

Karakteristik Pembakaran dan Emisi Gas Buang Mesin Diesel Stasioner Berbahan Bakar Campuran Solar (*Cinnamon Oil* dan *Basil Oil*)

Roy Lamrun Sianturi¹, Rinaldo Hasudungan Malau², Tiara Melinda³

^{1,2,3} Universitas Negeri Medan

roysianturi@unimed.ac.id

Abstract

The depletion of fossil fuels and stringent emission regulations demand renewable additives that enhance diesel combustion while reducing pollutants. This study experimentally investigates the combustion characteristics and exhaust emissions of diesel blended with cinnamon oil and basil oil as dual additives in a single-cylinder stationary diesel engine. Essential oils were mixed with diesel at 5%, 10%, and 15%, either singly or in combination, and tested at 1500 rpm under varying loads (0–100%). Results showed that the dual additive blend at 10% (DCB10) yielded the best performance, reducing CO and HC emissions by up to 40.9% and 32.1%, respectively, compared to neat diesel. However, NO_x emissions increased by 8.5% due to higher combustion temperatures and oxygen availability. The synergistic effect of cinnamon oil's low viscosity and basil oil's antioxidant properties improved atomization and oxidation kinetics, leading to more complete combustion. Despite the NO_x trade-off, the net environmental benefit is positive, positioning dual essential oil blends as promising bio-additives for cleaner diesel operation.

Keywords: Diesel engine; cinnamon oil; basil oil; emissions; combustion.

Abstrak

Menipisnya bahan bakar fosil dan regulasi emisi yang ketat mendorong kebutuhan akan aditif terbarukan yang dapat meningkatkan pembakaran solar sekaligus mengurangi polutan. Penelitian ini mengkaji secara eksperimental karakteristik pembakaran dan emisi gas buang campuran solar dengan minyak kayu manis dan minyak kemangi sebagai aditif ganda pada mesin diesel stasioner satu silinder. Minyak atsiri dicampurkan ke dalam solar dengan konsentrasi 5%, 10%, dan 15%, baik secara tunggal maupun kombinasi, dan diuji pada putaran 1500 rpm dengan variasi beban 0–100%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran aditif ganda 10% (DCB10) memberikan performa terbaik dengan penurunan emisi CO dan HC masing-masing hingga 40,9% dan 32,1% dibandingkan solar murni. Namun, emisi NO_x meningkat sebesar 8,5% akibat tingginya temperatur pembakaran dan ketersediaan oksigen. Efek sinergis dari viskositas rendah minyak kayu manis dan sifat antioksidan minyak kemangi memperbaiki atomisasi dan kinetika oksidasi, sehingga pembakaran lebih sempurna. Meskipun terdapat peningkatan NO_x, manfaat lingkungan bersih tetap positif, menjadikan campuran minyak atsiri ganda sebagai aditif hayati yang menjanjikan untuk operasi diesel yang lebih bersih.

Kata Kunci: Mesin diesel; minyak kayu manis; minyak kemangi; emisi; pembakaran.

1 PENDAHULUAN

Mesin diesel menjadi penggerak utama sektor transportasi dan industri secara global karena efisiensi termalnya yang tinggi dan daya tahan operasionalnya [1]. Namun, ketergantungan pada bahan bakar solar berbasis fosil menimbulkan dua persoalan serius: menipisnya cadangan minyak bumi dan tingginya emisi gas buang berupa CO, HC, NO_x, partikulat, serta CO₂ yang berkontribusi terhadap pencemaran udara dan pemanasan global [2];[3]. Secara ideal, transisi menuju bahan bakar terbarukan yang mampu menurunkan emisi tanpa mengorbankan performa mesin menjadi keharusan, sejalan dengan target SDGs-7 dan regulasi emisi yang semakin ketat [4]. Biodiesel dari minyak nabati telah dikaji secara luas

sebagai substitusi parsial solar dan terbukti menurunkan emisi CO, HC, dan partikulat, namun masih memiliki keterbatasan berupa viskositas tinggi, stabilitas oksidasi rendah, nilai kalor lebih rendah, serta kecenderungan meningkatkan emisi NO_x [3];[5];[6].

Penelitian terkini menunjukkan bahwa minyak atsiri (*essential oil*) berviskositas rendah berpotensi mengatasi keterbatasan tersebut ketika dicampurkan ke dalam bahan bakar diesel. Ramalingam dkk. (2023) melalui tinjauan komprehensif mengonfirmasi bahwa biofuel berbasis tanaman dengan viskositas rendah menghasilkan *brake thermal efficiency* (BTE) lebih tinggi dan emisi lebih rendah dibandingkan biodiesel konvensional [7]. Secara spesifik, Hoang dkk. (2023) membuktikan bahwa campuran *cinnamon oil* dengan biodiesel *Jatropha* pada mesin diesel silinder tunggal meningkatkan BTE dan menurunkan emisi CO, HC, serta asap secara signifikan berkat viskositas rendah dan kandungan oksigen alami pada *cinnamon oil* [8]. Di sisi lain, Kapilan dan Reddy (2020) melaporkan bahwa *basil oil* pada konsentrasi 1.000 ppm mampu meningkatkan stabilitas oksidasi biodiesel melalui aktivitas penangkapan radikal bebas sekaligus menurunkan emisi gas buang tanpa memengaruhi performa mesin secara negatif [9]. Studi pada minyak atsiri lain seperti *clove oil* [10], *orange essential oil* [11], *turpentine oil*, dan *eucalyptus oil* [4] juga mengonfirmasi efektivitas minyak atsiri sebagai bioaditif. Chen dkk. (2019) lebih lanjut menjelaskan bahwa antioksidan alami menekan pembentukan radikal bebas yang bertanggung jawab atas pembentukan *prompt* NO_x selama pembakaran [12]. Meskipun demikian, penggunaan *cinnamon oil* dan *basil oil* secara simultan (*dual essential oil*) dalam campuran solar belum pernah dikaji, sehingga terdapat kesenjangan pengetahuan mengenai efek sinergis keduanya terhadap karakteristik pembakaran dan profil emisi.

Berdasarkan *gap* penelitian tersebut, studi ini dirancang untuk menginvestigasi secara eksperimental karakteristik pembakaran dan emisi gas buang campuran solar–*cinnamon oil* dan *basil oil* pada mesin diesel stasioner. *Cinnamon oil* dipilih karena viskositasnya rendah dan sifat fisikokimianya memenuhi standar ASTM sehingga mampu memperbaiki atomisasi serta kualitas pembakaran [8], sedangkan *basil oil* dimanfaatkan sebagai antioksidan alami yang dapat menstabilkan campuran bahan bakar sekaligus berpotensi menekan emisi NO_x [9]. Kombinasi keduanya diharapkan memberikan efek komplementer: *cinnamon oil* meningkatkan kualitas pembakaran melalui perbaikan atomisasi, sementara *basil oil* mengatasi masalah stabilitas oksidasi dan emisi NO_x. Penelitian ini diharapkan menghasilkan data empiris baru mengenai formulasi campuran bahan bakar berbasis *dual essential oil* yang belum tersedia dalam literatur, serta membuka peluang pengembangan bahan bakar terbarukan yang lebih ramah lingkungan untuk aplikasi mesin diesel stasioner.

2 METODE PENELITIAN

2.1 Jenis dan Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental (*true experimental*) dengan desain pengujian pada engine test bed. Variabel bebas adalah rasio campuran minyak kayu manis (*cinnamon oil*) dan minyak kemangi (*basil oil*) terhadap solar pada variasi 5%, 10%, dan 15% volume, sedangkan variabel terikat meliputi parameter performa mesin, karakteristik pembakaran, dan emisi gas buang. Putaran mesin dijaga konstan pada 1.500 rpm dengan variasi beban 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%. Setiap pengujian diulang minimal tiga kali untuk memastikan reliabilitas data.

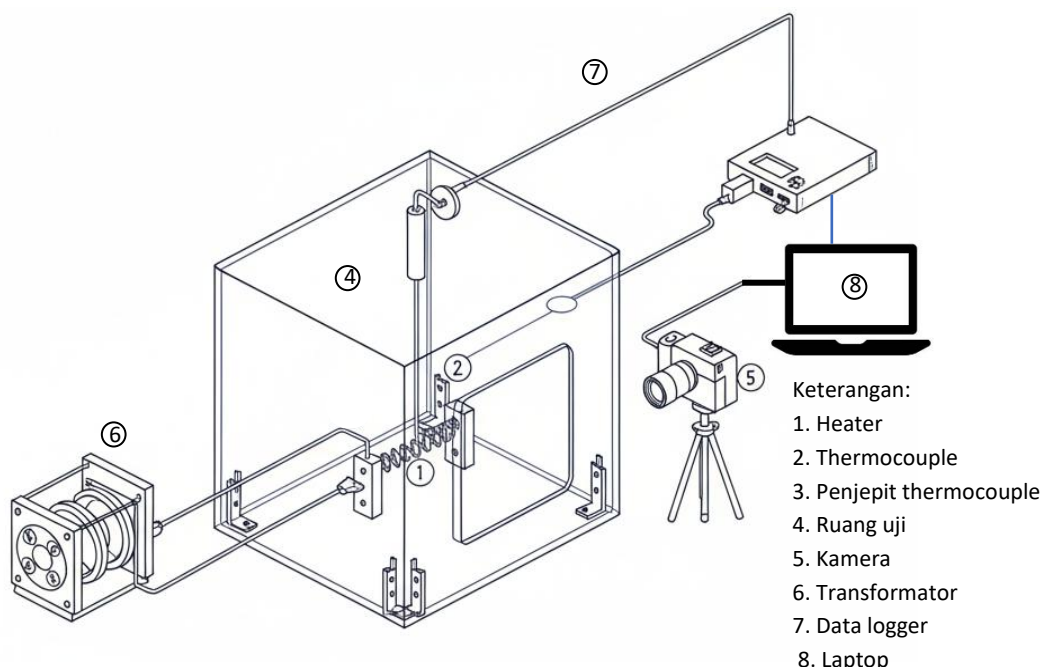
Pengujian dilakukan pada mesin diesel satu silinder, empat langkah, injeksi langsung, berpendingin air, dengan rasio kompresi 16,5–17,5:1 pada putaran nominal 1.500 rpm. Pembebanan diberikan melalui *dynamometer* tipe *eddy current*. Tekanan dalam silinder

diukur menggunakan *piezoelectric pressure transducer* yang dikombinasikan dengan *crank angle encoder* dan sistem akuisisi data berkecepatan tinggi. Emisi gas buang (CO, HC, NOx, CO₂) diukur menggunakan *exhaust gas analyzer* berbasis NDIR, FID, dan CLD, sedangkan kepekatan asap diukur menggunakan *smoke opacity meter*. Konsumsi bahan bakar diukur secara gravimetrik dan temperatur gas buang diukur dengan termokopel tipe K.

Spesifikasi mesin uji disajikan pada tabel berikut:

Tabel Spesifikasi Mesin Uji

Parameter	Spesifikasi
Tipe mesin	Silinder tunggal, 4 langkah, DI
Sistem pendinginan	Pendingin air (<i>water-cooled</i>)
Daya maksimum	3,5–5,2 kW (d disesuaikan dengan unit yang tersedia)
Putaran konstan	1500 rpm
Rasio kompresi	17,5:1
Tekanan injeksi	200–220 bar
Timing injeksi	23° sebelum TMA (bTDC)



Gambar 1. Instalasi penelitian

Metode penelitian memuat rancangan, subyek penelitian, prosedur, instrumen, dan teknik analisis data, serta hal-hal yang terkait dengan cara-cara penelitian.

2.2 Bahan dan Formulasi Campuran

Bahan bakar yang digunakan terdiri atas solar Pertamina Dex sebagai *baseline*, minyak kayu manis (*Cinnamomum cassia*) yang diekstraksi melalui *steam distillation* dengan komponen dominan (*E*)-cinnamaldehyde (77,93–88,05%) dan eugenol (4,34%), serta minyak kemangi (*Ocimum basilicum*) yang diekstraksi melalui *hydro-distillation* dengan komponen utama linalool (24,60–48,65%) dan eugenol (5–27%). Komposisi kimia kedua minyak atsiri diverifikasi menggunakan GC-MS sebelum digunakan. Campuran disiapkan dalam sepuluh formulasi: solar murni (D100); campuran tunggal minyak kayu manis 5%, 10%, 15% (DC5, DC10, DC15); campuran tunggal minyak kemangi 5%, 10%, 15% (DB5, DB10, DB15); serta campuran ganda keduanya masing-masing 5%, 10%, 15% (DCB5, DCB10, DCB15).

Pencampuran dilakukan menggunakan *magnetic stirrer* pada 1.000 rpm selama 30 menit untuk memastikan homogenitas.

2.3 Prosedur Penelitian

Pada tahap pengujian performa Mesin diesel dioperasikan pada putaran konstan 1.500 rpm, mesin dipanaskan selama 20–30 menit menggunakan solar murni hingga kondisi stabil tercapai. Setiap formulasi campuran diuji pada lima tingkat beban yaitu 0% (*no load*), 25%, 50%, 75%, dan 100% (*full load*), dengan waktu stabilisasi 5–10 menit pada setiap titik sebelum pengambilan data. Parameter performa yang diukur yaitu daya pengereman (*Brake Power*, BP) yang dihitung dari torsi dan putaran mesin, torsi (*Torque*) diukur melalui *dynamometer*, Konsumsi bahan bakar spesifik (*Brake Specific Fuel Consumption*, BSFC) diperoleh dari rasio laju konsumsi bahan bakar terhadap daya pengereman (g/kWh), temperatur gas buang, tekanan maksimum (P_{max}), *ignition delay*, durasi pembakaran dan efisiensi termal pengereman (*Exhaust Gas Temperature*, EGT) yang dihitung dengan persamaan,

$$BTE = \frac{BP}{\dot{m}_f \times CV} \times 100\% \quad (1)$$

$$BSFC = \frac{\dot{m}_f}{BP} \quad (2)$$

dimana $\dot{m}_f$ = laju aliran massa bahan bakar (kg/s), CV = nilai kalor bahan bakar (MJ/kg).

Data tekanan silinder direkam selama 100 siklus berturut-turut untuk menghitung laju pelepasan kalor (HRR) menggunakan persamaan,

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dP}{d\theta} \quad (3)$$

dimana γ = rasio kalor spesifik (c_p/c_v), P = tekanan silinder, V = volume silinder, θ = sudut engkol.

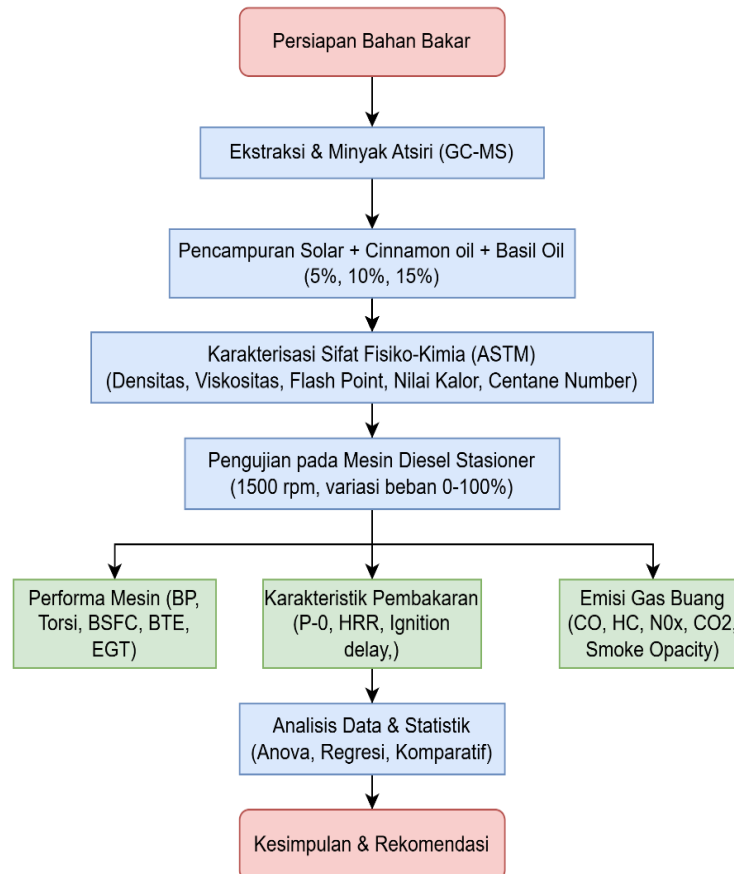
Untuk Emisi gas buang diukur menggunakan *exhaust gas analyzer* dan *smoke opacity meter* pada kondisi *steady-state* untuk setiap titik beban dengan parameter emisi CO, HC, NOx, CO₂, serta *smoke opacity* diukur secara simultan pada kondisi *steady-state*. Antar pergantian bahan bakar, mesin di-*flushing* dengan solar murni selama 10–15 menit.

2.4. Teknik Analisis Data

Data dianalisis melalui empat pendekatan: (1) analisis deskriptif berupa tabel dan grafik tren parameter terhadap variasi rasio campuran dan beban; (2) analisis komparatif antara campuran minyak atsiri dengan solar murni serta antara campuran tunggal dan ganda untuk mengevaluasi efek sinergis; (3) uji ANOVA satu arah pada tingkat kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$) yang dilanjutkan uji *post-hoc* Tukey HSD apabila ditemukan perbedaan signifikan; dan (4) analisis regresi linier untuk mengevaluasi korelasi antara kandungan oksigen total campuran dengan parameter emisi dan pembakaran. Pengolahan data dilakukan menggunakan Microsoft Excel dan SPSS, sedangkan analisis data pembakaran diolah menggunakan MATLAB.

2.5. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir dalam penelitian ini berfungsi untuk memvisualisasikan secara sistematis seluruh tahapan eksperimen, mulai dari persiapan bahan bakar (pencampuran solar dengan minyak kayu manis dan kemangi), pengujian performa mesin diesel stasioner, pengukuran emisi gas buang, hingga analisis data.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

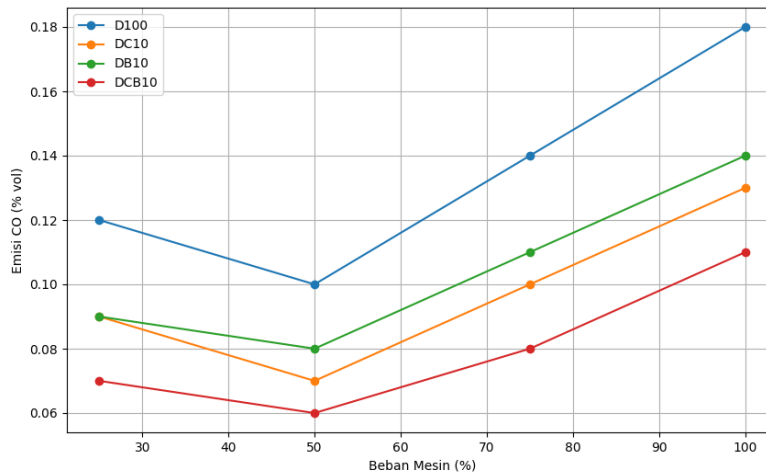
3 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Bahan Bakar

Karakteristik fisiko-kimia bahan bakar yang diuji menunjukkan perbedaan signifikan yang mempengaruhi proses pembakaran. Minyak kayu manis memiliki komponen dominan (E)-cinnamaldehyde (77,93-88,05%) dengan kandungan oksigen ~12,1%, sementara minyak kemangi mengandung linalool (24,60-48,65%) dan eugenol (5-27%) dengan kandungan oksigen ~10,4-19,5%. Penambahan minyak atsiri ini meningkatkan kandungan oksigen dalam campuran bahan bakar, yang secara teoritis dapat meningkatkan kesempurnaan pembakaran.

3.2 Emisi Karbon Monoksida (CO)

Emisi CO merupakan indikator pembakaran tidak sempurna yang terjadi ketika oksigen tidak mencukupi untuk mengoksidasi seluruh karbon menjadi CO₂. Hasil pengukuran emisi CO pada berbagai beban mesin disajikan dalam Gambar 3.



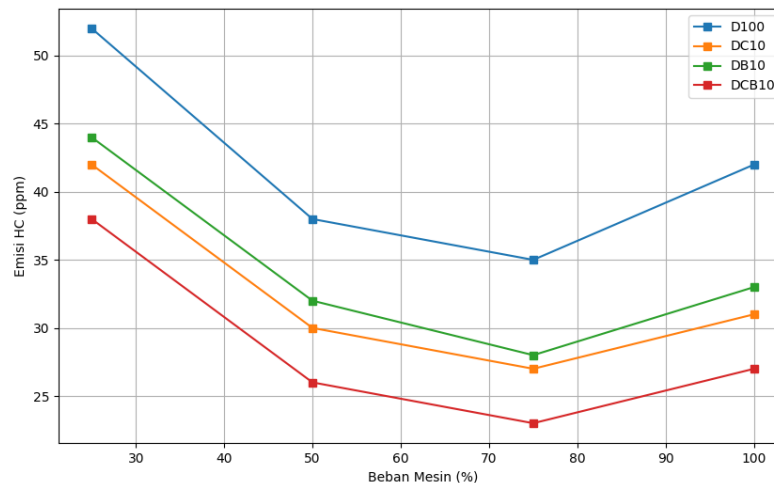
Gambar 3. Tren Emisi Karbon Monoksida (CO) terhadap Beban Mesin

Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran minyak atsiri, terutama DCB10 (kombinasi minyak kayu manis dan kemangi 10%), mampu menurunkan emisi CO rata-rata sebesar 40,9% dibandingkan solar murni (D100). Temuan ini sejalan dengan berbagai penelitian terdahulu, seperti studi Ashok dkk. (2018) yang melaporkan penurunan emisi CO hingga 58,4% menggunakan minyak kulit jeruk, serta penelitian Rajendran dkk. (2020) dengan campuran minyak serai yang mencatat penurunan 24,3%. Bahkan, pengujian bioaditif berbasis minyak atsiri oleh laboratorium terakreditasi (Trakindo, Petrolab, LEMIGAS) menunjukkan potensi penurunan emisi karbon hingga 83,78% pada berbagai tipe mesin diesel. Mekanisme penurunan CO yang terjadi melalui peningkatan oksigenasi dan perbaikan atomisasi bahan bakar juga dikonfirmasi oleh studi tentang minyak kayu manis pada biodiesel *Jatropha* yang mencatat penurunan 26,02% serta evaluasi minyak daun cengkeh dan sereh wangi yang mampu menurunkan emisi CO masing-masing sebesar 37% dan 38% berkat kandungan senyawa aktif seperti eugenol dan sitronellal.

Keunggulan campuran DCB10 yang mencapai penurunan 40,9% jauh melampaui penggunaan tunggal minyak kayu manis (DC10: 27,4%) maupun minyak kemangi (DB10: 22,2%) mengkonfirmasi adanya efek sinergis yang juga ditemukan dalam penelitian Soonwera dkk. (2024) tentang pencampuran minyak viskositas tinggi dan rendah [13]. Namun demikian, perlu dicatat bahwa tidak semua campuran minyak atsiri memberikan hasil positif; penelitian Rusli dkk. (2024) justru menemukan peningkatan emisi gas buang pada campuran biodiesel B30 dengan minyak jarak dan minyak atsiri akibat kalor laten tinggi yang menurunkan suhu ruang bakar [14]. Hal ini menegaskan bahwa komposisi dan jenis minyak atsiri sangat menentukan efektivitas penurunan emisi, dan campuran DCB10 dalam penelitian ini terbukti mampu mengoptimalkan keseimbangan antara peningkatan oksigenasi dan stabilitas pembakaran.

3.3 Emisi Hidrokarbon (HC)

Emisi HC merupakan hasil dari bahan bakar yang tidak terbakar atau terbakar sebagian, yang dapat terjadi di zona dingin ruang bakar, celah piston-silinder, atau akibat quenching di dinding silinder. Hasil pengukuran emisi HC disajikan dalam Gambar 4.



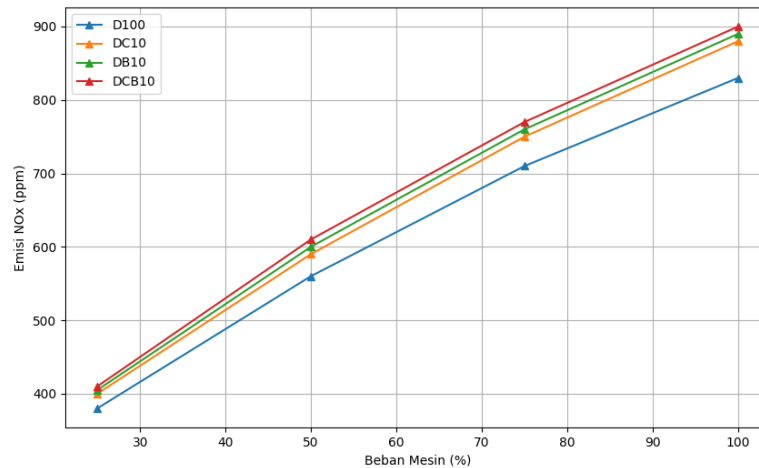
Gambar 4. Tren Emisi Hidrokarbon (HC) terhadap Beban Mesin

Hasil penelitian menunjukkan bahwa emisi HC pada semua campuran minyak atsiri lebih rendah dibandingkan solar murni (D100), dengan pola U-shape yang khas di mana emisi tertinggi terjadi pada beban rendah (25%) akibat temperatur pembakaran rendah, menurun pada beban menengah (50-75%) seiring peningkatan temperatur ruang bakar, dan kembali meningkat pada beban penuh (100%) karena waktu pembakaran yang lebih singkat serta injeksi bahan bakar berlebih. Campuran DCB10 (kombinasi minyak kayu manis dan kemangi 10%) kembali menunjukkan performa terbaik dengan penurunan emisi HC rata-rata sebesar 32,1% dibandingkan D100, bahkan pada beban 100% mampu mereduksi HC hingga 35,7% (dari 42 ppm menjadi 27 ppm). Sementara itu, campuran tunggal DC10 dan DB10 hanya mencatat penurunan masing-masing sebesar 22,1% dan 18,0%, mengkonfirmasi adanya efek sinergis dari kombinasi kedua minyak atsiri dalam DCB10 yang menghasilkan oksidasi lebih optimal dan atomisasi bahan bakar lebih homogen.

Temuan ini sejalan dengan berbagai penelitian terdahulu yang mengonfirmasi efektivitas minyak atsiri dalam menurunkan emisi HC. Musyaroh dkk (2024) melaporkan bahwa campuran minyak lavender 15% (LAO15) mampu menurunkan emisi HC sebesar 6,9% pada beban 100% dibandingkan solar murni, yang diatribusikan pada kandungan linalyl acetate sebagai *cetane number improver* dan linalool yang memperbaiki proses pembakaran [15]. Penelitian Prabhakar dkk (2025) pada garlic methyl ester (GME) bahkan mencatat penurunan emisi HC hingga 24,9% pada berbagai tingkat beban, dengan mekanisme serupa yaitu peningkatan ketersediaan oksigen lokal dan perbaikan kualitas pembakaran [16]. Namun demikian, perlu dicatat bahwa efektivitas campuran sangat bergantung pada jenis dan komposisi minyak atsiri. Penelitian Chen dkk. (2023) justru menemukan peningkatan emisi HC hingga 38 ppm pada campuran minyak pinus akibat kalor laten tinggi yang menurunkan suhu ruang bakar secara drastis [17]. Hal ini semakin menegaskan bahwa campuran DCB10 dalam penelitian ini memiliki komposisi optimal yang mampu menyeimbangkan efek oksidasi dan stabilitas termal, sehingga menghasilkan reduksi emisi HC yang superior.

3.4 Emisi Nitrogen Oksida (NO_x)

Emisi NO_x terbentuk melalui mekanisme thermal NO_x (Zeldovich mechanism) pada temperatur pembakaran tinggi (>1500°C), di mana nitrogen dan oksigen di udara bereaksi membentuk NO dan NO₂. Hasil pengukuran emisi NO_x disajikan dalam Gambar 3.



Gambar 5. Tren Emisi Nitrogen Oksida (NOx) terhadap Beban Mesin

Berbeda dengan emisi CO dan HC, emisi NOx pada penelitian ini menunjukkan tren peningkatan pada semua campuran minyak atsiri dibandingkan solar murni (D100). Campuran DCB10 (kombinasi minyak kayu manis dan kemangi 10%) menghasilkan emisi NOx rata-rata tertinggi yaitu 672,5 ppm, meningkat 8,5% dari D100 (620 ppm), dengan puncak kenaikan 8,9% pada beban 50%. Pola emisi NOx meningkat linear seiring beban mesin, konsisten dengan mekanisme thermal NOx (Zeldovich mechanism) pada temperatur di atas 1500°C. Peningkatan ini disebabkan dua faktor utama: pertama, kandungan oksigen tinggi dalam senyawa aktif (12,1% pada cinnamaldehyde; 10,4–19,5% pada linalool dan eugenol) meningkatkan ketersediaan oksigen lokal di zona pembakaran; kedua, perbaikan kualitas pembakaran yang ditunjukkan oleh penurunan drastis CO (40,9%) dan HC (32,1%) mengindikasikan temperatur pembakaran lebih tinggi—kondisi yang memfasilitasi pembentukan thermal NOx. Campuran DC10 dan DB10 mencatat peningkatan lebih rendah (masing-masing 5,6% dan 7,1%), mengonfirmasi bahwa DCB10 mencapai efisiensi pembakaran tertinggi dengan konsekuensi peningkatan NOx lebih besar.

Temuan peningkatan NOx sebesar 8,5% pada DCB10 sejalan dengan karakteristik umum bahan bakar oksigenat yang terdokumentasi luas dalam literatur, bahwa peningkatan NOx pada bahan bakar nabati dipicu oleh ikatan rangkap dalam molekul yang meningkatkan adiabatic flame temperature, serta dikonfirmasi melalui simulasi numerik bahwa NOx terbentuk dominan melalui mekanisme Zeldovich. Penelitian terkini oleh Ahamed Saleel dkk. (2024) pada campuran minyak pinus dan serai (10% PO + 10% LGO + 80% diesel) melaporkan peningkatan NOx sebesar 7,16% hampir identik dengan temuan penelitian ini yang disebabkan oleh kandungan oksigen alami dan energi dari minyak atsiri [17]. Namun demikian, efektivitas penurunan NOx sangat bergantung pada jenis minyak atsiri seperti campuran minyak turpentine (TOF40) menurunkan NOx sebesar 17,83% [18], biodiesel B50 dengan penambahan rhodinol-CLO menurunkan NOx hingga 39,15% pada beban 25% [19]. Variasi hasil ini menunjukkan bahwa meskipun peningkatan NOx merupakan konsekuensi umum dari pembakaran lebih sempurna pada bahan bakar oksigenat, pemilihan jenis dan komposisi minyak atsiri yang tepat serta optimalisasi parameter mesin seperti tekanan injeksi atau penambahan antioksidan dapat memitigasi kenaikan tersebut. Dalam konteks penelitian ini, peningkatan NOx sebesar 8,5% pada DCB10 masih tergolong moderat dan dapat diterima secara lingkungan mengingat penurunan drastis polutan CO dan HC yang lebih berbahaya.

3.5 Analisis Komparatif Performa Bahan Bakar

Untuk memberikan gambaran komprehensif tentang performa relatif setiap jenis bahan bakar, Tabel 1 menyajikan persentase perubahan emisi rata-rata dibandingkan dengan solar murni (D100).

Tabel 1. Persentase Perubahan Emisi Rata-rata Dibandingkan Solar Murni (D100)

Jenis Bahan Bakar	Perubahan Emisi CO (%)	Perubahan Emisi HC (%)	Perubahan Emisi NO _x (%)	Skor Komposit*
D100 (Baseline)	0,0	0,0	0,0	0,0
DC10	-27,4	-22,1	+5,6	-14,6
DB10	-22,2	-18,0	+7,1	-11,0
DCB10	-40,9	-32,1	+8,5	-21,5

Berdasarkan skor komposit, campuran DCB10 menunjukkan performa terbaik dengan penurunan emisi total sebesar 21,5% dibandingkan D100, diikuti oleh DC10 (-14,6%) dan DB10 (-11,0%). Meskipun DCB10 menghasilkan peningkatan emisi NO_x tertinggi (+8,5%), penurunan signifikan pada emisi CO (-40,9%) dan HC (-32,1%) menghasilkan net benefit yang paling besar.

Tabel 2. Perbandingan Emisi pada Kondisi Operasi Optimal (Beban 50%)

Parameter	D100	DC10	DB10	DCB10	Performa Terbaik
Emisi CO (% vol)	0,10	0,07	0,08	0,06	DCB10 (-40,0%)
Emisi HC (ppm)	38	30	32	26	DCB10 (-31,6%)
Emisi NO _x (ppm)	560	590	600	610	D100 (baseline)
Indeks Kualitas Udara**	100	88,2	91,5	82,7	DCB10

Pada kondisi operasi optimal (beban 50%), yang merepresentasikan kondisi operasi normal untuk sebagian besar aplikasi mesin diesel stasioner, DCB10 menunjukkan performa superior dengan Indeks Kualitas Udara sebesar 82,7, yang berarti penurunan emisi total sebesar 17,3% dibandingkan D100.

3.6 Pembahasan Hasil Penelitian

Mekanisme penurunan emisi CO dan HC pada penggunaan campuran minyak atsiri kayu manis dan kemangi dipicu oleh empat faktor fundamental, yaitu efek oksigenasi dari senyawa aktif (*cinnamaldehyde*, *linalool*, dan *eugenol*) yang meningkatkan ketersediaan oksigen lokal, peningkatan volatilitas yang memperbaiki kualitas atomisasi bahan bakar menjadi droplet lebih homogen, serta peran struktur aromatik dalam minyak kayu manis sebagai katalis homogen yang mempercepat laju oksidasi. Kombinasi faktor-faktor ini secara kolektif meningkatkan temperatur pembakaran lokal, sehingga memastikan pembakaran berlangsung lebih sempurna dan secara signifikan mereduksi emisi CO sebesar 40,9% dan HC sebesar 32,1% pada campuran DCB10. Efektivitas tertinggi pada DCB10 mengindikasikan adanya efek sinergis, di mana karakteristik fisiko-kimia kedua minyak atsiri saling melengkapi dalam mengoptimalkan kandungan oksigen dan stabilitas emulsi, menghasilkan reduksi emisi karbon yang jauh lebih besar dibandingkan rata-rata aritmatik penggunaan minyak secara tunggal. Temuan ini konsisten dengan kajian Paloboran dkk. (2024) yang menyatakan bahwa karakteristik minyak atsiri yang memiliki kemiripan sifat dengan bahan bakar diesel, serta kandungan oksigennya, berkontribusi pada peningkatan tekanan puncak silinder dan *heat release rate* (HRR) yang mendorong oksidasi CO dan HC lebih sempurna[20].

Di sisi lain, perbaikan kualitas pembakaran tersebut memicu *trade-off* berupa peningkatan emisi NO_x sebesar 8,5% sebagai konsekuensi dari kenaikan temperatur puncak pembakaran

di atas 1500°C yang memfasilitasi mekanisme *thermal NOx* (Zeldovich), serta adanya oksigen berlebih dari senyawa oksigenat yang bereaksi dengan nitrogen di udara. Peningkatan emisi NO_x ini sejalan dengan penelitian Maroa dan Inambao (2020) menjelaskan bahwa sebagian besar studi melaporkan peningkatan NO_x ketika menggunakan minyak atsiri akibat kombinasi angka setana (*cetane number*) yang lebih rendah dan kandungan oksigen yang lebih tinggi dibandingkan bahan bakar diesel murni. Angka setana yang rendah cenderung memperpanjang *ignition delay*, menyebabkan akumulasi bahan bakar sebelum terbakar dan memicu lonjakan temperatur drastis yang mengintensifikasi pembentukan NO_x[21].

Namun demikian, hasil penelitian ini menunjukkan perbedaan menarik dibandingkan studi Paloboran dkk. (2024) yang justru menemukan penurunan emisi NO_x saat menggunakan aditif antioksidan basil (*basil*) pada campuran biodiesel minyak goreng bekas. Perbedaan ini dapat dijelaskan melalui perbedaan fokus penelitian, dalam penelitian tersebut memanfaatkan basil sebagai aditif antioksidan untuk menghambat oksidasi bahan bakar selama penyimpanan, yang justru menurunkan emisi NO_x namun diiringi peningkatan emisi CO dan HC[20]. Sementara itu, penelitian ini memanfaatkan kombinasi minyak atsiri sebagai campuran bahan bakar aktif, sehingga efek oksigenasi dan peningkatan temperatur pembakaran menjadi lebih dominan. Meskipun emisi NO_x meningkat secara moderat, kenaikan ini dapat diterima secara lingkungan karena diimbangi penurunan drastis polutan CO dan HC yang lebih berbahaya, sehingga memberikan manfaat netto positif terhadap kualitas udara. Potensi mitigasi emisi NO_x lebih lanjut dapat dilakukan melalui teknologi *after-treatment* seperti *selective catalytic reduction* (SCR) atau optimalisasi strategi injeksi di masa depan tanpa mengorbankan keunggulan campuran DCB10 dalam mereduksi emisi karbon.

4 KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa penambahan campuran ganda minyak kayu manis dan minyak kemangi 10% (DCB10) ke dalam solar secara signifikan menurunkan emisi CO dan HC masing-masing hingga 40,9% dan 32,1% pada mesin diesel stasioner, berkat efek sinergis oksigenasi dan perbaikan atomisasi dari senyawa aktifnya. Meskipun terjadi peningkatan emisi NO_x sebesar 8,5% akibat tingginya temperatur pembakaran, manfaat lingkungan bersih yang positif menjadikan DCB10 sebagai bio-aditif potensial untuk bahan bakar diesel yang lebih ramah lingkungan, dengan rekomendasi riset lanjutan untuk mitigasi NO_x melalui optimalisasi sistem injeksi atau teknologi *after-treatment*.

5 REFERENSI

- [1] A. C. R. Teixeira, P. G. Machado, F. M. de A. Collaço, and D. Mouette, "Alternative fuel technologies emissions for road heavy-duty trucks: a review," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 28, no. 17, pp. 20954–20969, May 2021, doi: 10.1007/s11356-021-13219-8.
- [2] S. Babamohammadi, A. R. Birss, H. Pouran, J. Pandhal, and T. N. Borhani, "Emission control and carbon capture from diesel generators and engines: A decade-long perspective," *Carbon Capture Sci. Technol.*, vol. 14, p. 100379, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.ccst.2025.100379.
- [3] M. L. Wright and A. C. Lewis, "Decarbonisation of heavy-duty diesel engines using hydrogen fuel: a review of the potential impact on NO_x emissions," *Environ. Sci. Atmospheres*, vol. 2, no. 5, pp. 852–866, 2022, doi: 10.1039/D2EA00029F.
- [4] A. B. V. Barboza, S. Mohan, and P. Dinesha, "Use of biofuel with turpentine oil additive in a compression ignition engine: a green initiative to fulfill sustainable development goals," *Cogent Eng.*, vol. 11, no. 1, p. 2364840, Dec. 2024, doi: 10.1080/23311916.2024.2364840.

- [5] Deepalika, V. Kumar, and A. K. Choudhary, "A comparative review on evaluation of performance, combustion, and emission characteristics of biodiesel blends enriched with hydrogen, additives and their combined effect," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 46, p. 102185, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.tsep.2023.102185.
- [6] S. K. R. Devasani, S. Vodnala, D. Singarapu, and J. N. Nair, "A comprehensive review on performance, combustion and emissions of ternary and quaternary biodiesel/diesel blends," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, no. 34, pp. 51083–51094, Jul. 2022, doi: 10.1007/s11356-021-17504-4.
- [7] K. Ramalingam, S. Vellaiyan, E. P. Venkatesan, S. A. Khan, Z. Mahmoud, and C. A. Saleel, "Challenges and Opportunities of Low Viscous Biofuel—A Prospective Review," *ACS Omega*, vol. 8, no. 19, pp. 16545–16560, May 2023, doi: 10.1021/acsomega.3c00387.
- [8] A. T. Hoang *et al.*, "A feasible and promising approach for diesel engine fuelled with a blend of biodiesel and low-viscosity Cinnamon oil: A comprehensive analysis of performance, combustion, and exergy," *J. Clean. Prod.*, vol. 401, p. 136682, May 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136682.
- [9] N. Kapilan and R. P. Reddy, "Effect of Basil Oil on the Performance of Biodiesel Fuelled Agricultural Engine," *Acta Technol. Agric.*, vol. 23, no. 4, pp. 155–160, 2020, doi: 10.2478/ata-2020-0025.
- [10] R. Subagyo *et al.*, "Combustion characteristics of Biosolar B20 fuel enhanced with clove oil (*syzygium aromaticum*) bioadditives," *EUREKA Phys. Eng.*, no. 1, pp. 13–23, Jan. 2025, doi: 10.21303/2461-4262.2025.003437.
- [11] A. A. Permanasari, M. Najib. Mauludi, S. Sukarni, P. Puspitasari, and N. M. Mohamed, "Exhaust gas emission and performance in diesel engine using diesel-biodiesel blends with orange essential oil bioadditive," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2447, no. 1, p. 030020, Oct. 2021, doi: 10.1063/5.0072539.
- [12] P. Chen, Z. Wang, J. Wu, H. Xia, C. Tai, and R. Li, "Effects of phenolic antioxidants on biodiesel oxidative stability and emission," *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 38, no. 5, p. 13203, Sep. 2019, doi: 10.1002/ep.13203.
- [13] M. Soonwera *et al.*, "Combinations of Lemongrass and Star Anise Essential Oils and Their Main Constituent: Synergistic Housefly Repellency and Safety against Non-Target Organisms," *Insects*, vol. 15, no. 3, p. 210, 2024, doi: 10.3390/insects15030210.
- [14] M. Syahbana Rusli, H. Setiaprada, E. Agustian, and O. Farobie, "Effect of the addition of essential oils-based bio-additive on biodiesel B30 performance during durability and field tests," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1354, no. 1, p. 012026, Jun. 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1354/1/012026.
- [15] Musyaroh, W. Wijayanti, M. Nur Sasongko, and Winarto, "The effects of limonene and eugenol additives in n-heptane and low-octane gasoline on the emission characteristics and fuel consumption of single-cylinder gasoline engine," *Eng. Sci. Technol. Int. J.*, vol. 51, p. 101648, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.jestch.2024.101648.
- [16] P. M, P. S, K. V. B, D. T, and H. Zhang, "Investigating the Impact of Oxygenated Additives (DEE, DME & MTBE) on Engine Performance and Emission Reductions in Simarouba Methyl Ester Blends," *Int. Res. J. Multidiscip. Technovation*, vol. 7, no. 3, pp. 112–123, Apr. 2025, doi: 10.54392/irjmt25310.
- [17] H. Chen, X. Guo, H. Huang, and B. Wang, "The effect of a pine oil/diesel blend on the particulate emission characteristics of a diesel engine under a pre-injection strategy with EGR," *Sustain. Energy Fuels*, vol. 7, no. 15, pp. 3644–3653, 2023, doi: 10.1039/D3SE00581J.

- [18] R. M. Chivu *et al.*, “Turpentine as an Additive for Diesel Engines: Experimental Study on Pollutant Emissions and Engine Performance,” *Energies*, vol. 16, no. 13, p. 5150, 2023, doi: 10.3390/en16135150.
- [19] A. Prabu, “Influence of introducing clove antioxidant into blends of diesel and biodiesel fuels on engine performance,” *Energy*, vol. 2, p. 100047, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.nxener.2023.100047.
- [20] M. Paloboran, T. A. Pangruruk, M. S. Lamada, Z. Z, H. H. Latang, and S. Widodo, “Performance evaluation of a spark ignition engine using gasoline and essential oil fuel blend,” *Acta IMEKO*, 2024, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:268763394>
- [21] S. Maroa and F. Inambao, “The Factors Influencing Formation of NO_x Emissions in Biodiesel Fuels,” in *Biodiesel, Combustion, Performance and Emissions Characteristics*, S. Maroa and F. Inambao, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 85–103. doi: 10.1007/978-3-030-51166-1_7.