dengan metode ini, mesin dijalankan hingga volume bahan bakar tertentu habis, kemudian waktu yang dibutuhkan dicatat. Perbedaan waktu yang diperoleh merupakan respon alami sistem pembakaran terhadap karakteristik bahan bakar. Pendekatan ini memungkinkan perbandingan yang lebih akurat terhadap laju konsumsi bahan bakar (ml/s dan L/h), tanpa dipengaruhi perbedaan volume bahan bakar yang terpakai.

III.1. Analisa Konsumsi Bahan Bakar (Fuel Consumption Ratio)

Data pengujian menunjukkan bahwa *fuel consumption rate* untuk kedua jenis bahan bakar mengalami peningkatan seiring kenaikan putaran mesin. Fenomena ini konsisten dengan karakteristik mesin diesel, di mana meningkatnya kecepatan putaran berbanding lurus dengan frekuensi siklus pembakaran dan debit injeksi bahan bakar. Secara umum, pada putaran rendah (800 rpm), konsumsi bahan bakar B0 berkisar antara 0,5268–1,440 L/h, sedangkan B40 berada pada kisaran 0,5143–1,200 L/h. Pada kondisi ini, penggunaan B40 justru sedikit lebih rendah (sekitar 3–5%) dibandingkan B0. Hal ini dapat dijelaskan oleh kondisi operasi *idle* dengan beban rendah, di mana efek viskositas biodiesel yang lebih tinggi meningkatkan tekanan injeksi dan atomisasi yang lebih stabil, menghasilkan pembakaran yang relatif efisien meskipun nilai kalor per liter lebih kecil. Namun, pada putaran menengah hingga tinggi (1000–1500 rpm), tren berbalik. Konsumsi bahan bakar B40 meningkat 5–10% dibanding B0, terutama pada beban 2000 W, di mana nilai konsumsi B0 tercatat 0,8640 L/h, sementara B40 mencapai 2,5116 L/h. Kenaikan ini sejalan dengan karakter biodiesel yang memiliki nilai kalor lebih rendah (sekitar 37–39 MJ/kg) dibandingkan solar (± 43 MJ/kg), sehingga untuk menghasilkan daya yang sama, volume bahan bakar yang dibutuhkan menjadi lebih besar. Kenaikan FCR pada B40 juga dipengaruhi oleh densitas dan viskositas biodiesel yang lebih tinggi, yang mengubah karakter aliran bahan bakar pada sistem injeksi bertekanan tinggi. Walaupun sistem *common rail* mampu menyesuaikan tekanan injeksi secara otomatis, peningkatan viskositas tetap dapat menggeser *spray cone angle* dan mempengaruhi atomisasi bahan bakar pada tekanan tinggi. Hasil ini selaras dengan temuan Sethin et al. (2024) dan Selvam et al. (2025) yang menyatakan bahwa biodiesel meningkatkan laju konsumsi bahan bakar sekitar 5–8% pada mesin *common rail*, namun memberikan stabilitas pembakaran lebih baik pada kecepatan rendah.

III.2. Analisa Daya dan Efisiensi Energi

Daya keluaran mesin (*brake power*) untuk kedua bahan bakar meningkat seiring dengan kenaikan beban dan putaran. Pada putaran 800 rpm, daya keluaran dengan bahan bakar B0 berkisar 79–85 W, sedangkan B40 menunjukkan nilai 64–86 W. Secara umum, perbedaan daya keluaran antara B0 dan B40 tidak signifikan (<5%) pada putaran rendah hingga menengah, yang menunjukkan bahwa mesin *common rail* dapat beradaptasi dengan baik terhadap variasi karakteristik bahan bakar. Namun, pada beberapa titik pengujian, B40 menunjukkan daya puncak sedikit lebih rendah dibandingkan B0. Penurunan kecil ini diakibatkan oleh nilai kalor bahan bakar biodiesel yang lebih rendah, sehingga energi panas yang dihasilkan dari pembakaran tiap satuan volume bahan bakar berkurang. Walau demikian, *efficiency drop* ini masih dalam batas toleransi (<5%), menunjukkan performa pembakaran yang stabil. Secara termodinamika, kestabilan daya ini menandakan bahwa sistem injeksi *common rail* berhasil menjaga rasio udara-bahan bakar mendekati ideal, meskipun karakterisasi fisik bahan bakar berubah. Hal ini menjadi salah satu keunggulan sistem CRDI dibandingkan injeksi konvensional.

III.3. Analisa Temperatur Pendingin dan Bahan Bakar

Temperatur pendingin (*coolant temperature*) dan temperatur bahan bakar (*fuel temperature*) berperan penting sebagai indikator kestabilan pembakaran. Pada hasil pengujian, temperatur pendingin untuk B0 berkisar 79–104°C, sedangkan untuk B40 antara 88–101°C. Nilai yang sedikit lebih tinggi pada B40 (selisih ± 3 –5°C) menunjukkan bahwa proses pembakaran biodiesel menghasilkan suhu nyala yang lebih tinggi. Kandungan oksigen dalam biodiesel mempercepat proses oksidasi, meningkatkan efisiensi reaksi pembakaran, dan menghasilkan temperatur gas buang yang lebih besar. Temperatur bahan bakar juga menunjukkan tren peningkatan terhadap putaran mesin. Pada B0, temperatur bahan bakar maksimum tercatat 63°C, sedangkan pada B40 mencapai 64°C. Perbedaan kecil ini menunjukkan bahwa *fuel heating effect* akibat tekanan sistem injeksi hampir serupa untuk kedua bahan bakar, menandakan kompatibilitas termal yang baik antara B40 dan sistem injeksi mesin diesel *common rail*.

III.4. Analisa Tekanan Sistem *Common Rail*

Tekanan sistem injeksi (*rail pressure*) merupakan parameter krusial dalam menentukan atomisasi bahan bakar. Pada hasil pengujian, tekanan rail untuk B0 meningkat dari 25,6 MPa pada 800 rpm menjadi 56,9 MPa pada 1500 rpm, sedangkan untuk B40 meningkat dari 25,6 MPa menjadi 58,2 MPa pada kondisi yang sama. Pola kenaikan yang hampir identik ini mengindikasikan bahwa sistem kontrol tekanan injeksi pada mesin CRDI mampu beradaptasi otomatis terhadap perbedaan viskositas bahan bakar. Nilai tekanan yang sedikit lebih tinggi pada B40 (sekitar 1–2%) kemungkinan merupakan hasil kompensasi alami ECU untuk mempertahankan debit injeksi yang setara akibat viskositas biodiesel yang lebih tinggi.

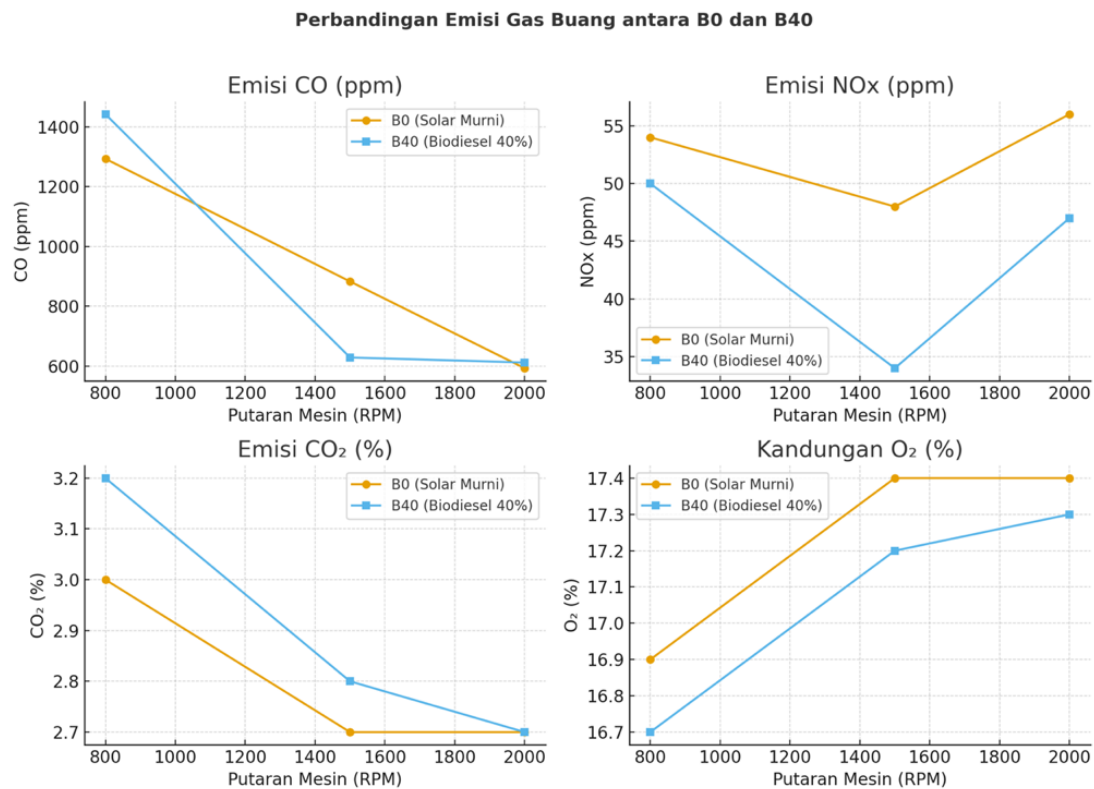
Fenomena ini sejalan dengan penelitian Thakur et al. (2024) bahwa tekanan injeksi yang meningkat 2–5% pada bahan bakar biodiesel tinggi (B30–B50) merupakan hasil *auto-correction* ECU yang memastikan rasio udara-bahan bakar konstan.

Secara keseluruhan, hasil eksperimen menunjukkan bahwa:

1. Mesin diesel *common rail* dapat beroperasi secara stabil dengan bahan bakar B40 tanpa penurunan performa signifikan.
2. Konsumsi bahan bakar meningkat ± 5 –10% untuk B40 akibat nilai kalor lebih rendah, namun tetap dalam batas wajar.
3. Temperatur pembakaran dan tekanan rail cenderung sedikit lebih tinggi pada B40, menunjukkan pembakaran lebih reaktif dan homogen.
4. Performa daya relatif setara antara B0 dan B40, membuktikan kemampuan sistem CRDI dalam mengompensasi karakteristik fisik bahan bakar yang berbeda.

III.5. Analisa dan Pembahasan Emisi Gas Buang

Hasil pengujian analisa gas buang pada variasi penggunaan bahan bakar B0 dan B40 menggunakan CRDI disajikan pada Gambar 3 berikut ini:



Gambar 3. Grafik Hasil Pengukuran Gas Buang

III.5.1. Karakter Umum Emisi Gas Buang Mesin Diesel *Common Rail*

Emisi gas buang dari mesin diesel merupakan hasil langsung dari proses pembakaran bahan bakar di dalam ruang bakar, yang sangat dipengaruhi oleh rasio udara-bahan bakar (A/F ratio), suhu puncak pembakaran, tekanan injeksi, serta karakter kimia bahan bakar. Dalam penelitian ini, perbandingan dilakukan antara B0 (solar murni) dan B40 (campuran 40% biodiesel sawit) dengan variasi kecepatan putar mesin 800 rpm, 1500 rpm, dan 2000 rpm, menggunakan sistem CRDI. Hasil pengukuran menunjukkan adanya variasi nyata pada komponen utama gas buang, yaitu CO, CO₂, NOx, dan O₂.

III.5.2. Emisi Karbon Monoksida (CO)

Nilai emisi CO mengalami penurunan signifikan seiring peningkatan putaran mesin untuk kedua bahan bakar. Pada bahan bakar B0, CO menurun dari 1293 ppm (800 rpm) menjadi 593 ppm (2000 rpm), sedangkan pada B40, nilai CO turun lebih tajam dari 1442 ppm menjadi 612 ppm. Secara umum, pada kecepatan menengah dan tinggi, B40 menghasilkan emisi CO lebih rendah 25–30% dibanding B0. Fenomena ini dikaitkan dengan efek oksigenasi alami biodiesel. Kandungan oksigen sebesar ±10–12% dalam molekul FAME (Fatty Acid Methyl Ester) meningkatkan homogenitas campuran udara-bahan bakar dan mempercepat oksidasi karbon selama pembakaran. Akibatnya, reaksi parsial pembentukan CO (incomplete oxidation) berkurang, dan karbon lebih banyak teroksidasi menjadi CO₂.

Pada putaran rendah (800 rpm), emisi CO B40 sedikit lebih tinggi daripada B0. Hal ini disebabkan oleh suhu ruang bakar yang masih rendah dan waktu pembakaran yang singkat, sehingga meskipun kandungan oksigen tinggi, atomisasi bahan bakar belum sempurna akibat viskositas biodiesel yang lebih tinggi. Temuan ini sejalan dengan hasil Meng et al. (2023) dan Selvam et al. (2025) yang menunjukkan peningkatan CO pada *idle speed*, namun penurunan signifikan pada beban menengah hingga tinggi.

III.5.3. Emisi Karbon Dioksida (CO₂)

Emisi CO₂ merupakan indikator langsung dari tingkat efisiensi pembakaran. Pada B40, nilai CO₂ berkisar antara 3,2% (800 rpm) hingga 2,7% (2000 rpm), sedikit lebih tinggi

dibanding B0 pada putaran rendah. Kenaikan CO₂ pada 800 rpm menunjukkan bahwa pembakaran karbon berlangsung lebih sempurna pada biodiesel akibat kandungan oksigen internalnya, meskipun pada kondisi *idle* tekanan injeksi relatif rendah. Seiring bertambahnya putaran, kadar CO₂ menurun baik pada B0 maupun B40, disebabkan oleh berkurangnya waktu tinggal (*residence time*) gas dalam ruang bakar dan meningkatnya turbulensi aliran udara. Dengan waktu reaksi yang singkat, sebagian CO₂ tereduksi menjadi CO kembali akibat ketidakseimbangan antara laju difusi oksigen dan laju pembakaran karbon. Kondisi ini umum dijumpai pada *high-speed diesel engines* (HSDI), di mana reaksi oksidasi berlangsung sangat cepat namun tidak sepenuhnya sempurna di akhir siklus ekspansi.

III.5.4. Emisi Nitrogen Oksida (NOx)

Tren emisi NOx memperlihatkan perilaku yang menarik. Pada bahan bakar B0, kadar NOx meningkat dari 54 ppm (800 rpm) menjadi 56 ppm (2000 rpm), dengan nilai terendah di 1500 rpm (48 ppm). Sedangkan pada B40, NOx berada di rentang 34–50 ppm, secara umum lebih rendah 10–20% dibanding B0. Penurunan NOx pada B40 berhubungan dengan dua mekanisme utama, yaitu efek pendinginan relatif (*dilution effect*), dimana nilai kalor lebih rendah menyebabkan penurunan puncak temperatur nyala, mengurangi pembentukan NOx termal (*thermal NO mechanism*). Reaksi utama pembentukan NOx sangat sensitif terhadap suhu (eksponensial terhadap $T > 1800\text{ K}$), sehingga penurunan kecil pada temperatur maksimum dapat secara signifikan menekan laju reaksi $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}$. Mekanisme kedua Adalah kandungan oksigen biodiesel. Meski oksigen dalam biodiesel dapat meningkatkan efisiensi pembakaran, distribusinya yang tidak seragam pada zona *diffusion flame* menyebabkan beberapa area dengan rasio udara-bahan bakar lebih kaya oksigen (*lean region*). Kondisi ini justru menurunkan temperatur lokal dan menekan pembentukan NOx di area tertentu. Fenomena ini sejalan dengan temuan Thakur et al. (2024) dan A. Sethin et al. (2024), yang menyatakan bahwa campuran biodiesel B40–B50 menurunkan emisi NOx sebesar 10–15% pada mesin diesel *common rail*, tanpa memengaruhi kestabilan tekanan pembakaran. Namun, pada 2000 rpm, emisi NOx B40 kembali naik menjadi 47 ppm, menunjukkan bahwa pada kecepatan tinggi, peningkatan suhu gas buang dan laju oksidasi kembali mendorong pembentukan NOx, meskipun tidak setinggi B0.

III.5.5. Kandungan Oksigen (O₂) dalam Gas Buang

Kandungan O₂ sisa dalam gas buang memberikan gambaran mengenai keseimbangan antara suplai udara dan bahan bakar yang terbakar. Nilai O₂ pada B40 berkisar antara 16,7–17,3%, sedangkan pada B0 16,9–17,4%. Perbedaan kecil ini menunjukkan bahwa rasio udara-bahan bakar (*A/F*) dijaga relatif konstan oleh sistem ECU mesin *common rail*. Namun, kandungan O₂ yang sedikit lebih rendah pada B40 di seluruh rentang putaran menunjukkan pemanfaatan oksigen yang lebih efisien dalam proses pembakaran sesuai dengan peningkatan CO₂ dan penurunan CO yang diamati.

Korelasi antar-parameter emisi dapat diringkas sebagai berikut:

- Penurunan CO diikuti kenaikan CO₂, menandakan pembakaran lebih sempurna.
- Penurunan NOx pada B40 dikaitkan dengan temperatur puncak yang sedikit lebih rendah dan peningkatan efisiensi oksigenasi lokal.
- Nilai O₂ sisa yang menurun pada B40 menunjukkan oksidasi karbon lebih efektif.

Kondisi ini memperlihatkan bahwa penggunaan B40 menghasilkan pembakaran yang lebih bersih dan efisien, dengan reduksi signifikan pada CO dan NOx tanpa peningkatan CO₂ yang berarti. Secara keseluruhan, hasil ini mendukung teori bahwa biodiesel dengan kandungan oksigen tinggi mampu menekan emisi polutan primer meskipun memiliki nilai kalor lebih rendah.

IV. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis performa serta emisi gas buang mesin diesel tipe *common rail* diperoleh beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

1. Laju konsumsi bahan bakar meningkat seiring dengan kenaikan putaran mesin untuk kedua jenis bahan bakar. Penggunaan B40 menghasilkan konsumsi bahan bakar yang sedikit lebih tinggi (sekitar 5–10%) dibandingkan B0, akibat nilai kalor biodiesel yang lebih rendah.
2. Emisi Gas Buang CO menurun signifikan pada B40, terutama pada putaran menengah–tinggi (penurunan 25–30%), menunjukkan pembakaran yang lebih sempurna. Sedangkan CO₂ sedikit meningkat pada B40, mengindikasikan peningkatan oksidasi karbon. Sementara untuk NOx rata-

rata menurun 15–20% pada B40 dibandingkan B0, terutama pada putaran menengah (1500 rpm), akibat suhu nyala yang lebih rendah dan proses pembakaran lebih lambat. Sedangkan kandungan O₂ sisa pada gas buang B40 sedikit lebih rendah (selisih $\pm 0,2\%$), menunjukkan pemanfaatan oksigen yang lebih efisien dalam pembakaran.

3. Hasil penelitian membuktikan bahwa B40 layak digunakan pada mesin diesel *common rail* tanpa modifikasi sistem bahan bakar.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Departemen Teknik Mesin, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada yang telah membiayai penelitian ini melalui skema Dana Masyarakat Tahun Anggaran 2025. Semoga hasil penelitian ini dapat bermanfaat bagi masyarakat dan mendukung perkembangan institusi

Daftar Pustaka

- A. Y. Noor et al., “Characterization of biodiesel properties and its impact on diesel engines,” *Fuel*, vol. 348, p. 128523, 2023.
- Kementerian ESDM, *Laporan Energi Bersih Nasional*, 2024.
- H. H. Chew et al., “Comprehensive review on emission trade-offs in biodiesel blends,” *Renew. Energy*, vol. 205, pp. 452–468, 2024.
- S. Wirawan et al., “Biodiesel implementation in Indonesia: Experiences and lessons,” *Renew. Sust. Energy Rev.*, vol. 189, 114273, 2024.
- USDA FAS, *Indonesia Biofuels Annual 2024*.
- S. Balamurugan, “Influence of biodiesel–diesel blends on NO_x emission,” *Energy Conv. Manage.*, vol. 266, p. 116084, 2022.
- S. Thakur et al., “Optimizing injection pressure for biodiesel combustion in common rail engines,” *Processes*, vol. 12, p. 864, 2024.
- J. Meng et al., “Waste cooking oil biodiesel/diesel blends in a CRDI engine,” *Fuel Processing Tech.*, vol. 252, p. 107500, 2023.
- A. Sethin et al., “Effects of B40 biodiesel on CRDI engine emission with EGR,” *Energies*, vol. 17, no. 3, p. 1123, 2024.
- P. S. Chowdhury et al., “Fuel economy and emission comparison of diesel and biodiesel blends,” *Energy Reports*, vol. 9, pp. 1864–1876, 2023.
- M. Selvam et al., “Combustion and emission characteristics of biodiesel blends (B30–B40),” *Sci. Rep.*, vol. 15, 1224, 2025.
- A. Sethin et al., “Effects of B40 biodiesel on CRDI engine emission with EGR,” *Energies*, vol. 17, no. 3, p. 1123, 2024.
- B. K. M. Mahgoub et al., “Effect of nano-biodiesel blends on CI engine performance and emissions,” *Heliyon*, vol. 9, e13827, 2023.
- J. Meng et al., “Waste cooking oil biodiesel/diesel blends in a CRDI engine,” *Fuel Processing Tech.*, vol. 252, p. 107500, 2023.
- P. S. Chowdhury et al., “Fuel economy and emission comparison of diesel and biodiesel blends,” *Energy Reports*, vol. 9, pp. 1864–1876, 2023.
- C. Wang et al., “Effect of oxygenated fuel on NO_x emission characteristics,” *Fuel Processing Tech.*, vol. 238, 107478, 2023.
- R. Ghazali et al., “Impact of engine speed on combustion and emission of biodiesel fuels,” *Energy Procedia*, vol. 207, pp. 1193–1202, 2022.
- H. H. Chew et al., “Comprehensive review on emission trade-offs in biodiesel blends,” *Renew. Energy*, vol. 205, pp. 452–468, 2024.