

Pengaruh Penambahan Kapur Barus pada Bahan Bakar Bensin terhadap Prestasi dan Emisi Mesin Bensin

Rahmat Hidayat^{1*}, Suyuti², Barokah³, Rahman Raising⁴

^{1,2}D4 Teknika, Fakultas, Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar, Makassar, Indonesia

³Politeknik Kelautan dan Perikanan Bitung, Indonesia

⁴Prodi Nautika, Politeknik Maritim AMI Makassar (POLIMARIM), Makassar, Indonesia

Email: ¹batejolloro@gmail.com

Abstract

This study aims to analyze the effect of adding camphor or naphthalene to gasoline on the performance and exhaust emissions of a gasoline engine. An experimental method was applied using a single-cylinder, four-stroke Enduro XL gasoline engine with camphor concentrations of 0%, 5%, 10%, 20%, and 30%. Tests were conducted at engine speeds of 1,200, 1,400, 1,600, 1,800, and 2,000 rpm. The parameters analyzed included calorific value, fuel density, effective shaft power, fuel consumption, thermal efficiency, exhaust gas temperature, and carbon monoxide emissions. The results showed that increasing the camphor concentration reduced the fuel calorific value from 12,347 kcal/kg to 6,306 kcal/kg and increased the density from 750 kg/m³ to 780 kg/m³. The addition of camphor tended to increase effective shaft power and reduce measured fuel consumption. However, carbon monoxide emissions increased significantly, particularly at camphor concentrations of 20–30% and at low engine speeds. At 1,200 rpm, CO emissions increased from 0.7% for pure gasoline to 8.7% for the 30% camphor mixture. Therefore, camphor addition creates a trade-off between improved engine performance and deteriorating exhaust emission quality. High camphor concentrations are not recommended, while concentrations of 5–10% require further testing to assess their technical effectiveness, environmental impact, and long-term effects on engine components.

Keywords: Camphor, Gasoline Fuel, Effective Shaft Power, Fuel Consumption, Carbon Monoxide Emissions.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penambahan kapur barus atau naftalena pada bahan bakar bensin terhadap prestasi dan emisi gas buang mesin bensin. Penelitian menggunakan metode eksperimen pada mesin bensin Enduro XL satu silinder empat langkah dengan variasi campuran kapur barus sebesar 0%, 5%, 10%, 20%, dan 30%. Pengujian dilakukan pada putaran mesin 1.200, 1.400, 1.600, 1.800, dan 2.000 rpm. Parameter yang dianalisis meliputi nilai kalor, massa jenis, daya poros efektif, pemakaian bahan bakar, efisiensi termal, temperatur gas buang, dan emisi karbon monoksida. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar kapur barus menurunkan nilai kalor bahan bakar dari 12.347 kkal/kg menjadi 6.306 kkal/kg dan meningkatkan massa jenis dari 750 kg/m³ menjadi 780 kg/m³. Penambahan kapur barus cenderung meningkatkan daya poros efektif dan menurunkan pemakaian bahan bakar terukur. Namun, kadar emisi karbon monoksida meningkat secara signifikan, terutama pada campuran 20–30% dan putaran rendah. Pada 1.200 rpm, emisi CO meningkat dari 0,7% pada bensin murni menjadi 8,7% pada campuran 30%. Dengan demikian, penambahan kapur barus menghasilkan pertukaran antara peningkatan prestasi mesin dan penurunan kualitas emisi. Campuran berkadar tinggi belum direkomendasikan, sedangkan kadar 5–10% masih memerlukan pengujian lanjutan.

Kata Kunci: Kapur Barus, Bahan Bakar Bensin, Daya Poros Efektif, Konsumsi Bahan Bakar, Emisi Karbon Monoksida.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi untuk sektor transportasi di Indonesia terus meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah kendaraan bermotor, khususnya kendaraan roda dua berbahan bakar bensin. Peningkatan jumlah kendaraan ini berbanding lurus dengan konsumsi bahan bakar minyak (BBM) jenis premium yang bersumber dari energi fosil, sementara cadangan minyak bumi nasional semakin terbatas. Selain itu, proses pembakaran bahan bakar bensin di dalam mesin menghasilkan gas buang seperti karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC), dan karbon dioksida (CO₂) yang berkontribusi terhadap pencemaran udara. Kondisi ini mendorong berbagai upaya untuk meningkatkan efisiensi pembakaran bahan bakar bensin sekaligus menekan emisi gas buang yang dihasilkan, salah satunya melalui penambahan zat aditif ke dalam bahan bakar (Endyani & Putra, 2011; Hidayat et al., 2025; Paminto, 2020).

Kualitas pembakaran bahan bakar bensin pada mesin bakar torak sangat dipengaruhi oleh angka oktan bahan bakar tersebut. Semakin rendah angka oktan suatu bahan bakar, semakin besar kecenderungan terjadinya pembakaran tidak sempurna atau knocking, yang berdampak pada penurunan prestasi mesin sekaligus peningkatan emisi gas buang. Oleh karena itu, penambahan zat aditif ke dalam bensin banyak dipilih sebagai solusi praktis dan murah untuk memperbaiki karakteristik pembakaran tanpa harus melakukan modifikasi besar pada konstruksi mesin (Riza, 2018).

Berbagai penelitian terdahulu telah mengkaji pengaruh penambahan zat aditif pada bahan bakar bensin terhadap prestasi mesin dan emisi gas buang. Paksi et al (2021) melaporkan bahwa aditif minyak cengkeh memengaruhi prestasi mesin sepeda motor injeksi empat langkah. Penelitian serupa oleh Lazrisyah et al (2021) juga menunjukkan bahwa penambahan minyak cengkeh pada bahan bakar RON 90 dapat meningkatkan torsi dan daya sekaligus menurunkan konsumsi bahan bakar. Pada kelompok aditif berbasis alkohol, Syaka et al (2020) menguji campuran bioetanol pada mesin bensin empat langkah satu silinder. Maarif et al (2024) melaporkan perubahan performa mesin sepeda motor akibat pencampuran metanol dalam Pertalite (Lazrisyah et al., 2021; Ma'arif et al., 2024; Paksi et al., 2021; Syaka et al., 2020).

Kajian aditif peningkat oktan (*octane booster*) yang dilakukan Paoki et al (2021) menunjukkan bahwa komposisi campuran metanol-bensin memengaruhi kinerja mesin dan emisi gas buang. Sobarsah et al (2021) meninjau berbagai aditif peningkat oktan dan menegaskan bahwa efektivitasnya bergantung pada komposisi kimia aditif dan bahan bakar, Nasir et al (2023) menggunakan minyak serai wangi sebagai aditif Pertalite dan melaporkan perubahan konsumsi bahan bakar serta emisi gas buang. Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa efek aditif tidak dapat digeneralisasi hanya berdasarkan klaim peningkatan angka oktan. (Nasir et al., 2023; Paoki et al., 2021; Sobarsah et al., 2021).

Dari kajian tersebut, penambahan zat aditif baik minyak atsiri, alkohol, maupun *octane booster* dapat mengubah prestasi dan emisi mesin, tetapi arah dan besarnya pengaruh sangat bergantung pada sifat kimia dan kadar aditif. Bukti khusus mengenai penggunaan kapur barus sebagai naftalena (C₁₀H₈) pada bensin masih terbatas. Naftalena merupakan hidrokarbon aromatik polisiklik yang berbentuk padat pada kondisi ruang; karena itu, ketika digunakan sebagai aditif bensin, zat ini harus terlebih dahulu larut dan tetap homogen sebelum melewati saluran bahan bakar. Kelarutan, kestabilan fasa, waktu pelarutan, serta kemungkinan rekristalisasi menjadi isu metodologis penting yang tidak muncul pada aditif cair. Sobarsah et al. (2021) menunjukkan bahwa karakteristik pelarutan dan volatilitas aditif kamper dapat berubah menurut kadar, sedangkan Jia dan Batterman (2010) membahas sifat fisik naftalena sebagai senyawa aromatik volatil/semi

volatil. Kesenjangan inilah yang mendasari perlunya evaluasi naftalena tidak hanya sebagai dugaan peningkat oktan, tetapi juga terhadap perubahan sifat bahan bakar, prestasi mesin, emisi, dan kompatibilitas sistem bahan bakar (Jia & Batterman, 2020; Sobarsah et al., 2021).

Struktur aromatik naftalena yang kaya karbon dan tidak mengandung oksigen juga menimbulkan hipotesis risiko pembakaran tidak sempurna. Apabila pelarutan tidak homogen atau terjadi rekristalisasi setelah pencampuran, partikel atau film padat berpotensi mengganggu saluran kecil pada karburator/injektor dan menjadi prekursor pembentukan deposit karbon di sistem pemasukan maupun ruang bakar. Penelitian ini tidak mengukur deposit secara langsung; karena itu, risiko tersebut diposisikan sebagai aspek keselamatan dan durabilitas yang perlu diuji lebih lanjut, bukan sebagai hasil yang telah terbukti. Perubahan karakteristik campuran selanjutnya dianalisis melalui nilai kalor, massa jenis, daya poros efektif, pemakaian bahan bakar, BSFC, efisiensi termal, temperatur gas buang, dan emisi CO.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penambahan kapur barus dengan kadar 0%, 5%, 10%, 20%, dan 30% pada sampel bensin yang dalam arsip eksperimen disebut “Premium” terhadap daya poros efektif, pemakaian bahan bakar, BSFC, efisiensi termal, dan emisi CO pada mesin bensin satu silinder empat langkah. Istilah “Premium” dipertahankan semata-mata sebagai identitas sampel pada data eksperimen; angka oktan (RON) dan komposisi rinci sampel tidak terdokumentasi dalam naskah sumber. Oleh karena itu, hasil penelitian ini tidak digeneralisasi secara langsung ke Pertalite, Pertamax, atau bensin lain dengan RON dan formulasi berbeda. Pengujian lanjutan perlu melaporkan spesifikasi dan RON aktual bahan bakar yang digunakan

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Tahapan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen yang dilaksanakan melalui beberapa tahapan. Tahap pertama adalah studi literatur untuk mengkaji penelitian-penelitian terdahulu mengenai pengaruh zat aditif pada bahan bakar bensin terhadap prestasi mesin dan emisi gas buang. Tahap kedua adalah persiapan bahan dan alat penelitian, meliputi penyiapan bahan bakar bensin (Premium) dan kapur barus, serta unit mesin uji Enduro XL beserta instrumen ukur yang dibutuhkan. Tahap ketiga adalah pembuatan sampel campuran bahan bakar dengan variasi kadar kapur barus 0% (Premium murni), 5%, 10%, 20%, dan 30% terhadap volume bensin. Tahap keempat adalah pengujian sifat fisik dan kimia bahan bakar, yaitu pengukuran nilai kalor dan massa jenis setiap sampel campuran menggunakan bomb calorimeter dan neraca analitik di Laboratorium Kimia Universitas Hasanuddin. Tahap kelima adalah pengujian prestasi mesin dan emisi gas buang pada mesin uji Enduro XL untuk setiap sampel bahan bakar, pada variasi putaran mesin 1200, 1400, 1600, 1800, dan 2000 rpm. Data yang dicatat pada setiap pengujian meliputi torsi, waktu pemakaian bahan bakar, temperatur udara, tekanan udara ruang, kadar emisi CO gas buang, dan temperatur gas buang (exhaust). Tahap keenam adalah pengolahan data menggunakan persamaan-persamaan prestasi mesin untuk memperoleh nilai daya poros efektif, pemakaian bahan bakar, pemakaian bahan bakar spesifik, laju aliran udara, perbandingan udara-bahan bakar (AFR), efisiensi volumetrik, dan efisiensi termal. Tahap terakhir adalah analisis dan pembahasan hasil, dilanjutkan dengan penarikan kesimpulan.

2.2 Bahan dan Alat Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah bahan bakar bensin jenis premium dan kapur barus (naftalena) yang dicampurkan dengan kadar 0%, 5%, 10%, 20%, dan 30% terhadap volume bensin. Alat utama yang digunakan adalah unit mesin uji Enduro XL satu silinder empat langkah dengan jumlah siklus 0,5, perbandingan kompresi 9:1, daya maksimum 5,0 HP pada putaran maksimum 3750 rpm, diameter silinder 70,99 mm, langkah torak 49,23 mm, dan volume langkah sebesar $1,95 \times 10^{-5} \text{ m}^3$. Instrumen ukur yang digunakan meliputi tachometer untuk mengukur putaran mesin, alat ukur torsi, stopwatch dan gelas ukur berorifice untuk mengukur waktu pemakaian bahan bakar, termometer untuk mengukur temperatur udara dan gas buang, manometer pipa miring untuk mengukur beda tekanan pada orifice saluran udara masuk, barometer untuk mengukur tekanan udara ruang, serta gas analyzer untuk mengukur kadar emisi CO pada gas buang. Pengujian nilai kalor dan massa jenis bahan bakar dilakukan menggunakan bomb calorimeter dan neraca analitik di Laboratorium Kimia Universitas Hasanuddin.

Perhitungan prestasi mesin dilakukan menggunakan persamaan dasar motor bakar torak. Daya poros efektif (N_e) dihitung dari torsi T ($\text{N}\cdot\text{m}$) dan putaran mesin n (rpm) dengan N_e dinyatakan dalam kW:

$$N_e = \frac{2\pi nT}{60} \quad (1)$$

Pemakaian bahan bakar (F_c) dihitung dari massa jenis bahan bakar ρ_{bb} (kg/m^3), volume bahan bakar V_{bb} (m^3), dan waktu pemakaian t (s), sehingga F_c dinyatakan dalam kg/jam:

$$F_c = \frac{3600\rho_{bb}V_{bb}}{t} \quad (2)$$

Efisiensi termal (η_{th}) dihitung dengan N_e dalam kW, F_c dalam kg/jam, dan lower heating value (LHV) dalam kJ/kg:

$$\eta_{th} = \frac{3600N_e}{F_c LHV} \times 100\% \quad (3)$$

Nilai kalor pada Tabel 1 dilaporkan dalam kkal/kg. Untuk perhitungan η_{th} , nilai tersebut dikonversi menjadi kJ/kg menggunakan faktor $1 \text{ kkal} = 4,1868 \text{ kJ}$. Verifikasi ulang terhadap data daya, pemakaian bahan bakar, dan kurva efisiensi menunjukkan bahwa faktor konversi ini memang telah digunakan; karena itu nilai maksimum η_{th} sebesar 85,958% bukan disebabkan oleh pemakaian nilai kkal/kg secara langsung. Meskipun demikian, nilai tersebut sangat tinggi untuk mesin bensin satu silinder konvensional dan harus diperlakukan sebagai hasil perhitungan eksperimen yang masih memerlukan validasi instrumen, pengulangan, dan analisis ketidakpastian. Perbandingan udara-bahan bakar (AFR) dan efisiensi volumetrik dihitung sesuai definisi laju aliran massa udara aktual dan teoritis yang digunakan pada data eksperimen

2.3 Standar Acuan, Replikasi, dan Ketidakpastian Pengukuran

Dokumentasi eksperimen asli tidak mencatat bahwa pengujian dilakukan sebagai pengujian tersertifikasi menurut standar tertentu. Untuk meningkatkan keterulangan pada replikasi, pengukuran daya/net power dapat merujuk SAE J1349, sedangkan pengukuran emisi gas buang pada test bed dan pemilihan siklus uji dapat merujuk ISO 8178-1:2020 dan ISO 8178-4:2020. Standar tersebut dicantumkan sebagai acuan metodologis untuk penelitian lanjutan, bukan sebagai klaim bahwa seluruh data pada penelitian ini telah memenuhi persyaratan standar (International Organization for Standardization, 2020).

Arsip data yang tersedia tidak memuat merek/model dan nomor seri seluruh instrumen, sertifikat kalibrasi, kelas akurasi atau resolusi alat, maupun jumlah pengulangan aktual pada setiap titik pengujian. Karena informasi tersebut tidak tersedia, ketidakpastian gabungan, simpangan baku, dan interval kepercayaan tidak dapat dihitung secara sah tanpa mengarang data. Naskah ini karena itu menyajikan nilai yang tersedia sebagai hasil pengamatan eksperimen dan menempatkan keterbatasan tersebut secara eksplisit. Pada pengujian lanjutan, setiap kondisi sebaiknya diulang sekurang-kurangnya tiga kali, disertai pelaporan rata-rata $\pm$ simpangan baku, akurasi/ketidakpastian setiap alat, status kalibrasi, serta propagasi ketidakpastian untuk N_e , F_c , BSFC, dan η_{th} .

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil pengujian karakteristik bahan bakar campuran Premium-kapur barus, contoh perhitungan prestasi mesin, serta analisis pengaruh kadar kapur barus terhadap daya poros efektif, pemakaian bahan bakar, efisiensi termal, dan emisi gas buang CO pada berbagai putaran mesin (1200-2000 rpm).

3.1 Karakteristik Bahan Bakar Campuran Premium-Kapur Barus

Pengujian nilai kalor dan massa jenis dilakukan di Laboratorium Kimia Universitas Hasanuddin menggunakan bomb calorimeter dan neraca analitik terhadap lima sampel bahan bakar, yaitu Premium murni (100%) dan campuran Premium dengan kapur barus pada kadar 5%, 10%, 20%, dan 30%. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengujian laboratorium nilai kalor dan massa jenis bahan bakar

No.	Kode Sampel	Nilai Kalor (kkal/kg)	Massa Jenis (kg/m ³)
1	Premium murni 100%	12.347	750
2	Premium 95% + kapur barus 5%	11.799	750
3	Premium 90% + kapur barus 10%	10.602	760
4	Premium 80% + kapur barus 20%	10.199	770
5	Premium 70% + kapur barus 30%	6.306	780

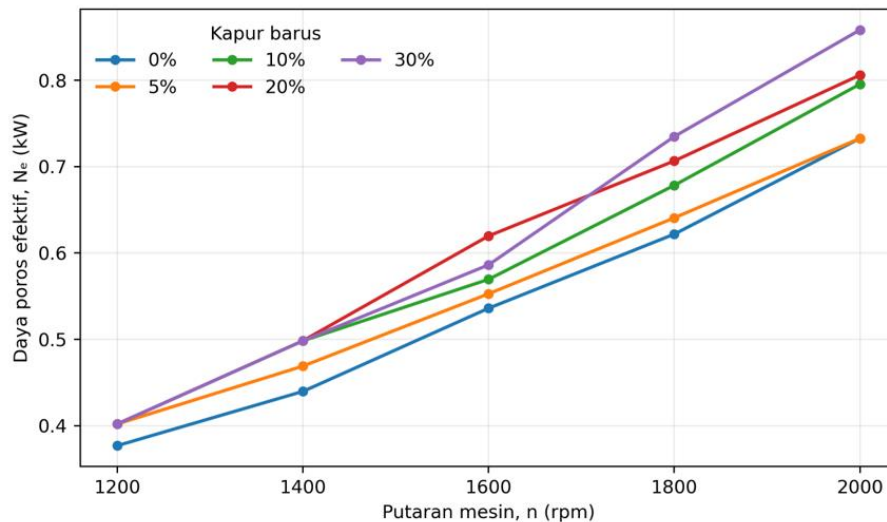
Tabel 1 menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar kapur barus yang dicampurkan, nilai kalor bahan bakar menurun dari 12.347 kkal/kg pada Premium murni menjadi 6.306 kkal/kg pada campuran 30%, sedangkan massa jenis meningkat dari 750 menjadi 780 kg/m³. Nilai kalor menunjukkan energi yang dilepaskan per satuan massa dan tidak secara langsung menyatakan bahwa bahan bakar lebih mudah terbakar atau menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna. Oleh karena itu, perubahan prestasi dan emisi harus dianalisis bersama perubahan massa jenis, volatilitas/kelarutan, AFR, dan kondisi operasi mesin.

3.2 Pengaruh Kadar Kapur Barus terhadap Daya Poros Efektif

Tabel 2. Rentang daya poros efektif, pemakaian bahan bakar, dan efisiensi termal pada putaran 1200-2000 rpm

Kadar Kapur Barus	Daya Poros Efektif (kW)	Pemakaian Bahan Bakar (kg/jam)	Efisiensi Thermal (%)
0% (premium murni)	0,377 - 0,733	0,136 - 0,169	19,316 - 30,236
5%	0,402 - 0,733	0,111 - 0,171	26,442 - 31,146
10%	0,402 - 0,795	0,103 - 0,149	31,572 - 43,328
20%	0,402 - 0,806	0,099 - 0,143	34,380 - 47,491
30%	0,402 - 0,858	0,099 - 0,136	55,379 - 85,958

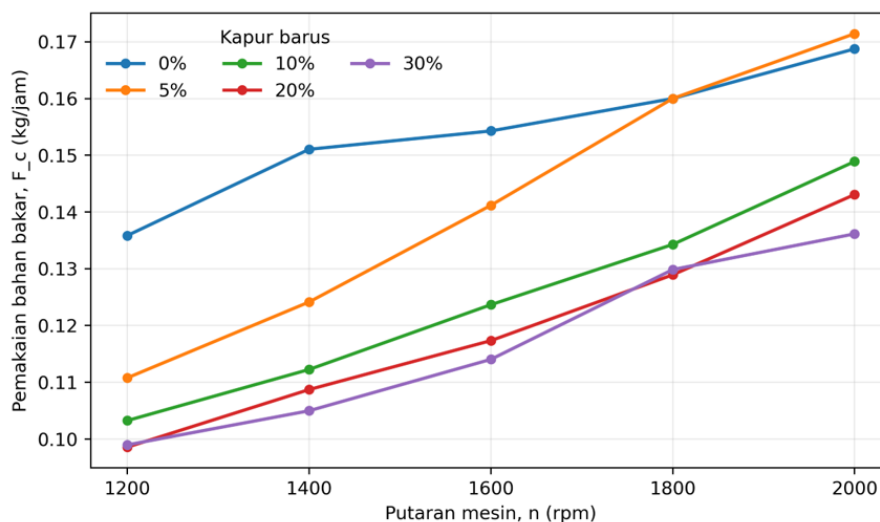
Hubungan antara putaran mesin dan daya poros efektif menunjukkan kenaikan daya seiring meningkatnya putaran mesin. Berdasarkan Tabel 2, Premium murni menghasilkan daya 0,377–0,733 kW, sedangkan campuran kapur barus 30% menghasilkan 0,402–0,858 kW. Karena nilai kalor campuran justru menurun pada kadar kapur barus yang lebih tinggi, kenaikan daya tidak dapat dijelaskan hanya dengan kandungan energi bahan bakar atau dugaan peningkatan angka oktan. Hasil ini lebih tepat diperlakukan sebagai respons empiris sistem uji yang juga dapat dipengaruhi oleh perubahan massa jenis, jumlah bahan bakar aktual yang terukur, AFR, karakteristik pelarutan, dan ketidakpastian pengukuran.



Gambar 1. Hubungan putaran mesin terhadap daya poros efektif pada variasi kadar kapur barus 0–30%.

3.3 Pengaruh Kadar Kapur Barus terhadap Pemakaian Bahan Bakar

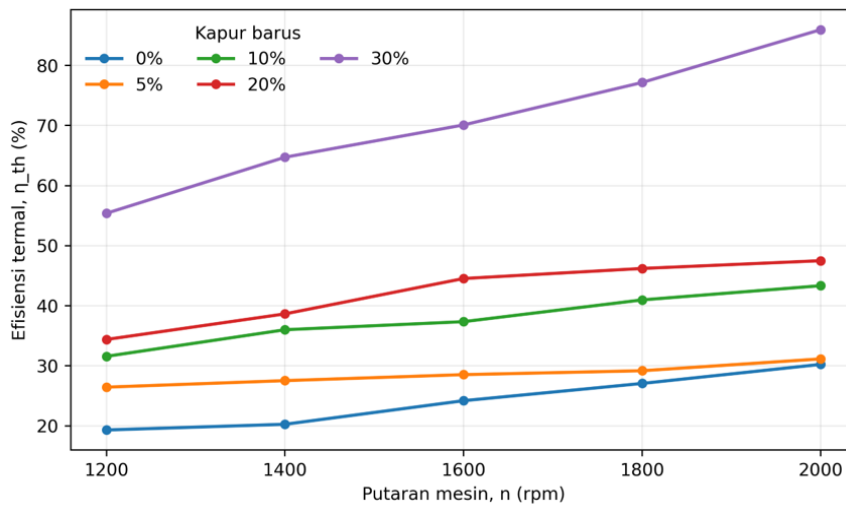
Data pemakaian bahan bakar absolut menunjukkan bahwa F_c meningkat dengan putaran mesin pada setiap campuran, tetapi pada kadar kapur barus yang lebih tinggi nilainya cenderung lebih rendah. Premium murni berada pada 0,136–0,169 kg/jam, sedangkan campuran 30% berada pada 0,099–0,136 kg/jam. Nilai kg/jam tidak cukup untuk menyimpulkan penghematan karena daya yang dihasilkan juga berubah. Oleh sebab itu, efisiensi penggunaan bahan bakar dibandingkan kembali menggunakan BSFC pada Bagian 3.5.



Gambar 2. Hubungan putaran mesin terhadap pemakaian bahan bakar (F_c) pada variasi kadar kapur barus 0–30%.

3.4 Pengaruh Kadar Kapur Barus terhadap Efisiensi Thermal

Efisiensi termal hasil perhitungan meningkat dengan putaran mesin pada setiap campuran. Berdasarkan data kurva, Premium murni berada pada 19,316–30,236%, campuran 5% pada 26,442–31,146%, campuran 10% pada 31,572–43,328%, campuran 20% pada 34,380–47,491%, dan campuran 30% pada 55,379–85,958%. Verifikasi satuan menunjukkan bahwa LHV telah dikonversi dari kkal/kg ke kJ/kg dengan faktor 4,1868; jadi nilai 85,958% bukan akibat hilangnya konversi tersebut. Nilai yang sangat tinggi terutama muncul dari kombinasi N_e yang meningkat, F_c yang rendah, dan LHV campuran 30% yang sangat rendah. Karena akurasi instrumen, kalibrasi, dan pengulangan tidak tersedia pada arsip eksperimen, nilai ini belum dapat diperlakukan sebagai efisiensi termal tervalidasi dan memerlukan pengujian ulang.



Gambar 3. Hubungan putaran mesin terhadap efisiensi termal (η_{th}) pada variasi kadar kapur barus 0–30%.

3.5 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (BSFC)

Untuk membandingkan konsumsi bahan bakar terhadap daya yang dihasilkan, brake specific fuel consumption (BSFC) dihitung dari F_c dalam kg/jam dan N_e dalam kW. Faktor 1000 mengubah kg menjadi gram sehingga BSFC dinyatakan dalam g/kWh:

$$BSFC = \frac{1000F_c}{N_e} \quad (4)$$

Tabel 3. BSFC (g/kWh) berdasarkan data daya poros efektif dan pemakaian bahan bakar.

Putaran (rpm)	0%	5%	10%	20%	30%
1200	360,5	275,6	256,9	245,2	246,2
1400	343,6	264,7	225,3	218,2	210,7
1600	287,9	255,5	217,2	189,4	194,5
1800	257,4	249,8	198,0	182,5	176,7
2000	230,3	234,0	187,2	177,5	158,6

BSFC menurun dengan kenaikan putaran pada seluruh campuran. Pada 1.200 rpm, BSFC turun dari 360,5 g/kWh pada Premium murni menjadi 246,2 g/kWh pada campuran 30%; pada 2.000 rpm nilainya turun dari 230,3 menjadi 158,6 g/kWh. Secara matematis hal ini menunjukkan massa bahan bakar per unit daya yang lebih kecil pada data campuran berkadar tinggi. Namun, BSFC tidak memasukkan perbedaan LHV dan tidak menghilangkan ketidakpastian pada pengukuran daya maupun laju bahan bakar; karena itu, tren tersebut perlu dibaca bersama efisiensi termal dan keterbatasan pengukuran yang telah dijelaskan.

3.6 Pengaruh Penambahan Kapur Barus terhadap Emisi Gas Buang Karbon Monoksida (CO)

Selain memengaruhi prestasi mesin, penambahan kapur barus pada bahan bakar Premium juga memengaruhi kandungan emisi karbon monoksida (CO) pada gas buang. Data hasil pengujian kadar emisi CO pada berbagai putaran mesin dan kadar campuran bahan bakar disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Kadar emisi CO (%) gas buang pada berbagai putaran mesin dan kadar kapur barus

Putaran (rpm)	Premium Murni 100%	Premium Murni 95% + Kabur Barus 5%	premium 90% + kapur barus 10%	Premium 80% + Kabur Barus 20%	Premium 70% + Kabur Barus 30%
1200	0,7	3,4	5,8	6,2	8,7
1400	0,7	2,3	4,9	4,9	4,7
1600	0,7	1,8	3,1	4,9	3,2
1800	0,5	0,9	1,3	2,1	3,2
2000	0,4	0,7	0,9	1,7	2,8

Tabel 5. Temperatur gas buang (exhaust, °C) pada berbagai putaran mesin dan kadar kapur barus

Putaran (rpm)	Premium Murni 100%	Premium Murni 95% + Kabur Barus 5%	premium 90% + kapur barus 10%	Premium 80% + Kabur Barus 20%	Premium 70% + Kabur Barus 30%
1200	380	380	380	350	380
1400	420	440	450	400	400
1600	480	470	500	440	530
1800	500	510	540	520	560
2000	530	520	570	570	590

Tabel 4 menunjukkan bahwa kadar CO cenderung menurun ketika putaran mesin meningkat, tetapi meningkat ketika kadar kapur barus dinaikkan. Pada 1.200 rpm, CO bertambah dari 0,7% pada Premium murni menjadi 3,4% pada campuran 5%, 5,8% pada 10%, 6,2% pada 20%, dan 8,7% pada 30%. Pola ini menunjukkan pembakaran yang semakin tidak sempurna pada kadar naftalena tinggi, yang dapat berkaitan dengan campuran lokal yang terlalu kaya, keterbatasan oksigen, perubahan volatilitas, atau pembentukan campuran yang kurang homogen.

Sejalan dengan data emisi CO, Tabel 5 menunjukkan bahwa temperatur gas buang secara umum meningkat seiring bertambahnya putaran mesin. Pada putaran yang sama, beberapa campuran kapur barus menghasilkan temperatur gas buang lebih tinggi daripada Premium murni. Temperatur gas buang yang tinggi tidak dengan sendirinya membuktikan efisiensi termal lebih tinggi karena sebagian energi dapat meninggalkan silinder bersama gas buang; karena itu, data temperatur perlu dibaca bersama daya, BSFC, η_{th} , dan CO.

3.7 Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan kapur barus atau naftalena ke dalam Premium mengubah karakteristik fisik dan energi bahan bakar. Berdasarkan Tabel 1, nilai kalor turun dari 12.347 kkal/kg pada Premium murni menjadi 6.306 kkal/kg pada campuran 30%, sedangkan massa jenis meningkat dari 750 menjadi 780 kg/m³. Temuan ini menegaskan bahwa semakin besar fraksi kapur barus, semakin besar pula perubahan komposisi bahan bakar. Akan tetapi, penurunan nilai kalor tidak dapat secara langsung ditafsirkan bahwa bahan bakar menjadi lebih mudah terbakar atau menghasilkan

pembakaran yang lebih sempurna. Nilai kalor hanya menunjukkan energi yang dilepaskan per satuan massa bahan bakar, sedangkan kualitas pembakaran juga dipengaruhi oleh volatilitas, tekanan uap, angka oktan, rasio udara-bahan bakar, kecepatan rambat nyala, temperatur ruang bakar, dan homogenitas campuran.

Sobarsah et al. (2021) memberikan perbandingan yang relevan karena membahas kamper sebagai aditif peningkat oktan pada Pertalite. Hasil kajian tersebut menunjukkan bahwa perubahan karakteristik bahan bakar tidak hanya ditentukan oleh angka oktan, tetapi juga oleh volatilitas dan proses pelarutan. Karena itu, peningkatan daya pada penelitian ini sebaiknya tidak dikaitkan secara tunggal dengan dugaan kenaikan angka oktan, melainkan dianalisis bersama massa jenis, jumlah bahan bakar aktual, AFR, temperatur gas buang, dan kemungkinan ketidakseragaman pelarutan (Sobarsah et al., 2021).

Daya poros efektif meningkat seiring kenaikan putaran mesin dan pada campuran 30% mencapai nilai tertinggi 0,858 kW, dibandingkan 0,733 kW pada Premium murni. Secara teoritis, peningkatan daya dapat terjadi apabila torsi meningkat, pembakaran berlangsung pada fase yang lebih menguntungkan, atau massa bahan bakar yang terbakar per siklus bertambah. Namun, karena nilai kalor campuran justru menurun tajam, peningkatan daya tidak cukup dijelaskan oleh kandungan energi bahan bakar. Kemungkinan lain adalah peningkatan densitas menyebabkan massa bahan bakar yang terukur pada volume yang sama menjadi berbeda, sementara sistem pemasukan bahan bakar dan udara belum dikoreksi untuk mempertahankan campuran stoikiometrik. Oleh sebab itu, pembahasan daya perlu diletakkan sebagai hasil empiris pada kondisi alat uji, bukan sebagai bukti bahwa campuran berkadar tinggi selalu meningkatkan performa mesin (Wirawan, 2025).

Pengaruh aditif pada mesin bensin sangat bergantung pada sifat kimianya. Srinivas Rao et al (2022) menunjukkan bahwa beberapa aditif menghasilkan respons performa dan emisi yang berbeda pada mesin *spark ignition*, sedangkan Shanmugasundaram et al. (2016) melaporkan perubahan performa dan emisi pada campuran camphor–ethanol–petrol. Perbandingan ini memperkuat bahwa hasil satu jenis aditif tidak dapat digeneralisasi kepada seluruh octane booster atau senyawa aromatik. (Shanmugasundaram et al., 2016; Srinivas Rao et al., 2022).

Analisis BSFC pada Tabel 3 memperlihatkan kecenderungan konsumsi massa bahan bakar per unit daya yang lebih rendah pada campuran kapur barus, khususnya pada kadar 20–30%. Walaupun demikian, BSFC tetap merupakan rasio dua besaran terukur sehingga sangat sensitif terhadap galat N_e dan F_c . Selain itu, BSFC tidak memperhitungkan perbedaan kandungan energi per kilogram; campuran 30% justru memiliki LHV jauh lebih rendah daripada Premium murni. Oleh sebab itu, penurunan BSFC dalam data ini merupakan temuan empiris yang masih harus diverifikasi melalui pengulangan dan analisis ketidakpastian, bukan bukti tunggal bahwa campuran tersebut lebih ekonomis atau lebih efisien secara energi.

Efisiensi termal maksimum yang dilaporkan sebesar 85,958% pada campuran kapur barus 30% telah diperiksa kembali terhadap satuan. Data kurva menunjukkan bahwa perhitungan menggunakan konversi 1 kkal = 4,1868 kJ, sehingga anomali nilai tinggi tidak berasal dari penggunaan angka kkal/kg secara langsung. Nilai tersebut muncul dari kombinasi daya yang relatif tinggi, pemakaian bahan bakar yang rendah, dan LHV campuran 30% yang sangat rendah. Karena arsip eksperimen tidak memuat akurasi instrumen, status kalibrasi, dan jumlah pengulangan, nilai η_{th} tersebut sebaiknya diperlakukan sebagai hasil hitung yang belum tervalidasi. Pengujian ulang dengan pengulangan, rata-rata, simpangan baku, dan propagasi ketidakpastian diperlukan sebelum menarik klaim efisiensi aktual (Fitriyanto & Mustofa, 2026).

Pada aspek emisi, pola data lebih konsisten: CO menurun ketika putaran mesin meningkat, tetapi naik tajam ketika kadar kapur barus dinaikkan. Naftalena ($C_{10}H_8$) memiliki rasio atom C/H = $10/8 = 1,25$, lebih tinggi daripada hidrokarbon alifatik jenuh yang umum digunakan sebagai model komponen bensin. Rasio C/H yang tinggi tidak dengan sendirinya membuktikan campuran menjadi kaya, tetapi menunjukkan fraksi karbon yang lebih besar relatif terhadap hidrogen. Dalam kondisi sistem udara-bahan bakar yang tidak dikoreksi untuk perubahan densitas dan volatilitas, serta bila pelarutan tidak homogen, kondisi ini dapat memperbesar zona kaya lokal dan menyulitkan oksidasi lengkap karbon menjadi CO_2 . Hal tersebut konsisten dengan kenaikan CO dari 0,7% menjadi 8,7% pada 1.200 rpm. Pembentukan CO juga dapat dipengaruhi atomisasi, penguapan, waktu reaksi, dan ketersediaan oksigen (Jia & Batterman, 2020).

Hasil emisi ini berbeda dengan beberapa aditif beroksigen. Sanjaya et al. (2022) menguji campuran Peralite *butanol* dan Peralite *diethyl ether* (DEE), sedangkan Nugraheni dan Haryadi (2017) menguji campuran Premium–etanol pada mesin bensin empat langkah satu silinder. Senyawa beroksigen membawa atom oksigen di dalam molekulnya, sedangkan naftalena tidak mengandung oksigen. Perbedaan struktur kimia tersebut membantu menjelaskan mengapa respons emisi aditif beroksigen tidak dapat langsung disamakan dengan campuran naftalena (Nugraheni & Haryadi, 2017; Sanjaya et al., 2022).

Temperatur gas buang meningkat dengan putaran mesin dan pada beberapa kondisi lebih tinggi pada campuran kapur barus. Temperatur gas buang yang lebih tinggi dapat menunjukkan pelepasan panas yang lebih besar di akhir proses pembakaran atau pembakaran yang berlanjut menuju langkah buang. Namun, temperatur gas buang yang tinggi tidak selalu berarti efisiensi termal lebih tinggi, karena energi yang terbawa keluar bersama gas buang justru merupakan kehilangan panas. Oleh karena itu, hubungan antara temperatur gas buang, daya, efisiensi termal, dan CO perlu dianalisis secara bersamaan. Pada campuran dengan CO tinggi dan temperatur gas buang tinggi, terdapat kemungkinan sebagian pembakaran berlangsung terlambat atau belum selesai ketika katup buang mulai membuka (Budiyanto et al., 2023).

Secara keseluruhan terdapat trade-off antara kenaikan daya terukur dan memburuknya emisi CO. Campuran 20–30% memberikan daya tertinggi dan BSFC terendah pada data yang tersedia, tetapi juga menghasilkan CO paling tinggi dan nilai efisiensi termal yang memerlukan validasi. Dari perspektif teknis dan lingkungan, kadar tinggi belum dapat direkomendasikan. Campuran 5–10% lebih rasional untuk diteliti lebih lanjut karena perubahan karakteristik bahan bakarnya lebih terbatas, tetapi emisi CO tetap lebih tinggi daripada Premium murni. Penetapan kadar optimum memerlukan analisis multirespons yang mencakup daya, torsi, BSFC, η_{th} tervalidasi, AFR, CO, HC, CO_2 , NO_x , temperatur gas buang, kestabilan pelarutan, deposit karbon, durabilitas komponen, dan aspek ekonomi (Budiyanto et al., 2023).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian, penambahan kapur barus/naftalena pada sampel bensin Premium memengaruhi karakteristik bahan bakar, prestasi mesin, dan emisi gas buang. Ketika kadar kapur barus meningkat dari 0% menjadi 30%, nilai kalor turun dari 12.347 menjadi 6.306 kkal/kg dan massa jenis naik dari 750 menjadi 780 kg/m³. Daya poros efektif maksimum meningkat dari 0,733 menjadi 0,858 kW, sedangkan BSFC hasil perhitungan pada 2.000 rpm turun dari 230,3 menjadi 158,6 g/kWh. Namun, efisiensi termal hingga 85,958% tetap memerlukan validasi; pemeriksaan satuan menunjukkan konversi kkal/kg ke kJ/kg telah diterapkan, sehingga sumber ketidakpastian lebih

mungkin terkait data daya, laju bahan bakar, LHV, dan keterbatasan instrumen/pengulangan yang tidak terdokumentasi. Dari aspek emisi, CO meningkat nyata; pada 1.200 rpm nilainya naik dari 0,7% menjadi 8,7% pada campuran 30%. Rasio C/H naftalena yang tinggi, ketiadaan oksigen dalam molekul, serta potensi ketidakseragaman pelarutan dapat berkontribusi pada pembakaran tidak sempurna. Campuran 20–30% belum direkomendasikan untuk penggunaan praktis, sedangkan kadar 5–10% hanya layak untuk penelitian lanjutan dengan pengujian RON, AFR, BSFC, emisi lengkap, pengulangan, analisis ketidakpastian, kestabilan pelarutan, dan evaluasi deposit/durabilitas.

REFERENCES

- Budiyanto, L., Haryadi, S., Teknika, P., Kemaritiman, F., Maritim, U., & Semarang, A. (2023). Pengaruh Variabel Putaran (RPM) terhadap Temperatur Gas Buang Mesin Penggerak Utama Type MAN B & W 31990 KW pada Kapal Kontainer. *Saintara : Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Maritim*, 7(2), 38–42.
- Endyani, I. D., & Putra, T. D. (2011). PENGARUH PENAMBAHAN ZAT ADITIF PADA BAHAN BAKAR TERHADAP EMISI GAS BUANG MESIN SEPEDA MOTOR. *Proton*, 3(1), 29–34.
- Fitriyanto, T., & Mustofa, D. (2026). Analisa Efisiensi Termal dan Konsumsi Energi Motor Bensin Spark-Ignition pada Penggunaan Campuran Eksperimental pada Mesin Satu Silinder. *Jurnal Mema (Jurnal Mesin Dan Manufaktur*, 3(1), 1–9.
- Hidayat, R., Suyuti, Jamaluddin, & Raising, R. (2025). *BAHAN BAKAR KAPAL LAUT: SISTEM, SPESIFIKASI, DAN DAMPAK LINGKUNGAN*.
- International Organization for Standardization. (2020). ISO 8178-4:2020: Reciprocating internal combustion engines—Exhaust emission measurement—Part 4: Steady-state and transient test cycles for different engine applications. In *ISO Standards Catalogue* (pp. p45–p48). <https://www.iso.org/standard/79330.html><https://www.iso.org/standard/64710.html>
- Jia, C., & Batterman, S. (2020). A Critical Review of Naphthalene Sources and Exposures Relevant to Indoor and Outdoor Air. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(2903), 2903–2939. <https://doi.org/10.3390/ijerph1702903>
- Lazrisyah, S., Rahman, J., Elfiaano, E., Kurniadi, S., & Ashari, I. (2021). Pengaruh Penambahan Minyak Cengkeh pada Bahan Bakar RON 90 Terhadap Unjuk Kerja Motor Bakar Bensin. *JURNAL KAJIAN TEKNIK MESIN*, 7(2), 48–53.
- Ma'arif, S., Hedi, & Widarti, S. (2024). Pengaruh Pencampuran Metanol dalam Bahan Bakar Pertalite Terhadap Performa Mesin Sepeda Motor. *SURYA TEKNIKA*, 11(1), 343–348.
- Nasir, M., Syaifullah, L., Hidayat, N., & Balisranislam. (2023). Pengaruh Pencampuran Bahan Bakar Pertalite Dengan Zat Aditif Minyak Serai Wangi Terhadap Konsumsi Bahan Bakar dan Emisi Gas Buang The Effect of Mixing Pertalite Fuel Oil With Citronella Oil Additives on Fuel Consumption and Exhaust Emissions. *JTPVI: Jurnal Teknologi Dan Pendidikan Vokasi Indonesia*, 3, 7–14.
- Nugraheni, I. K., & Haryadi, R. (2017). PENGUJIAN EMISI GAS BUANG MOTOR BENSIN EMPAT TAK SATU SILINDER MENGGUNAKAN CAMPURAN BAHAN BAKAR PREMIUM DENGAN ETANOL. *Jurnal Elemen*, 4(1), 22–28.
- Paksi, P. S. E., Sudia, B., & Kadir, A. . (2021). Pengaruh Penggunaan Zat Aditif Minyak Cengkeh Terhadap Prestasi Mesin Sepeda Motor Injeksi 4 Langkah. *Enthalpy : Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik Mesin*, 6(4), 151. <https://doi.org/10.55679/enthalpy.v6i4.22570>
- Paminto, A. K. (2020). ANALISIS DAN PROYEKSI KEBUTUHAN ENERGI SEKTOR TRANSPORTASI DI INDONESIA. *Results in Engineering*, 1(1), 51–54.

- Paoki, K. B. C., Ghurri, A., & Nindhia, T. G. T. (2021). Pengaruh Komposisi Bahan Bakar Campuran Metanol Bensin Terhadap Kinerja Mesin Dan Emisi Gas Buang Pada Motor Yamaha Nmax. *Jurnal Ilmiah TEKNIK DESAIN MEKANIKA*, 10(4).
- Riza, A. (2018). PENGARUH PENINGKATAN TEKANAN TERHADAP UNJUK KERJA ENGINE SATU SILINDER. *Poros*, 16(1), 48–53.
- Sanjaya, F. L., Fatkhurrozak, F., & Ariyanto, N. A. (2022). Uji Eksperimental Emisi Gas Buang Mesin Bensin 160 cc Berbahan Bakar Campuran Pertalite- Butanol dan Pertalite- Diethyl Ether (DEE). *Infotekmesin*, 13(02), 295–300. <https://doi.org/10.35970/infotekmesin.v13i2.1543>
- Shanmugasundaram, S., Maruthur, P., Kumaresan, M., Abhilash, O. P., K, A. Das, & Kumaresan, M. (2016). Experimental study on the effects of camphor ethanol petrol blends in a spark ignition engine : performance and emissions analysis. *International Journal of Energy Engineering*, 6(1), 19–28. <https://doi.org/10.5963/IJEE0601003>
- Sobarsah, G. A., Nuryoto, N., & Jayanudin, J. (2021). Article review : Comparison of octane booster additive for gasoline. *TEKNIKA: JURNAL SAINS DAN TEKNOLOGI*, 17(02), 150–157.
- Srinivas Rao, T., Jakeer Hussain, S., Dhana Raju, V., Venu, H., & Subramani, L. (2022). Experimental assessment of various fuel additives on the performance and emission characteristics of the spark ignition engine. *International Journal of Ambient Energy*, 43(1), 1333–1338. <https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1694987>
- Syaka, D. R. B., Sugita, I. W., & Mahendra, C. R. (2020). PENGARUH PENCAMPURAN BIOETHANOL SEBAGAI BAHAN BAKAR PADA MOTOR BENSIN EMPAT LANGKAH SATU SILINDER. *Prosiding Seminar Nasional NCIET*, 1, 251–259.
- Wirawan, T. S. (2025). ANALISIS PENGARUH PENGGUNAAN BAHAN BAKAR ALKOHOL TERHADAP PELEPASAN PANAS DAN KINERJA MESIN PEMBAKARAN. *Machine; Jurnal Teknik Mesin*, 11(1), 36–42.