

Pengaruh Penggunaan Bahan Bakar Terhadap Emisi Gas Buang dan Tingkat Efisiensi Pada Mesin Diesel Kapal

Eka Cahya Muliawati[1], Rohmat Ranu Aji[2*], Binsar Adam Putra Butar Butar[3], Mukhamad Ali Kumbang[4]

[1]Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, Surabaya, Indonesia.

[2,3,4]Program Studi Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, Surabaya, Indonesia.

Email: ekacahya@itats.ac.id[1], ranuaji22@gmail.com[2], binsar.adam123@gmail.com[3], mukhamadalikumbang@gmail.com[4]

Abstrak

Kajian literatur terstruktur ini bertujuan menganalisis secara komparatif pengaruh penggunaan bahan bakar alternatif dan strategi pengendalian emisi terhadap kinerja serta karakteristik emisi mesin diesel kapal, dengan fokus pada hubungan antara karakteristik bahan bakar, parameter pembakaran, efisiensi, dan komponen emisi gas buang. Metode yang digunakan adalah kajian literatur terstruktur (*structured literature review*) terhadap 19 artikel ilmiah nasional dan internasional yang dipilih berdasarkan relevansi terhadap mesin diesel maritim, ketersediaan informasi performa dan/atau emisi, serta keterkaitan dengan bahan bakar alternatif atau teknologi pengendalian emisi. Literatur dibandingkan berdasarkan parameter kinerja berupa *specific fuel oil consumption* (SFOC), efisiensi termal, tekanan silinder, dan *heat release rate* (HRR), serta parameter emisi berupa CO, NOx, SOx, CO_2, *particulate matter* (PM), dan *black carbon*. Hasil sintesis menunjukkan bahwa bahan bakar beroksigen seperti biodiesel cenderung menurunkan CO dan PM, tetapi pada kondisi operasi tertentu dapat meningkatkan NOx. LNG menunjukkan potensi penurunan CO_2 dan SOx yang besar, sedangkan kombinasi *Exhaust Gas Recirculation* (EGR) dan *Water-in-Fuel Emulsion* (WFE) efektif menekan NOx dengan pengaruh yang relatif lebih terkendali terhadap efisiensi. Amonia memiliki prospek dekarbonisasi, tetapi masih menghadapi persoalan *ammonia slip* dan pembentukan N_2O. Dengan demikian, tidak terdapat satu pilihan bahan bakar atau strategi yang unggul pada seluruh parameter; pemilihannya perlu mempertimbangkan karakteristik bahan bakar, kondisi operasi mesin, strategi pembakaran, target emisi, serta teknologi pengendalian yang digunakan.

Kata Kunci: Biodiesel; Emisi Gas Buang; Efisiensi Pembakaran; Bahan Bakar Alternatif; Maritim.

ABSTRACT

This structured literature review aims to analyse the effects of alternative fuels and emission-control strategies on the performance and exhaust-emission characteristics of marine diesel engines, with emphasis on the relationship among fuel properties, combustion behaviour, efficiency, and emission components. A structured literature review was conducted using 19 national and international scientific articles selected according to their relevance to marine diesel engines, availability of performance and/or emission information, and relevance to alternative fuels or emission-control technologies. The literature was compared using performance indicators including specific fuel oil consumption (SFOC), thermal efficiency, cylinder pressure, and heat release rate (HRR), together with CO, NOx, SOx, CO_2, particulate matter (PM), and black carbon emissions. The synthesis indicates that oxygenated fuels such as biodiesel tend to reduce CO and PM, although NOx may increase under certain operating conditions. LNG shows substantial potential for reducing CO_2 and SOx, while the combination of Exhaust Gas Recirculation (EGR) and Water-in-Fuel Emulsion (WFE) can strongly suppress NOx with a comparatively controlled effect on efficiency. Ammonia offers decarbonisation potential but remains associated with ammonia slip and N_2O formation. Therefore, no single fuel or strategy is superior for all performance and emission indicators; fuel

selection should consider fuel properties, engine operating conditions, combustion strategy, emission targets, and the applicable emission-control technology.

Keywords: *Biodiesel, Exhaust Emissions, Combustion Efficiency, Alternative Fuels, Maritime Sector..*

1. PENDAHULUAN

Transportasi laut merupakan salah satu sektor penting dalam perdagangan global karena lebih dari 90% aktivitas perdagangan internasional dilakukan melalui jalur laut. Namun demikian, sektor pelayaran juga menjadi penyumbang emisi gas buang yang cukup besar, terutama dari penggunaan mesin diesel kapal berbahan bakar fosil. Emisi yang dihasilkan meliputi karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NOx), sulfur oksida (SOx), *particulate matter* (PM), dan *black carbon* yang berdampak terhadap pencemaran udara dan pemanasan global(Wu et al., 2024a). International Maritime Organization (IMO) melalui regulasi MARPOL Annex VI telah menetapkan batas emisi gas buang kapal, termasuk *sulfur cap* 0,5% dan pengurangan emisi NOx Tier III. Oleh karena itu, berbagai penelitian dilakukan untuk mencari bahan bakar alternatif dan teknologi pembakaran yang lebih ramah lingkungan(Abdelhameed & Tashima, 2023a).

Biodiesel menjadi salah satu alternatif yang banyak dikembangkan karena berasal dari sumber terbarukan dan memiliki kandungan oksigen yang tinggi sehingga mampu meningkatkan kualitas pembakaran. Selain itu, berbagai penelitian juga mengembangkan campuran bahan bakar menggunakan nanopartikel, n-butanol, etanol, amonia, serta teknologi seperti *pilot injection*, *Exhaust Gas Recirculation* (EGR), dan *Water-in-Fuel Emulsion*(Jo et al., 2025). Berdasarkan berbagai penelitian tersebut, diketahui bahwa penggunaan bahan bakar alternatif memiliki pengaruh terhadap performa mesin, konsumsi bahan bakar, efisiensi termal, dan karakteristik emisi gas buang. Celah penelitian dalam kajian terdahulu terletak pada belum seragamnya hubungan antara jenis bahan bakar, indikator efisiensi, dan seluruh komponen emisi ketika hasil penelitian dibandingkan lintas studi. Sebagian penelitian berfokus pada satu bahan bakar atau satu parameter emisi, sedangkan penelitian lain menekankan teknologi pengendalian emisi atau karakteristik pembakaran. Oleh karena itu, kajian ini dilakukan untuk mensintesis temuan secara komparatif dengan menempatkan kinerja mesin, karakteristik emisi, serta mekanisme teknis dan keterbatasan penerapan sebagai dasar analisis(Jo et al., 2025). Analisis komparatif dalam kajian ini mencakup tiga kelompok informasi yang saling berkaitan. Kelompok pertama mencakup kecenderungan kinerja mesin yang direpresentasikan oleh *specific fuel oil consumption* (SFOC), efisiensi termal, tekanan silinder, dan *heat release rate* (HRR). Kelompok kedua mencakup perubahan karakteristik emisi CO, NOx, SOx, CO_2,

particulate matter (PM), dan *black carbon*, sedangkan kelompok ketiga membahas mekanisme teknis serta keterbatasan penerapan masing-masing bahan bakar atau strategi pengendalian emisi. Dengan pendekatan tersebut, hasil penelitian tidak hanya diringkas berdasarkan jenis bahan bakar, tetapi juga dibandingkan berdasarkan *trade-off* antara efisiensi, kualitas pembakaran, pengurangan emisi, kondisi operasi, dan kesiapan teknologi pendukung.

Hasil kajian literatur ini diharapkan memberikan dasar pemilihan strategi bahan bakar dan pengendalian emisi yang lebih seimbang antara efisiensi mesin dan kepatuhan dalam menjaga lingkungan. Secara akademik, hasil sintesis dapat memperjelas hubungan antara karakteristik bahan bakar, proses pembakaran, tingkat efisiensi, dan pembentukan emisi sehingga perbedaan kecenderungan yang ditemukan pada berbagai penelitian dapat dipahami secara lebih sistematis. Secara praktis, temuan kajian ini dapat menjadi pertimbangan awal dalam menentukan strategi penggunaan bahan bakar dan teknologi pengendalian emisi sesuai dengan karakteristik mesin, pola operasi kapal, serta target pengurangan emisi yang hendak dicapai. Dengan demikian, hasil kajian tidak hanya menempatkan penurunan emisi sebagai satu-satunya ukuran keberhasilan, tetapi juga mempertimbangkan konsumsi bahan bakar, efisiensi termal, karakteristik pembakaran, kebutuhan infrastruktur, dan aspek keselamatan sebagai bagian yang saling berkaitan dalam penerapan teknologi pada sektor maritim.

2. METODE

Metode penelitian yang digunakan dalam artikel ini adalah kajian literatur terstruktur (*structured literature review*), bukan meta analisis. Pendekatan ini dipilih karena tujuan penelitian adalah mengidentifikasi, mengelompokkan, membandingkan, dan mensintesis hasil penelitian terdahulu mengenai penggunaan bahan bakar alternatif serta strategi pengendalian emisi pada mesin diesel kapal, bukan menggabungkan ukuran efek secara statistik. Korpus kajian akhir terdiri atas 19 artikel ilmiah nasional dan internasional yang relevan dengan tema penelitian dan digunakan sebagai dasar penyusunan Tabel 1 serta pembahasan hasil. Karena naskah awal tidak menyimpan catatan penelusuran secara lengkap pada tahap identifikasi dan penyaringan, jumlah artikel yang ditemukan pada tahap awal dan jumlah artikel yang dieliminasi tidak dapat direkonstruksi secara andal. Oleh sebab itu, naskah ini hanya menyatakan jumlah korpus akhir yang dapat diverifikasi, yaitu 19 artikel, dan tidak mengada - adakan angka seleksi retrospektif.

Penelusuran literatur diarahkan pada artikel nasional dan internasional yang membahas mesin diesel maritim, bahan bakar alternatif, karakteristik pembakaran, konsumsi bahan bakar, serta pengendalian emisi. Sumber penelusuran yang tercermin dalam korpus artikel mencakup laman

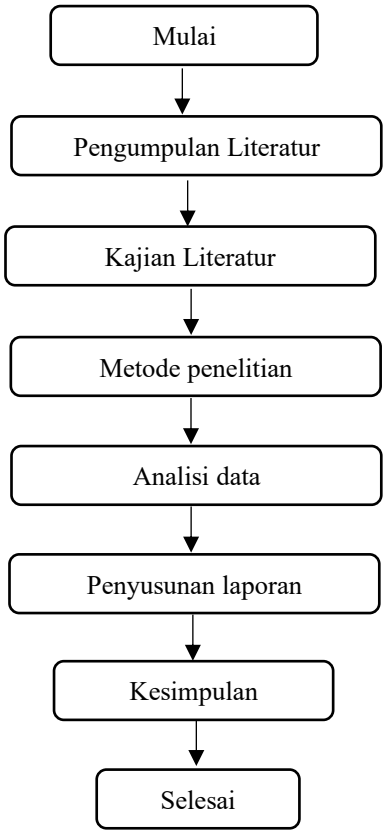
penerbit jurnal dan mesin pencari artikel ilmiah; artikel yang digunakan berasal antara lain dari Energies, Journal of Marine Science and Engineering, Polish Maritime Research, Energy Science and Engineering, Case Studies in Thermal Engineering, serta jurnal nasional bidang maritim dan teknik. Nama basis data bibliografis yang digunakan pada penelusuran awal tidak terdokumentasi secara eksplisit pada naskah sebelumnya sehingga tidak dinyatakan sebagai fakta baru dalam revisi ini. Kata kunci penelusuran disusun dalam bahasa Indonesia dan Inggris, antara lain *marine diesel engine*, *alternative fuel*, biodiesel, LNG, ammonia, *fuel blend*, *emission*, NOx, SOx, CO2, *particulate matter*, *thermal efficiency*, SFOC, EGR, *water-in-fuel emulsion*, dan *pilot injection*, serta kombinasi kata kunci yang menghubungkan bahan bakar dengan performa, pembakaran, dan emisi.

Periode publikasi literatur yang dianalisis berada pada rentang 2021–2025 berdasarkan tahun yang tercantum pada daftar pustaka, dengan beberapa sumber yang pada naskah awal belum mencantumkan tahun publikasi secara lengkap. Kriteria inklusi artikel membahas mesin diesel kapal atau mesin diesel yang konteks aplikasinya relevan dengan sektor maritim, bahan bakar alternatif, campuran bahan bakar, strategi pembakaran, atau teknologi pengendalian emisi, serta artikel juga melaporkan sekurang-kurangnya satu informasi mengenai performa, karakteristik pembakaran, konsumsi bahan bakar atau emisi, dan artikel memiliki informasi bibliografis yang memungkinkan sumber ditelusuri. Kriteria eksklusi meliputi artikel yang tidak berhubungan dengan mesin diesel maritim, tidak menyediakan informasi teknis yang relevan dengan variabel kajian, atau hanya membahas aspek di luar hubungan bahan bakar, performa, pembakaran, dan emisi.

Tahap seleksi dilakukan melalui pemeriksaan judul dan topik artikel, penilaian kesesuaian terhadap ruang lingkup kajian, serta pemeriksaan ketersediaan informasi teknis yang dapat dibandingkan. Artikel yang memenuhi kriteria inklusi dipertahankan sebagai korpus akhir sehingga terdapat 19 artikel yang dianalisis. Karena catatan jumlah artikel pada tahap identifikasi dan penyaringan awal tidak tersedia pada versi naskah sebelumnya, jumlah artikel yang dieliminasi dan alasan eliminasi individual tidak dilaporkan secara numerik. Pernyataan tersebut digunakan untuk menjaga keterlacakan metode dan menghindari penyebutan angka seleksi yang tidak didukung oleh dokumentasi penelitian.

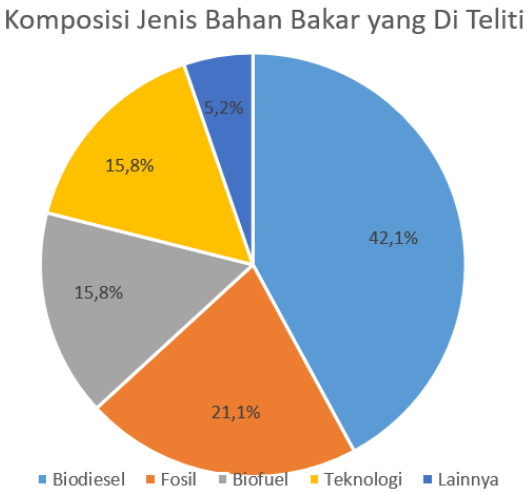
Selanjutnya, data dari setiap artikel diekstraksi dan dikelompokkan berdasarkan jenis bahan bakar atau strategi, karakteristik bahan bakar, parameter performa, karakteristik pembakaran, dan parameter emisi. Variabel yang dibandingkan meliputi nilai kalor, densitas, *viskositas*, *specific fuel oil consumption* (SFOC), efisiensi termal, tekanan silinder, *heat release rate* (HRR), serta emisi CO, NOx, SOx, CO_2, *particulate matter* (PM), dan *black carbon*. Hasil ekstraksi dianalisis secara deskriptif komparatif dengan memperhatikan arah perubahan, besarnya perubahan apabila tersedia, kondisi pengujian, serta keterbatasan masing-masing penelitian. Karena desain eksperimen, jenis mesin, beban,

metode pengukuran, dan kondisi operasi antarartikel tidak seragam, hasil tidak diperlakukan sebagai ukuran performa universal dan tidak dilakukan penggabungan statistik atau perhitungan pengaruh ukuran (*effect size*).



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian(Muliawati et al., 2025)

Data penelitian diperoleh dari 19 jurnal ilmiah nasional dan internasional yang membahas penggunaan biodiesel, LNG, amonia, biofuel, nanopartikel, serta teknologi pengendalian emisi pada mesin diesel maritim. Variabel yang dianalisis meliputi jenis bahan bakar, jenis zat campuran atau teknologi tambahan, nilai kalor, densitas, viskositas bahan bakar, efisiensi pembakaran, dan karakteristik emisi gas buang seperti CO, NOx, SOx, dan *particulate matter* (Noor et al., 2025). Gambar 1 menunjukkan alur penelitian yang dimulai dari pengumpulan literatur, kajian literatur, analisis data, penyusunan laporan, hingga penarikan kesimpulan. Diagram ini menegaskan bahwa penelitian disusun secara bertahap dan sistematis sehingga setiap artikel yang dipilih tidak hanya dikumpulkan, tetapi juga dibandingkan dan disintesis berdasarkan parameter teknis yang sama.



Gambar 2. Komposisi Bahan Bakar Penelitian

Data yang diperoleh kemudian dibandingkan dan dianalisis untuk mengetahui hubungan antara karakteristik bahan bakar dengan efisiensi mesin dan emisi gas buang yang dihasilkan. Analisis dilakukan secara deskriptif dengan membandingkan hasil penelitian dari masing-masing jurnal untuk memperoleh kesimpulan yang komprehensif mengenai efektivitas penggunaan bahan bakar alternatif pada mesin diesel kapal. Gambar 2 memperlihatkan komposisi jenis bahan bakar yang paling banyak dibahas dalam literatur, yaitu biodiesel sebagai topik dominan, diikuti *fuel oil*, teknologi pengendalian emisi, dan bahan bakar lainnya seperti LNG maupun amonia. Distribusi tersebut menunjukkan bahwa biodiesel masih menjadi fokus utama penelitian karena ketersediaannya relatif tinggi, kompatibel dengan mesin diesel eksisting, dan dinilai memiliki potensi transisi yang lebih mudah dibandingkan bahan bakar alternatif lain.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil kajian literatur ini menunjukkan bahwa penggunaan bahan bakar alternatif memberikan pengaruh signifikan terhadap performa mesin diesel dan emisi gas buang. Biodiesel B35 dan B40 *multi-feedstock* mampu meningkatkan efisiensi pembakaran serta menurunkan emisi karbon monoksida dibandingkan solar konvensional(Wu et al., 2023). Berdasarkan Tabel 1, penelitian mengenai biodiesel dan campurannya umumnya memperlihatkan perbaikan pada CO, PM, atau karakteristik pembakaran, tetapi beberapa studi melaporkan kenaikan NOx. Sebaliknya, LNG dan strategi EGR–WFE menunjukkan potensi pengurangan emisi yang lebih luas, walaupun masing-masing mempunyai keterbatasan infrastruktur atau pengaruh terhadap proses pembakaran. Perbedaan ini menunjukkan bahwa efektivitas bahan bakar tidak dapat dinilai hanya dari satu parameter, melainkan harus dilihat

sebagai kompromi antara efisiensi, karakteristik pembakaran, dan beberapa komponen emisi secara bersamaan.

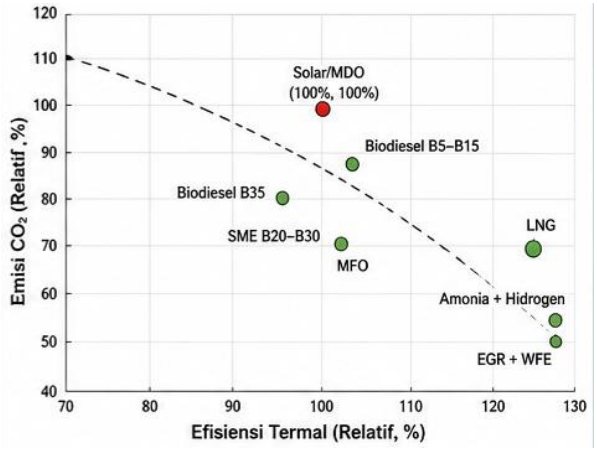
Tabel 1. Hasil kajian penggunaan bahan bakar terhadap emisi gas buang dan tingkat efisiensi mesin diesel kapal

No.	Bahan bakar/strategi	Indikator kinerja	Kecenderungan emisi	Sumber
1	B40 *multi-feedstock* + Pertamina Dex + 2-EHN	Efisiensi pembakaran meningkat; angka setana >59,2.	CO dilaporkan turun hingga 39,04 mg/m³; NOx masih di bawah batas yang dilaporkan.	(Sa'diyah et al., 2025)
2	Biodiesel B35	Efisiensi termal tertinggi 17,25% pada beban 1,75 kW; SFOC menurun saat beban meningkat.	Fokus utama pada performa; tren emisi tidak menjadi parameter utama.	(Purnomo et al., 2024)
3	B30 + Al_2O_3	Pada 70 ppm, torsi naik 4,14% dan *brake power* 6,22%.	Peningkatan performa menunjukkan pembakaran lebih efektif pada kondisi uji.	(Abdillah et al, 2025)
4	MFO/IFO 180 dibanding MGO	MGO dilaporkan memiliki efisiensi termal 42–44% dan kebutuhan perawatan lebih rendah.	Kandungan sulfur MGO <0,5% dibanding MFO yang lebih tinggi.	(Marsudi & Yanti, 2025)
5	Diesel + SME B20/B30	Penambahan SME menurunkan daya dan efisiensi serta meningkatkan konsumsi bahan bakar pada kondisi uji.	Tidak menjadi fokus utama; perubahan performa dikaitkan dengan karakteristik bahan bakar.	(Mahdhudhu & A'dhom, 2024)
6	HFO/MDO/bahan bakar rendah sulfur	Kinerja dibandingkan dalam konteks karakteristik emisi dan operasi bahan bakar.	Teknologi pengendalian emisi dilaporkan dapat menurunkan *black carbon* hingga sekitar 50%.	(Wu et al., 2024b)
7	HFO/LSHFO/MDO + pengelolaan sistem bahan bakar	Perawatan purifier, heater, filter, pompa, dan injector mendukung kinerja mesin.	Kualitas dan viskositas bahan bakar berpengaruh terhadap proses penanganan dan pembakaran.	(Pratama et al., n.d.)
8	MGO + kualitas injektor	Kinerja injektor yang baik mendukung pembakaran dan konsumsi bahan bakar yang lebih efisien.	Tekanan nozzle 365–386 bar dan temperatur gas buang 360–393°C dilaporkan pada kondisi uji.	(David Sinaga & Abdilah, n.d.)
9	LNG dibanding HFO/MDO	Efisiensi termal LNG 45–50%; SFOC 140–180 g/kWh pada kondisi studi.	CO_2 turun 20–30%, SOx hingga 100%, dan NOx hingga 90% pada studi yang direview.	(Nugraha et al., n.d.)
10	MDO + *pilot injection*	Efisiensi termal indikatif meningkat sekitar 2% pada rasio pilot 30%; tekanan silinder dan heat release meningkat.	NOx meningkat, sedangkan jelaga menurun pada fase akhir pembakaran.	(Liang et al., 2021)
11	D100 dibanding B5/B10/B15 dari minyak jelantah	Tekanan silinder dan daya B5–B15 relatif mendekati D100.	B10 dilaporkan memiliki emisi jelaga lebih rendah pada kondisi penelitian.	(Changxiong et al., 2023)
12	Diesel/RME + n-butanol	Efisiensi termal meningkat hingga 3,19% pada D80N20.	CO dan *soot* menurun, tetapi NOx meningkat pada beban tinggi.	Tahun 2022 (Yu et al., 2022)

No.	Bahan bakar/strategi	Indikator kinerja	Kecenderungan emisi	Sumber
13	Amonia/diesel *dual-fuel*	ITE tertinggi 54,47% pada AER 60% dan temperatur silinder 388 K.	CO_2 dan jelaga turun; ammonia slip dan N_2O meningkat sebelum optimasi.	(Guan et al., 2025)
14	Diesel + etanol + n-butanol	*Heat release rate* meningkat hingga 1,44 kali pada D60E30B10; tekanan puncak sedikit berubah pada campuran lain.	NOx dan *soot* menurun, tetapi CO meningkat pada kondisi tertentu.	(Geng et al., 2025)
15	MDO + pemodelan CFD pembakaran	Kesalahan rata-rata tekanan pembakaran maksimum 1,42% pada model yang dibandingkan dengan data.	Model digunakan untuk memprediksi pembentukan NOx dan O_2 dengan akurasi yang dilaporkan tinggi.	(Jo et al., 2025)
16	MDO + karakteristik nyala	Temperatur rata-rata nyala mencapai 1929 K pada beban 50%.	*Soot* tinggi ditemukan pada wilayah temperatur sekitar 1650–2100 K; beban tinggi meningkatkan temperatur dan propagasi api.	(Li et al., 2023)
17	MDO + EGR/WFE	Kombinasi EGR–WFE meningkatkan IMEP sekitar 4% dan memperpendek *afterburning* pada kondisi optimum.	NOx turun hingga 94% pada 16% O_2 dan 40% WFE.	(Abdelhameed & Tashima, 2023a)
18	MGO/B0 dibanding B20/B50/B100	*Ignition delay* B100 lebih pendek 5–8% dibanding B0; biodiesel memiliki viskositas lebih tinggi.	CO turun 7–10%, tetapi NOx meningkat 5–13% pada penggunaan biodiesel.	(Jo et al., 2025)
19	B20 + Al_2O_3 50–150 ppm	B20AL150 meningkatkan tekanan silinder 15,1% dan *heat release rate* 53,9%; *ignition delay* berkurang pada beban tinggi.	Perbaikan karakteristik pembakaran berpotensi mendukung efisiensi, terutama pada beban sedang–tinggi.	(Noor et al., 2025)

Temuan pada Tabel 1 menunjukkan adanya pola yang konsisten sekaligus trade off antar kelompok bahan bakar. Biodiesel dan campurannya cenderung memberikan keuntungan pada oksidasi CO dan pembentukan partikulat, yang terlihat dari penurunan CO atau *soot* pada beberapa studi, tetapi kecenderungan tersebut tidak selalu diikuti penurunan NOx. Sebaliknya, bahan bakar dan strategi yang dirancang untuk menurunkan temperatur pembakaran atau mengurangi kandungan karbon, seperti LNG dan kombinasi EGR–WFE, menunjukkan kemampuan pengurangan emisi yang lebih luas, meskipun memerlukan pertimbangan tambahan terkait infrastruktur, kontrol operasi, atau perubahan sistem bahan bakar. Pada kelompok nanoaditif, peningkatan tekanan silinder dan HRR pada B20AL150 menunjukkan perubahan karakteristik pembakaran yang lebih intens, tetapi peningkatan parameter

pembakaran tidak dapat langsung disamakan dengan penurunan seluruh emisi karena pembentukan NOx tetap dipengaruhi oleh temperatur, oksigen, dan kondisi pembakaran. Dengan demikian, hasil lintas studi menunjukkan bahwa efektivitas suatu bahan bakar sebaiknya dinilai secara multidimensi dengan mempertimbangkan efisiensi, konsumsi bahan bakar, karakteristik pembakaran, emisi, kondisi operasi, dan kebutuhan teknologi pendukung.

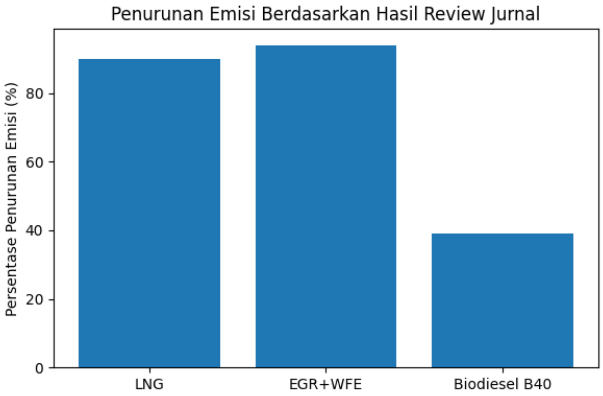


Gambar 3. Grafik Hubungan Efisiensi Termal dan Emisi CO_2

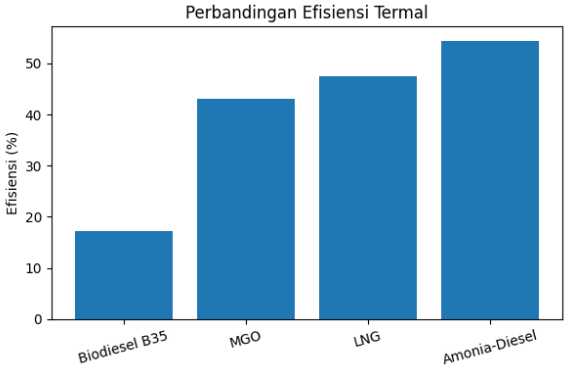
Selain biodiesel, penggunaan *Liquefied Natural Gas* (LNG) berdasarkan Gambar 3 menunjukkan hasil yang sangat baik dalam pengurangan emisi. LNG mampu menurunkan emisi CO_2 hingga 30%, SOx hingga 100%, dan NOx hingga 90% dibandingkan bahan bakar konvensional. Mesin berbahan bakar LNG juga memiliki efisiensi termal yang lebih tinggi. Temuan ini menunjukkan bahwa LNG merupakan salah satu opsi transisi energi yang cukup menjanjikan untuk sektor pelayaran, terutama bagi kapal-kapal yang beroperasi pada rute tetap dan memungkinkan penyediaan infrastruktur *bunkering* khusus. Namun, implementasinya tetap memerlukan investasi sistem penyimpanan kriogenik, modifikasi mesin, dan pengelolaan keselamatan operasional yang memadai.

Teknologi seperti *Exhaust Gas Recirculation* (EGR) dan *Water-in-Fuel Emulsion* (WFE) memperlihatkan mekanisme pengendalian yang berbeda dari penggantian bahan bakar. EGR mengembalikan sebagian gas buang ke ruang bakar sehingga konsentrasi oksigen dan temperatur pembakaran menurun; kondisi ini menghambat pembentukan NOx termal. Penelitian (Abdelhameed & Tashima, 2023) menunjukkan bahwa kombinasi EGR–WFE pada kondisi tertentu dapat menurunkan NO hingga 94% dan meningkatkan IMEP sekitar 4%. Namun, EGR yang terlalu tinggi dapat memperpanjang *afterburning* karena kekurangan oksigen. WFE dapat membantu mengendalikan temperatur dan karakteristik fase akhir

pembakaran, sehingga kombinasi keduanya lebih seimbang daripada penggunaan EGR secara berlebihan.

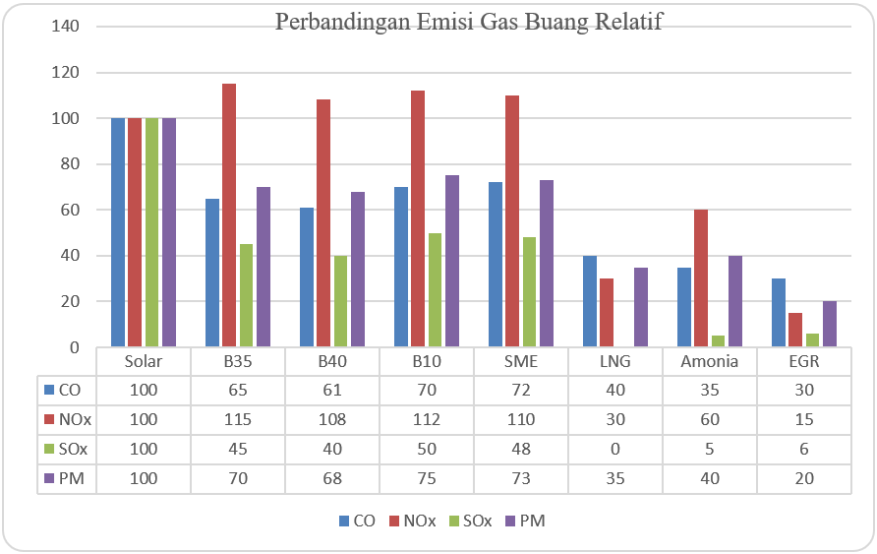


Gambar 4. Penurunan Emisi Berdasarkan Hasil Kajian



Gambar 5. Perbandingan Efisiensi Termal

Kecenderungan kenaikan NOx pada biodiesel dan sebagian bahan bakar campuran dapat dijelaskan melalui mekanisme NOx termal. Pembentukan NO pada kondisi temperatur tinggi terutama mengikuti mekanisme Zeldovich, yang melibatkan reaksi N_2 dengan radikal O dan kemudian N dengan O_2 serta OH. Laju pembentukan NOx sangat sensitif terhadap temperatur dan dipengaruhi pula oleh konsentrasi oksigen serta waktu tinggal pada zona temperatur tinggi. Dengan demikian, kandungan oksigen biodiesel yang membantu oksidasi CO dan *soot* dapat sekaligus meningkatkan kondisi yang mendukung pembentukan NOx apabila temperatur puncak pembakaran menjadi lebih tinggi. Hal ini menjelaskan mengapa peningkatan efisiensi pembakaran tidak selalu diikuti penurunan seluruh komponen emisi.



	Solar	B35	B40	B10	SME	LNG	Amonia	EGR
CO	100	65	61	70	72	40	35	30
NOx	100	115	108	112	110	30	60	15
SOx	100	45	40	50	48	0	5	6
PM	100	70	68	75	73	35	40	20

Gambar 6. Perbandingan Emisi Gas Buang Relatif

Berdasarkan Gambar 6, solar/MDO digunakan sebagai acuan relatif 100% untuk membandingkan CO, NOx, SOx, dan PM. Grafik menunjukkan bahwa biodiesel cenderung menurunkan CO, SOx, dan PM, tetapi beberapa campuran menaikkan NOx. LNG dan EGR menunjukkan penurunan NOx dan SOx yang lebih besar pada data yang tersedia, sedangkan amonia memperlihatkan potensi penurunan emisi karbon tetapi tetap memerlukan pengendalian *ammonia slip* dan N_2O. Karena data berasal dari penelitian dengan mesin, beban, metode pengukuran, dan kondisi operasi yang berbeda, grafik ini harus dibaca sebagai perbandingan kecenderungan relatif, bukan sebagai nilai performa universal. Beberapa parameter emisi yang dibandingkan meliputi :

- CO (*Carbon Monoxide*)
- Nox (*Nitrogen Oxides*)
- Sox (*Sulfur Oxides*)
- PM (*Particulate Matter*)

Perbandingan pada Gambar 3, Gambar 4, Gambar 5, dan Gambar 6 digunakan untuk melihat kecenderungan hubungan antara efisiensi termal dan perubahan emisi, bukan untuk menetapkan nilai performa universal. Karena data berasal dari penelitian dengan jenis mesin, beban, komposisi bahan bakar, metode pengukuran, dan kondisi operasi yang berbeda, angka relatif pada grafik harus dipahami sebagai hasil komparasi dari studi yang direview. Dengan dasar tersebut, grafik lebih tepat digunakan untuk mengidentifikasi arah kecenderungan dan *trade-off* daripada untuk melakukan pemeringkatan absolut antarbahan bakar. Sintesis lintas studi memperlihatkan bahwa tidak terdapat satu teknologi yang dapat dianggap paling unggul untuk seluruh indikator. LNG dan kombinasi EGR–WFE menunjukkan kinerja paling kuat pada pengurangan NOx dan SOx pada kondisi penelitian yang dilaporkan, sedangkan biodiesel lebih konsisten memberikan manfaat pada CO dan PM melalui peningkatan oksidasi akibat kandungan oksigen bahan bakar. Namun, keunggulan tersebut disertai *trade-off* berupa kecenderungan kenaikan NOx pada kondisi tertentu untuk biodiesel serta kebutuhan infrastruktur dan penyesuaian sistem pada LNG. Amonia memberikan prospek dekarbonisasi yang besar karena tidak mengandung karbon dalam molekul bahan bakarnya, tetapi efektivitasnya masih dibatasi oleh kestabilan pembakaran, *ammonia slip*, dan potensi pembentukan N_2O. Sementara itu, EGR dapat menekan NOx secara kuat dengan menurunkan temperatur dan konsentrasi oksigen di ruang bakar, tetapi penggunaan EGR berlebihan berpotensi memperpanjang *afterburning* dan memengaruhi kualitas pembakaran; WFE dapat digunakan sebagai strategi pendamping untuk mengendalikan temperatur dan karakteristik

pembakaran. Oleh karena itu, pemilihan strategi bahan bakar dan pengendalian emisi pada mesin diesel kapal perlu dilakukan berdasarkan target operasi, efisiensi, konsumsi bahan bakar, dan target emisi secara simultan, bukan berdasarkan satu indikator saja.

4. PENUTUP

Simpulan dan Saran

Berdasarkan hasil kajian literatur terhadap 19 artikel, penggunaan bahan bakar alternatif dan strategi pengendalian emisi memberikan pengaruh yang nyata terhadap efisiensi, karakteristik pembakaran, konsumsi bahan bakar, dan emisi gas buang mesin diesel kapal, tetapi responsnya bergantung pada jenis bahan bakar, komposisi campuran, kondisi operasi, serta teknologi pendukung. Biodiesel dan campurannya cenderung memberikan perbaikan pada CO dan PM serta pada kondisi tertentu meningkatkan indikator efisiensi atau karakteristik pembakaran, namun sebagian penelitian menunjukkan kecenderungan kenaikan NOx; LNG menunjukkan potensi pengurangan CO_2 dan SOx yang besar dengan efisiensi termal yang kompetitif, tetapi membutuhkan sistem penyimpanan, distribusi, dan keselamatan khusus; sedangkan amonia menawarkan prospek dekarbonisasi namun masih menghadapi kendala kestabilan pembakaran, *ammonia slip*, dan pembentukan N_2O. Strategi EGR–WFE menunjukkan efektivitas tinggi dalam menekan NOx dengan pengaruh yang relatif terkendali terhadap performa pada kondisi optimum, sedangkan nanoaditif dapat memperbaiki karakteristik pembakaran seperti tekanan silinder dan HRR, meskipun manfaat tersebut tetap harus dievaluasi bersama indikator emisi. Dengan demikian, tidak ada satu bahan bakar atau teknologi yang unggul secara universal; strategi yang paling sesuai harus ditentukan melalui keseimbangan antara efisiensi energi, konsumsi bahan bakar, target emisi, karakteristik mesin, kesiapan infrastruktur, dan keselamatan operasi. Untuk penelitian selanjutnya, dokumentasi penelusuran perlu diperkuat dengan mencatat secara eksplisit basis data, kata kunci, tanggal atau periode pencarian, jumlah artikel pada tahap identifikasi dan penyaringan, serta alasan eksklusi setiap artikel agar kajian dapat dikembangkan menjadi *Systematic Literature Review* (SLR) yang lebih ketat, transparan, dan dapat direplikasi. Selain itu, penelitian berikutnya disarankan mengkaji optimasi waktu dan tekanan injeksi, rasio udara–bahan bakar, temperatur awal silinder, *pilot injection*, integrasi bahan bakar alternatif dengan EGR, WFE, *selective catalytic reduction*, dan teknologi *after-treatment* lainnya, serta memasukkan aspek keekonomian, keselamatan, kesiapan infrastruktur *bunkering*, kompatibilitas material, dan evaluasi siklus hidup emisi agar keputusan pemilihan bahan bakar tidak hanya didasarkan pada

performa mesin dan emisi saat operasi, tetapi juga pada kelayakan teknis dan lingkungan sepanjang siklus hidup.

DAFTAR PUSTAKA

Abdillah, M., Wicaksono, A. B., Ishak, & Nurhidayanti. (2025). Optimasi kinerja mesin diesel dengan campuran biodiesel dan aluminium oksida sebagai nanoaditif. Jurnal Perancangan, Manufaktur, Material, dan Energi (Jurnal PERMADI), 7(1), 56–64.

Abdelhameed, E., & Tashima, H. (2023a). EGR and Emulsified Fuel Combination Effects on the Combustion, Performance, and NOx Emissions in Marine Diesel Engines. Energies, 16(1). https://doi.org/10.3390/en16010336

Changxiong, L., Hu, Y., Yang, Z., & Guo, H. (2023). EXPERIMENTAL STUDY OF FUEL COMBUSTION AND EMISSION CHARACTERISTICS OF MARINE DIESEL ENGINES USING ADVANCED FUELS. Polish Maritime Research, 30(3), 48–58. https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0038

Cuper-Przybylska, D., Nguyen, V. N., Nam, C. D., & Kowalski, J. (2023). High Quality Multi-Zone and 3D CFD Model of Combustion in Marine Diesel Engine Cylinder. Polish Maritime Research, 30(2), 61–67. https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0021

David Sinaga, L., & Abdilah, T. (n.d.). ANALISA KUALITAS KINERJA INJEKTOR TERHADAP KONSUMSI BAHAN BAKAR MOTOR DIESEL MOTOR TUNKER ENERGETIC ANALYSIS OF INJECTOR PERFORMANCE QUALITY ON ENERGETIC TUNKER MOTORCYCLE DIESEL FUEL CONSUMPTION. 2(1).

Geng, P., Hu, X., & Chang, X. (2025). Research on Combustion, Emissions, and Fault Diagnosis of Ternary Mixed Fuel Marine Diesel Engine. Journal of Marine Science and Engineering, 13(8). https://doi.org/10.3390/jmse13081561

Guan, W., Luo, S., Wu, J., Lou, H., Wang, L., Wu, F., Li, L., Huang, F., & He, H. (2025). The Impact of Diesel Injection Strategy and In-Cylinder Temperature on the Combustion and Emissions of Ammonia/Diesel Dual-Fuel Marine Engine. Energies, 18(14). https://doi.org/10.3390/en18143631

Jo, K. S., Kong, K. J., & Han, S. H. (2025). Comparative Analysis of Combustion Characteristics and Emission Formation in Marine Diesel Engines Using Biofuels: Chemical Mechanism Analysis and Computational Fluid Dynamics Simulation. Journal of Marine Science and Engineering, 13(6). https://doi.org/10.3390/jmse13061098

Li, Y., Liu, B., Qin, S., Chang, W., & Dong, Q. (2023). Experimental study on flame combustion characteristics of large-bore marine diesel engine based on endoscopic technology. Case Studies in Thermal Engineering, 44. https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102856

Liang, X., Liu, Z., Wang, K., Wang, X., Zhu, Z., Xu, C., & Liu, B. (2021). Impact of pilot injection on combustion and emission characteristics of a low-speed two-stroke marine diesel engine. Energies, 14(2). https://doi.org/10.3390/en14020417

Mahdhudhu, F. M., & A'dhom, M. I. (2024). Uji performa model mesin kapal dengan menggunakan bahan bakar terbarukan di berbagai konsentrasi. Journal Marine Inside, 100–108. https://doi.org/10.62391/ejmi.v6i2.110

Marsudi, S., & Yanti, D. A. W. (2025). The Impact of Fuel Quality on the Performance and Maintenance of the Ship's Main Engine. JURNAL APLIKASI PELAYARAN DAN KEPELABUHANAN, 16(1), 154–162. https://doi.org/10.30649/japk.v16i1.185

Noor, C. W. M., Ali, S. A., & Musa, M. A. (2025). Combustion Characteristics of Biodiesel-Aluminium Oxide Nanoparticle-Powered Marine Diesel Engines. SSRG International Journal of Mechanical Engineering, 12(11), 23–32. https://doi.org/10.14445/23488360/IJME-V12I11P103

Nugraha, B., Kendek, M., Gumelar, F., Muhammad, F., & Puby Sumarta, R. (n.d.). Studi Kualitatif Performa Mesin Kapal Berbahan Bakar LNG dan Konvensional di Sektor Maritim Indonesia.

Pratama, F., Utari Hendro Sulistio, R., Perawatan Sistem Bahan Bakar Guna Menunjang Kinerja Dari Mesin Induk di Thomas Selmer, O. M., Utari, R., Sulistio, H., Riyadi, S., Setia Budi, E., & Kurniawan, I. (n.d.). Indonesian Journal of Marine Engineering Optimizing Fuel System Maintenance to Support the Performance of the Main Engine on MV. Thomas Selmer.

Purnomo, H., Saifudin, I., Deny Darmawan, P., Darma Arta Kusuma, D., Pelayaran Sulawesi Utara, P., & Kelautan dan Perikanan Bitung, P. (2024). Uji Ekperimental Performa Mesin Diesel Mengunakan Bahan Bakar Biodiesel B35. Kalao's Maritime Journal, 5(1), 28–36. https://doi.org/10.69754/kalaos.v5i1

Sa'diyah, A., Ardiansyah Lutfi, D., Haryono, E., Novianarenti, E., & Rahmat Ramadani, N. (2025). Uji Emisi Gas buang Pada Four Stroke Engine Menggunakan Multi-Feedstock Biodiesel Dengan Penambahan Zat Aditif (2-EHN). Jurnal Teknologi Maritim, 8(2), 13–22. https://doi.org/10.35991/jtm.v8i2.74

Wu, G., Li, J., Guo, H., Wang, X., & Jiang, G. (2023). Numerical Method for Predicting Emissions from Biodiesel Blend Fuels in Diesel Engines of Inland Waterway Vessels. Journal of Marine Science and Engineering, 11(1). https://doi.org/10.3390/jmse11010086

Wu, G., Umar, J. A., Li, T., Zhou, X., Chen, C., Li, J., & Chen, B. (2024c). Recent Research Progress on Black Carbon Emissions from Marine Diesel Engines. In Atmosphere (Vol. 15, Number 1). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/atmos15010022

Yu, S., Cao, C., & Lv, W. (2022). Combustion and emission characteristics investigation of a marine diesel engine powered by diesel/biodiesel/n-butanol blends. Energy Science and Engineering, 10(9), 3317–3330. https://doi.org/10.1002/ese3.1220