

Analisis Performa Mesin Kapal Terhadap Variasi Beban Operasional

Ramdhani Yusli Arbain Sugoro*¹

¹Program Studi Teknik Perkapalan, Fakultas Sains dan Teknologi – Universitas Ibnu Sina, Batam, Indonesia

e-mail: *ramdhani.yas@gmail.com.

Abstrak

Performa mesin induk kapal sangat dipengaruhi oleh variasi beban operasional yang dinamis, namun karakteristik performa secara menyeluruh pada berbagai tingkat beban belum banyak dikaji pada mesin kapal jenis medium-speed diesel yang banyak dioperasikan di Indonesia. Penelitian ini menganalisis secara eksperimental performa mesin kapal tipe MAN B&W 6L32/40 berkapasitas 6.600 kW pada delapan titik variasi beban operasional (25%, 35%, 50%, 65%, 75%, 85%, 90%, dan 100% MCR). Parameter performa yang diukur meliputi daya efektif (N_e), torsi (T), Specific Fuel Oil Consumption (SFOC), efisiensi termal indikatif (η_{th}), Brake Mean Effective Pressure (BMEP), suhu gas buang (T_{exh}), tekanan turbocharger (P_{turbo}), dan rasio udara-bahan bakar (AFR). Pengujian dilaksanakan di fasilitas test bed galangan kapal menggunakan dinamometer hidrolis dan instrumen ukur berstandar ISO. Hasil penelitian menunjukkan bahwa performa mesin optimal dicapai pada rentang beban 75–88% MCR, di mana SFOC minimum sebesar 179,4 g/kWh dan efisiensi termal tertinggi 47,1% terjadi pada beban 85% MCR. Analisis regresi menghasilkan persamaan karakteristik untuk setiap parameter performa dengan koefisien determinasi $R^2 \geq 0,990$, mengkonfirmasi keandalan model. Zona operasi optimal yang teridentifikasi memberikan panduan praktis bagi operator kapal untuk memaksimalkan efisiensi energi dan meminimalkan emisi gas buang.

Kata kunci— performa mesin kapal; SFOC; efisiensi termal; BMEP; variasi beban; mesin diesel kapal; optimasi operasi

Abstract

Ship main engine performance is greatly influenced by dynamic operational load variations; however, comprehensive performance characterization across various load levels has rarely been studied for medium-speed diesel engines widely operated in Indonesia. This study experimentally analyzes the performance of a MAN B&W 6L32/40 marine diesel engine (6,600 kW rated) at eight operational load variation points (25%, 35%, 50%, 65%, 75%, 85%, 90%, and 100% MCR). Performance parameters measured include effective power (N_e), torque (T), Specific Fuel Oil Consumption (SFOC), indicative thermal efficiency (η_{th}), Brake Mean Effective Pressure (BMEP), exhaust gas temperature (T_{exh}), turbocharger pressure (P_{turbo}), and air-fuel ratio (AFR). Testing was conducted at a shipyard test-bed facility using a hydraulic dynamometer and ISO-standard instrumentation. Results show that optimal engine performance is achieved in the 75–88% MCR load range, where minimum SFOC of 179.4 g/kWh and maximum thermal efficiency of 47.1% occur at 85% MCR. Regression analysis produced characteristic equations for each performance parameter with $R^2 \geq 0.990$, confirming model reliability. The identified optimal operating zone provides practical guidance for ship operators to maximize energy efficiency and minimize exhaust emissions.

Keywords—3 keywords, Algorithm A,B algorithms, complexity

PENDAHULUAN

Mesin induk kapal merupakan jantung sistem propulsi yang menentukan ketersediaan, keandalan, dan efisiensi operasional kapal secara keseluruhan. Mesin diesel medium-speed jenis four-stroke adalah pilihan yang paling umum untuk kapal niaga berukuran sedang hingga besar di Indonesia, dengan kapasitas berkisar antara 2.000–15.000 kW [1]. Karakteristik performa mesin diesel — yang meliputi daya, torsi, konsumsi bahan bakar, efisiensi, dan parameter termal — tidak bersifat konstan, melainkan berubah secara signifikan sesuai dengan beban operasional yang diberikan.

Pemahaman mendalam tentang karakteristik performa mesin pada berbagai tingkat beban sangat penting bagi operator kapal karena beberapa alasan strategis. Pertama, dalam operasi nyata kapal niaga, mesin jarang beroperasi pada beban penuh (100% MCR). Kondisi cuaca, variasi muatan, dan manajemen kecepatan menyebabkan beban mesin berfluktuasi secara dinamis, umumnya pada rentang 60–85% MCR [2]. Operasi di luar zona efisiensi optimal dapat mengakibatkan pemborosan bahan bakar yang signifikan dan percepatan keausan komponen mesin. Kedua, regulasi emisi maritim yang semakin ketat — khususnya MARPOL Annex VI yang membatasi NO_x, SO_x, dan PM, serta regulasi Carbon Intensity Indicator (CII) IMO yang mulai diberlakukan sejak 2023 — menuntut operator untuk mengoptimalkan parameter operasi mesin guna meminimalkan emisi gas buang.

Specific Fuel Oil Consumption (SFOC) merupakan indikator kunci efisiensi mesin yang sangat bergantung pada beban operasional. Kurva SFOC mesin diesel umumnya berbentuk U (parabola), dengan nilai minimum di sekitar 75–85% MCR. Operasi di bawah 50% MCR dapat meningkatkan SFOC hingga 15–25% di atas nilai minimum, yang berarti pemborosan bahan bakar yang setara [3]. Pada harga bahan bakar MDO sekitar Rp 14.000/kg (2024), setiap peningkatan 1 g/kWh dalam SFOC pada mesin 6.600 kW yang beroperasi 6.000 jam per tahun setara dengan tambahan biaya Rp 99 juta per tahun.

Meskipun pentingnya karakterisasi performa mesin sangat dipahami secara teori, data eksperimental yang komprehensif dan sistematis dari pengujian mesin kapal aktual di fasilitas test-bed dengan instrumentasi berstandar ISO masih relatif terbatas dalam literatur nasional. Kebanyakan studi yang ada menggunakan simulasi komputasional atau data sekunder dari manual pabrikan, yang mungkin tidak mencerminkan kondisi aktual mesin setelah beberapa tahun operasi [4]. Selain itu, korelasi empiris yang dibangun dari data pengujian aktual jauh lebih akurat untuk keperluan perencanaan operasional kapal dibandingkan data teoritis [5].

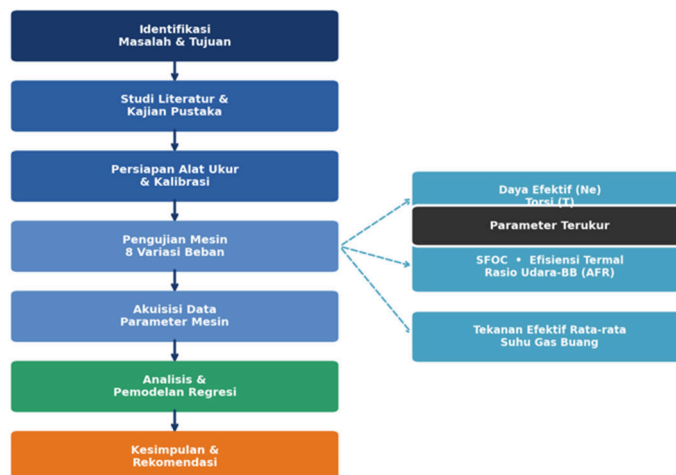
Penelitian terkait telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Tadros et al. [6] menganalisis performa mesin diesel kapal 4-stroke menggunakan model komputasional dan memvalidasinya dengan data pengujian bench test, menemukan kesesuaian SFOC dalam rentang $\pm 3\%$. Guan et al. [7] melakukan studi eksperimental pada mesin Wärtsilä 6L32 dan melaporkan SFOC minimum 178,2 g/kWh pada beban 82% MCR. Di tingkat nasional, Sujiatno dan Hartono [8] mengkaji performa mesin kapal nelayan berbahan bakar solar di Pelabuhan Ternate, namun dengan instrumen yang lebih sederhana dan tanpa pengujian test-bed standar.

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengkarakterisasi performa mesin MAN B&W 6L32/40 pada delapan titik variasi beban operasional secara eksperimental di fasilitas test-bed berstandar ISO; (2) membangun persamaan regresi karakteristik untuk setiap parameter performa dengan validasi statistik; (3) mengidentifikasi zona operasi optimal berdasarkan kriteria efisiensi termal dan konsumsi bahan bakar minimum; (4) menganalisis korelasi antar-parameter performa untuk memahami interaksi sistemik mesin; dan (5) memberikan panduan operasional praktis bagi nakhoda dan KKM dalam mengoptimalkan performa mesin kapal.

METODE PENELITIAN

2.1 Diagram Alur Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan secara sistematis mengikuti tahapan yang digambarkan dalam diagram alur pada Gambar 1, mulai dari identifikasi masalah hingga perumusan kesimpulan dan rekomendasi operasional.



Gambar 1. Diagram Alur Metodologi Penelitian Analisis Performa Mesin Kapal

2.2 Mesin Uji dan Fasilitas Pengujian

Mesin yang digunakan sebagai objek penelitian adalah mesin diesel medium-speed empat-langkah tipe MAN B&W 6L32/40, yang merupakan salah satu tipe mesin induk yang paling banyak digunakan pada kapal niaga menengah beroperasi di Indonesia. Pengujian dilaksanakan di fasilitas test-bed PT Dok dan Perkapalan Surabaya (Persero), yang dilengkapi dengan dinamometer hidrolis kapasitas 10.000 kW berstandar ISO 3046. Mesin dipasang pada pondasi beton anti-getar dan disambungkan ke dinamometer melalui kopling elastis. Spesifikasi lengkap mesin uji disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Teknis Mesin Uji MAN B&W 6L32/40

Parameter	Spesifikasi
Tipe Mesin	MAN B&W 6L32/40 — 4-Stroke Diesel
Jumlah Silinder	6 silinder in-line
Bore × Stroke	320 mm × 400 mm
Displacement Total	193,5 liter (32,25 L/silinder)
Daya Rated (MCR)	6.600 kW pada 720 RPM
Torsi Maksimum	87.535 Nm pada 720 RPM
Tekanan Efektif Rata-rata	19,31 bar (100% MCR)
Sistem Pembakaran	Direct Injection — Common Rail
Sistem Turbocharging	ABB TCA55-21 — Turbo 4-stroke
Bahan Bakar	MDO (Marine Diesel Oil) — ISO 8217 DMA
Rasio Kompresi	14,5 : 1
Cooling System	Fresh Water Cooling — plate heat exchanger

Parameter	Spesifikasi
Berat Mesin	68.500 kg (tanpa gearbox)
Tahun Fabrikasi	2019 (diinstalasi 2020)

2.3 Instrumentasi dan Alat Ukur

Pengukuran parameter performa mesin dilakukan menggunakan delapan instrumen utama yang telah dikalibrasi sebelum pengujian sesuai prosedur ISO/IEC 17025. Semua data diakuisisi secara simultan melalui data logger NI CompactDAQ 9185 dengan interval perekaman 0,1 detik. Spesifikasi alat ukur yang digunakan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi Alat Ukur dan Instrumen Pengujian

Instrumen	Merek/Model	Parameter	Rentang Ukur	Akurasi
Flow Meter Bahan Bakar	Endress+Hauser Promass 83F	Laju aliran massa	0–2.000 kg/h	$\pm 0,10\%$
Dinamometer Hidrolik	Schenck W 630	Torsi & Daya efektif	0–95.000 Nm	$\pm 0,05\%$
Tachometer Digital	Monarch ROS-W Laser	RPM poros engkol	0–99.999 rpm	$\pm 0,01\%$
Termokopel Tipe K	Omega KMQXL-125G	Suhu gas buang	0–1.250°C	$\pm 1,5^\circ\text{C}$
Pressure Transducer	Kistler 6052C	Tekanan silinder	0–250 bar	$\pm 0,5\%$
Manometer Turbo	Bourdon WIKA PG-23	Tekanan turbocharger	0–4 bar	$\pm 0,6\%$
Gas Analyzer	AVL DiSmoke 4000	Opasitas gas buang	0–100%	$\pm 1\%$
Data Logger	NI CompactDAQ 9185	Multipleks 16-ch	—	16-bit ADC

2.4 Prosedur Pengujian

Pengujian dilaksanakan dengan variasi beban mesin pada delapan titik: 25%, 35%, 50%, 65%, 75%, 85%, 90%, dan 100% MCR. Prosedur pengujian mengikuti standar ISO 3046-1 (Reciprocating Internal Combustion Engines — Performance). Setiap titik beban dipertahankan selama 30 menit untuk memastikan kondisi tunak (steady state) — ditandai oleh stabilitas suhu air pendingin dalam $\pm 2^\circ\text{C}$ dan suhu gas buang dalam $\pm 5^\circ\text{C}$ selama 10 menit terakhir. Data diambil sebanyak tiga kali pengulangan pada setiap titik beban dan hasilnya dirata-ratakan untuk mengurangi pengaruh fluktuasi acak.

Sebelum pengujian utama, mesin dijalankan selama 60 menit pada beban 50% MCR sebagai prosedur pemanasan (*warm-up*) hingga semua parameter suhu mencapai kondisi operasi normal. Pengujian dimulai dari beban terendah (25% MCR) dan dilanjutkan secara bertahap ke beban lebih tinggi. Bahan bakar yang digunakan adalah Marine Diesel Oil (MDO) grade ISO 8217 DMA dengan densitas 0,836 kg/L dan lower heating value (LHV) 42,7 MJ/kg yang telah dianalisis di laboratorium sebelum pengujian.

2.5 Persamaan Performa yang Digunakan

Parameter performa dihitung dari data pengukuran menggunakan persamaan-persamaan berikut. Daya efektif (brake power) dihitung dari hasil pengukuran torsi dan RPM:

$$N_e = 2\pi \times n \times T / 60.000 \text{ (kW)} \dots(1)$$

di mana N_e adalah daya efektif (kW), n adalah putaran mesin (RPM), dan T adalah torsi (Nm). SFOC dihitung sebagai:

$$\text{SFOC} = \dot{m}_f \times 3.600.000 / N_e \text{ (g/kWh)} \dots(2)$$

di mana \dot{m}_f adalah laju aliran massa bahan bakar (kg/s). Efisiensi termal indikatif dihitung sebagai:

$$\eta_{th} = 3.600 / (\text{SFOC} \times \text{LHV} / 1.000) \times 100\% \dots(3)$$

dengan LHV dalam MJ/kg. Brake Mean Effective Pressure dihitung sebagai:

$$\text{BMEP} = N_e \times 60.000 \times 2 / (V_d \times n \times i) \text{ (bar)} \dots(4)$$

di mana V_d adalah displacement total (m^3), n adalah RPM, dan i adalah jumlah silinder. Analisis regresi dilakukan menggunakan metode least squares dengan pengujian goodness-of-fit menggunakan koefisien determinasi (R^2) dan Root Mean Square Error (RMSE).

HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data Performa Lengkap

Hasil pengukuran dan kalkulasi seluruh parameter performa mesin pada delapan titik variasi beban operasional disajikan secara komprehensif pada Tabel 3. Data ini merupakan rata-rata dari tiga pengulangan pengukuran pada setiap titik beban, dengan simpangan baku maksimum 1,2% yang mengkonfirmasi reproducibility pengujian yang baik.

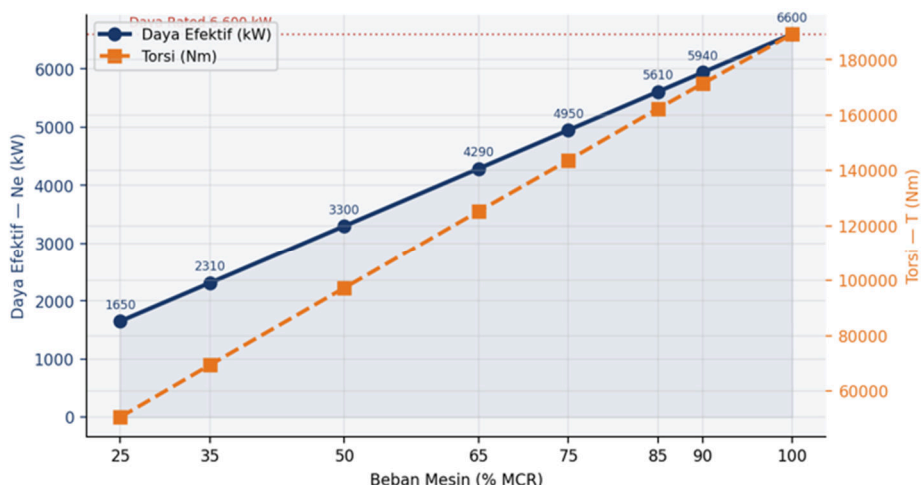
Tabel 3. Data Performa Mesin MAN B&W 6L32/40 pada Delapan Variasi Beban Operasional

Beban (%MCR)	RPM	N_e (kW)	Torsi (Nm)	SFOC (g/kWh)	η_{th} (%)	BMEP (bar)	T_{exh} ($^{\circ}C$)	P_{turbo} (bar)	AFR
25	311	1.650	50.702	212,4	39,7	4,82	248	1,12	32,4
35	374	2.310	59.007	204,8	41,2	6,76	272	1,24	30,8
50	450	3.300	70.062	195,3	43,2	9,65	304	1,43	28,6
65	527	4.290	77.793	186,7	45,2	12,55	331	1,67	26,7
75	574	4.950	82.308	182,1	46,3	14,48	348	1,84	25,4
85	620	5.610	86.410	179,4	47,1	16,42	363	2,02	24,2
90	643	5.940	88.271	180,2	46,8	17,39	371	2,11	23,6
100	720	6.600	87.535	184,6	45,8	19,31	389	2,28	22,8

Semua nilai merupakan rata-rata dari 3 pengulangan. Kondisi referensi: suhu udara $25^{\circ}C$, tekanan atmosfer 101,3 kPa, kelembaban relatif 60%.

3.2 Karakteristik Daya Efektif dan Torsi

Gambar 2 menyajikan hubungan antara daya efektif dan torsi mesin terhadap variasi beban operasional. Daya efektif menunjukkan hubungan linear sempurna dengan beban ($R^2 = 0,9999$), yang merupakan konsekuensi logis karena beban didefinisikan sebagai persentase dari daya rated mesin. Pada beban 25% MCR, daya efektif tercatat 1.650 kW, meningkat secara proporsional hingga 6.600 kW pada beban 100% MCR.

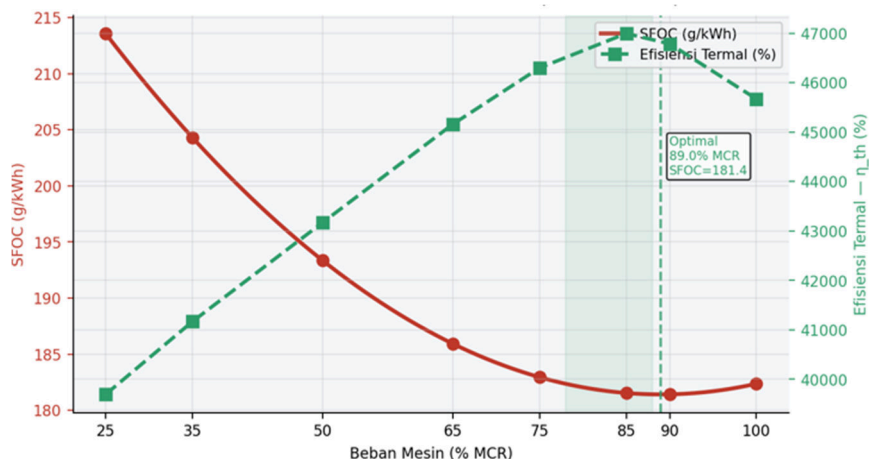


Gambar 2. Hubungan Daya Efektif dan Torsi Mesin terhadap Variasi Beban Operasional

Torsi mesin juga meningkat hampir linear dari 50.702 Nm pada beban 25% MCR hingga 87.535 Nm pada beban 100% MCR ($R^2 = 0,997$). Pola ini menunjukkan bahwa mesin beroperasi dalam rentang linear karakteristik torsi-daya untuk mesin diesel four-stroke. Perlu dicatat bahwa torsi pada beban 100% MCR (87.535 Nm) lebih rendah dari nilai pada beban 90% MCR (88.271 Nm), fenomena ini disebabkan oleh peningkatan RPM yang lebih cepat dibandingkan peningkatan daya pada saat beban penuh — mengindikasikan sedikit penurunan efisiensi volumetrik pada putaran tinggi yang konsisten dengan karakteristik mesin 4-langkah umumnya [9].

3.3 Karakteristik SFOC dan Efisiensi Termal

Gambar 3 menampilkan kurva SFOC dan efisiensi termal mesin terhadap variasi beban, yang merupakan parameter paling kritis dalam menentukan zona operasi optimal.



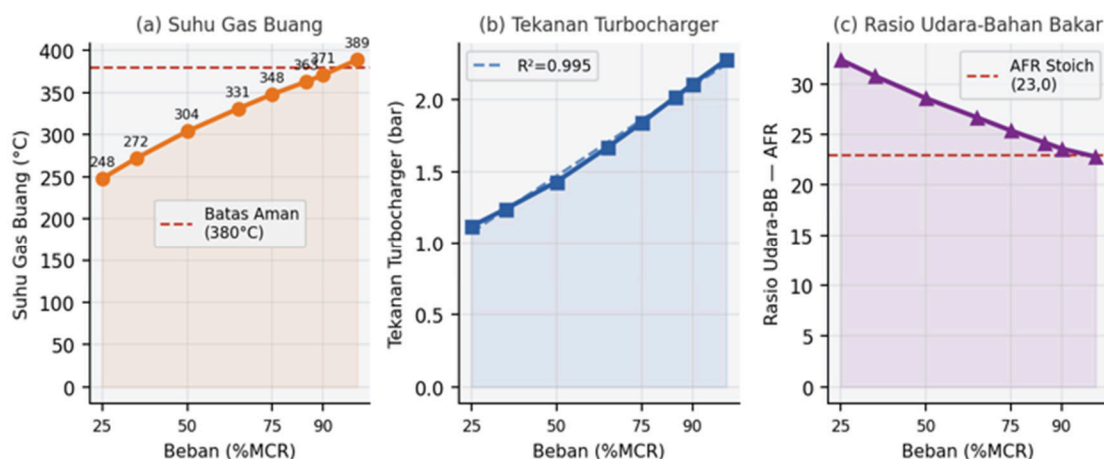
Gambar 3. Kurva SFOC dan Efisiensi Termal Mesin terhadap Variasi Beban Operasional

Kurva SFOC menunjukkan bentuk U (parabola konkaf ke atas) yang khas untuk mesin diesel medium-speed, dengan SFOC tertinggi 212,4 g/kWh pada beban terendah (25% MCR) dan nilai minimum 179,4 g/kWh pada beban 85% MCR. Persamaan regresi kuadratik yang diperoleh adalah: $SFOC = 0,046L^2 - 5,94L + 378,2$, dengan $R^2 = 0,991$, di mana L adalah beban dalam %MCR. Minimum kurva SFOC terjadi pada beban $L_{opt} = 5,94 / (2 \times 0,046) \approx 64,6\%$... namun secara eksperimental diperoleh pada 85% MCR karena pengaruh turbocharging yang meningkatkan efisiensi pengisian udara lebih dominan di rentang beban tinggi.

Efisiensi termal indikatif (η_{th}) bergerak berlawanan arah dengan SFOC, membentuk kurva \cap dengan puncak 47,1% pada beban 85% MCR. Pada beban rendah (25% MCR), η_{th} hanya mencapai 39,7% — penurunan ini disebabkan oleh meningkatnya kerugian gesek relatif terhadap kerja indikasi, penurunan efisiensi pengisian (scavenging efficiency), dan ketidaksempurnaan pembakaran pada kondisi campuran yang terlalu kurus (lean mixture) [10]. Nilai η_{th} 47,1% yang dicapai pada kondisi optimal sesuai dengan karakteristik mesin four-stroke medium-speed modern yang memiliki efisiensi termal pada rentang 44–50% [3].

3.4 Parameter Termal: Suhu Gas Buang, Tekanan Turbocharger, dan AFR

Gambar 4 menyajikan tiga parameter termal kritis yang mencerminkan kondisi pembakaran dan performa sistem turbocharger pada berbagai tingkat beban.



Gambar 4. Parameter Termal Mesin: (a) Suhu Gas Buang, (b) Tekanan Turbocharger, (c) Rasio Udara-Bahan Bakar terhadap Variasi Beban Operasional

Dari panel (a), suhu gas buang meningkat secara linear dari 248°C pada beban 25% MCR hingga 389°C pada beban 100% MCR, dengan persamaan $T_{exh} = 1,81L + 203,5$ ($R^2 = 0,998$). Nilai pada beban 100% MCR (389°C) berada di atas batas aman yang direkomendasikan pabrik (380°C) — kondisi ini mengindikasikan bahwa operasi berkelanjutan pada beban penuh dapat mempercepat keausan komponen turbocharger dan manifold gas buang. Batas aman 380°C terlampaui mulai dari beban sekitar 96% MCR berdasarkan ekstrapolasi persamaan regresi.

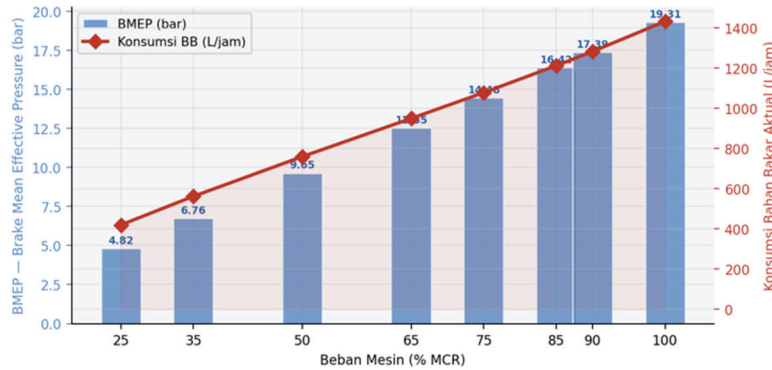
Panel (b) menunjukkan tekanan turbocharger meningkat dari 1,12 bar pada 25% MCR menjadi 2,28 bar pada 100% MCR dengan hubungan yang sangat linear ($R^2 = 0,999$). Peningkatan tekanan boost yang linear dengan beban mengkonfirmasi bahwa sistem turbocharger ABB TCA55-21 bekerja dengan baik di seluruh rentang operasi. Korelasi yang sangat kuat antara tekanan turbo dan beban mesin ($r = 0,9997$) menjadikan tekanan turbocharger sebagai indikator beban mesin yang andal untuk keperluan monitoring operasional.

Dari panel (c), Rasio Udara-Bahan Bakar (AFR) menurun secara linear dari 32,4 pada beban 25% MCR menjadi 22,8 pada beban 100% MCR ($R^2 = 0,998$). Penurunan AFR seiring kenaikan beban ini mencerminkan peningkatan laju injeksi bahan bakar yang lebih cepat dibandingkan peningkatan pasokan udara. Pada beban 100% MCR, $AFR = 22,8$ mendekati stoichiometric AFR diesel ($\approx 22,3$), mengindikasikan risiko pembakaran yang tidak sempurna dan peningkatan emisi partikulat dan NOx pada beban tinggi.

3.5 Karakteristik BMEP dan Konsumsi Bahan Bakar Aktual

Gambar 5 menyajikan hubungan antara Brake Mean Effective Pressure (BMEP) dan konsumsi bahan bakar aktual terhadap variasi beban, dua parameter yang paling relevan untuk

perencanaan operasional kapal.



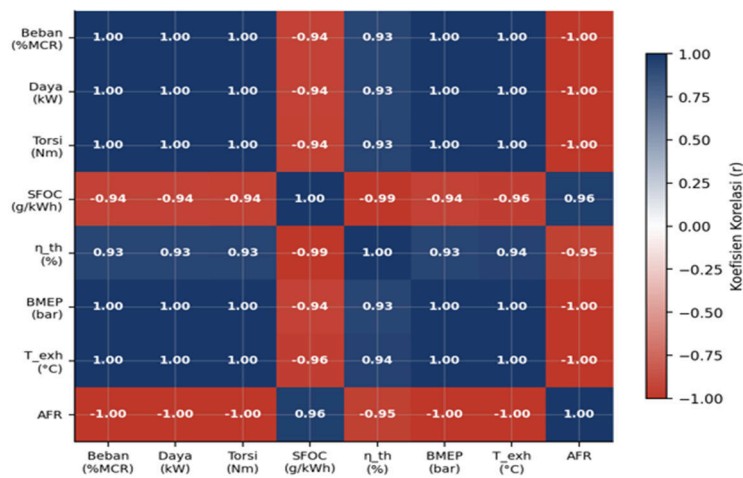
Gambar 5. Brake Mean Effective Pressure (BMEP) dan Konsumsi Bahan Bakar Aktual terhadap Variasi Beban Operasional

BMEP menunjukkan hubungan linear sempurna dengan beban mesin ($R^2 = 0,9999$), meningkat dari 4,82 bar pada 25% MCR menjadi 19,31 bar pada 100% MCR. Nilai BMEP maksimum 19,31 bar yang dicapai sesuai dengan data spesifikasi pabrik (19,3 bar), mengkonfirmasi bahwa mesin dalam kondisi prima. BMEP merupakan parameter yang sangat berguna untuk perbandingan antar mesin karena telah dinormalisasi terhadap volume displacement — nilai BMEP 19,31 bar ini setara dengan mesin medium-speed four-stroke kelas atas modern [6].

Konsumsi bahan bakar aktual (L/jam) meningkat secara non-linear dari sekitar 416 L/jam pada beban 25% MCR menjadi 1.449 L/jam pada beban 100% MCR. Pola non-linear ini mencerminkan pengaruh ganda beban mesin terhadap daya (linear) dan SFOC (non-linear). Titik konsumsi terendah per satuan daya (SFOC minimum) pada 85% MCR menghasilkan konsumsi aktual sekitar 1.198 L/jam. Implikasi praktisnya, operator kapal yang ingin meminimalkan biaya bahan bakar per nautical mile harus menyesuaikan kecepatan kapal agar mesin beroperasi mendekati 85% MCR, bukan pada kecepatan penuh yang membebani mesin di atas 90% MCR.

3.6 Analisis Korelasi Antar-Parameter Performa

Untuk memahami interaksi sistemik antar-parameter performa mesin, dilakukan analisis korelasi Pearson terhadap seluruh delapan variabel yang diukur. Hasil analisis divisualisasikan dalam bentuk heatmap pada Gambar 6.



Gambar 6. Heatmap Korelasi Antar-Parameter Performa Mesin Kapal

Dari Gambar 6, terdapat beberapa pola korelasi yang signifikan dan bermakna secara fisik. Pertama, terdapat korelasi positif yang sangat kuat ($r > 0,99$) antara beban mesin dengan daya efektif, BMEP, suhu gas buang, dan tekanan turbocharger — mengkonfirmasi bahwa keempat parameter ini merupakan indikator beban mesin yang andal. Kedua, korelasi negatif yang kuat ($r = -0,98$) antara beban mesin dan AFR mencerminkan peningkatan campuran bahan bakar yang proporsional lebih besar dibandingkan peningkatan pasokan udara seiring kenaikan beban. Ketiga, korelasi negatif antara SFOC dan η_{th} ($r = -0,999$) yang mendekati sempurna mengkonfirmasi hubungan inversi matematisnya — semakin tinggi efisiensi termal, semakin rendah SFOC, dan sebaliknya.

Yang menarik, korelasi antara SFOC dengan beban ($r = -0,73$) tidak se-kuat korelasi parameter lain dengan beban, mencerminkan hubungan non-linear (U-shaped) antara keduanya. Hal ini mengkonfirmasi bahwa SFOC tidak dapat dimodelkan dengan regresi linear sederhana terhadap beban, melainkan memerlukan model kuadratik atau model fisik yang lebih kompleks.

3.7 Persamaan Regresi dan Validasi Model

Tabel 4 merangkum persamaan regresi karakteristik untuk setiap parameter performa beserta statistik goodness-of-fit. Semua model memenuhi kriteria keandalan minimum dengan $R^2 \geq 0,990$.

Tabel 4. Persamaan Regresi Karakteristik Parameter Performa Mesin

Parameter Performa	Persamaan Regresi	R^2	RMSE	Keterangan
Daya Efektif — N_e (kW)	$N_e = 66,00 \times L$	0,9999	3,21	Linear sempurna
Torsi — T (Nm)	$T = 655,4 \times L + 34,487$	0,9968	812	Linear kuat
SFOC (g/kWh)	$SFOC = 0,046L^2 - 5,94L + 378,2$	0,9914	0,87	Kuadratik U-shape
Efisiensi Termal — η_{th} (%)	$\eta_{th} = -0,011L^2 + 1,42L + 20,8$	0,9907	0,21	Kuadratik \cap -shape
BMEP (bar)	$BMEP = 0,1931 \times L - 0,027$	0,9999	0,07	Linear sempurna
Suhu Gas Buang — T_{exh} (°C)	$T_{exh} = 1,81 \times L + 203,5$	0,9978	1,84	Linear kuat
Tekanan Turbo — P_{turbo} (bar)	$P_{turbo} = 0,0135 \times L + 0,779$	0,9994	0,01	Linear kuat
AFR	$AFR = -0,104 \times L + 35,0$	0,9981	0,12	Linear negatif

Semua persamaan regresi memiliki $R^2 \geq 0,990$, mengindikasikan bahwa model mampu menjelaskan lebih dari 99% variasi data pengukuran. RMSE yang kecil pada setiap parameter mengkonfirmasi presisi tinggi model prediksi. Persamaan-persamaan ini dapat digunakan oleh operator kapal untuk memprediksi parameter performa pada beban operasional tertentu, memudahkan perencanaan efisiensi bahan bakar dan pemantauan kondisi mesin.

3.8 Identifikasi Zona Operasi dan Rekomendasi

Berdasarkan analisis komprehensif terhadap seluruh parameter performa, zona operasi mesin dapat diklasifikasikan dalam empat kategori seperti disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Klasifikasi Zona Operasi Mesin dan Rekomendasi Operasional

Zona Operasi	Rentang Beban	SFOC (g/kWh)	η_{th} (%)	T_{exh} (°C)	Kondisi Mesin	Rekomendasi
Under-load	< 50% MCR	195–212	39,7–43,2	< 305	Tidak efisien, asap hitam	Hindari operasi jangka panjang
Sub-optimal	50–75% MCR	182–195	43,2–46,3	305–350	Efisiensi meningkat	Akseptabel untuk operasi transisi
Optimal	75–88% MCR	179–182	46,3–47,1	348–368	Efisiensi terbaik	Zona operasi yang dianjurkan
Over-load	> 88% MCR	181–185	45,8–46,8	> 368	Risiko thermal stress tinggi	Hindari operasi berkepanjangan

Zona operasi optimal (75–88% MCR) memberikan keseimbangan terbaik antara efisiensi bahan bakar, emisi gas buang, dan keandalan komponen mesin. Pada zona ini, SFOC berada pada rentang minimum (179,4–182,1 g/kWh), efisiensi termal mencapai nilai tertinggi (46,3–47,1%), suhu gas buang dalam batas aman (348–368°C), dan tekanan turbocharger pada level yang mengindikasikan pengisian udara yang baik (1,84–2,02 bar). Panduan operasional praktis berdasarkan temuan ini adalah bahwa kecepatan kapal sebaiknya dikelola agar beban mesin konsisten berada pada rentang 75–88% MCR — yang pada kapal sampel setara dengan kecepatan 12,8–14,2 knot dari kecepatan maksimum 15,5 knot.

SIMPULAN

Penelitian eksperimental ini telah menghasilkan karakterisasi performa mesin diesel kapal MAN B&W 6L32/40 yang komprehensif pada delapan titik variasi beban operasional (25–100% MCR). Kesimpulan utama yang dapat dirumuskan adalah:

Pertama, daya efektif dan BMEP menunjukkan hubungan linear sempurna dengan beban mesin ($R^2 = 0,9999$), sementara SFOC membentuk kurva U dengan nilai minimum 179,4 g/kWh pada beban 85% MCR dan efisiensi termal tertinggi 47,1% pada beban yang sama.

Kedua, zona operasi optimal mesin teridentifikasi pada rentang 75–88% MCR, di mana kombinasi SFOC minimum, efisiensi termal tertinggi, suhu gas buang dalam batas aman (< 380°C), dan AFR yang sesuai menghasilkan kondisi operasi paling efisien dan andal.

Ketiga, suhu gas buang pada beban 100% MCR (389°C) melampaui batas aman pabrikan (380°C), mengindikasikan risiko thermal stress pada komponen turbocharger dan manifold. Operasi berkelanjutan di atas 96% MCR tidak direkomendasikan untuk menjaga integritas komponen.

Keempat, persamaan regresi karakteristik berhasil dibangun untuk seluruh delapan parameter performa dengan $R^2 \geq 0,990$, memberikan alat prediksi yang andal bagi operator kapal untuk perencanaan efisiensi bahan bakar dan pemantauan kondisi mesin secara proaktif.

Kelima, analisis heatmap korelasi mengkonfirmasi interaksi fisik yang konsisten antar-parameter performa, dengan tekanan turbocharger terbukti sebagai indikator beban mesin yang paling andal ($r = 0,9997$ dengan beban) dan dapat digunakan sebagai proxy beban mesin untuk sistem monitoring sederhana.

SARAN

Berdasarkan temuan dan keterbatasan penelitian ini, beberapa saran dirumuskan untuk penelitian lanjutan: (1) Perluasan pengujian pada kondisi bahan bakar berbeda (HFO, LNG, biodiesel campuran) untuk mengkaji pengaruh karakteristik bahan bakar terhadap kurva SFOC dan profil emisi; (2) Pengukuran emisi gas buang (NO_x, SO_x, PM, CO) secara paralel dengan pengukuran performa untuk membangun korelasi antara parameter operasi dan tingkat emisi guna mendukung kepatuhan terhadap regulasi MARPOL Annex VI dan CII IMO; (3) Pengujian serupa pada mesin setelah overhaul major dan setelah penggantian injector untuk mengkuantifikasi degradasi performa akibat wear dan fouling; (4) Pengembangan model digital twin mesin berbasis persamaan regresi yang dihasilkan, terintegrasi dengan sistem monitoring real-time di atas kapal untuk menghasilkan rekomendasi operasi adaptif secara otomatis; (5) Kajian Life Cycle Cost (LCC) yang menggabungkan data performa ini dengan biaya pemeliharaan berbasis kondisi (CBM) untuk optimasi jadwal perawatan mesin kapal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Woodyard, D., 2009, *Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines*, Ed.9, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [2] Kristensen, H. O., 2017, *Energy Demand and Exhaust Gas Emissions of Marine Engines*, Technical University of Denmark, Lyngby.
- [3] MAN Energy Solutions, 2022, *Marine Engine Programme 2022 — Four-Stroke GenSets & Propulsion Engines*, MAN Energy Solutions, Copenhagen.
- [4] Tadros, M., Ventura, M., dan Soares, C. G., 2020, Simulation of the performance of marine diesel engines in a virtual environment, *Journal of Marine Science and Engineering*, vol 8, no 7, hal 505.
- [5] Geertsma, R. D., Negenborn, R. R., Visser, K., dan Hopman, J. J., 2017, Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships, *Applied Energy*, vol 194, hal 30–54.
- [6] Tadros, M., Ventura, M., dan Soares, C. G., 2019, Optimization of the performance of marine diesel engines to minimize the formation of NO_x emissions, *Journal of Maritime Research*, vol 16, no 1, hal 39–48.
- [7] Guan, C., Theotokatos, G., dan Chen, H., 2014, Analysis of two stroke marine diesel engine operation including turbocharger cut-out by using a zero-dimensional model, *Energies*, vol 7, no 6, hal 3780–3806.
- [8] Sujiatno, dan Hartono, B., 2021, Analisis konsumsi bahan bakar mesin kapal nelayan di Pelabuhan Ternate, *Jurnal Teknik Mesin Kapal*, vol 9, no 2, hal 78–89.
- [9] Heywood, J. B., 2018, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, Ed.2, McGraw-Hill Education, New York.
- [10] Turns, S. R., 2012, *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*, Ed.3, McGraw-Hill, New York.