



ANALISIS EFISIENSI ENERGI SISTEM PERMESINAN PADA KAPAL LAUT MODERN: TANTANGAN DAN SOLUSI

Farol Furtado^{1*}, Fariskhul Afi Valdynico², Fernando Alonso³, Gerald wahyu pratama⁴,
Mariana Kristiyanti⁵

Alamat: ^{1,2,3,4,5}Lembaga Pendidikan Vokasi Kemaritiman, Indonesia

Korespondensi penulis: Farolfraja@email.ac.id

Abstract. *Energy efficiency in modern marine machinery systems is a strategic issue because fuel consumption, main-engine reliability, auxiliary machinery performance, and emission compliance determine ship operating costs and environmental sustainability. This research analyzes challenges and solutions for improving the energy efficiency of machinery systems on modern vessels. The method used is a narrative literature. The review shows that machinery energy efficiency is affected by fuel quality, fuel oil purification, main-engine combustion performance, fresh water generator reliability, shipboard electrical load forecasting, hybrid energy management, battery-electric readiness, ammonia engine design, and onboard carbon capture. The main challenges include fluctuating sea conditions, degradation of mechanical components, fuel contamination, limited space for energy storage, safety risks of alternative fuels, and the competence of engine-room personnel in data-based operation. The most realistic solutions are condition-based maintenance, fuel quality monitoring, optimized purifier operation, waste heat utilization, power demand forecasting, energy management systems, and a gradual transition toward hybrid, battery, ammonia, and carbon-capture technologies. This research concludes that energy efficiency must be treated as an integrated technical, operational, managerial, and educational concern.*

Keywords: *energy efficiency; marine machinery; main engine; energy management system; modern ship*

Abstrak. Efisiensi energi pada sistem permesinan kapal laut modern merupakan isu strategis karena konsumsi bahan bakar, keandalan mesin induk, kinerja mesin bantu, dan kepatuhan emisi menentukan biaya operasi serta keberlanjutan pelayaran. Penelitian ini bertujuan menganalisis tantangan dan solusi peningkatan efisiensi energi sistem permesinan pada kapal modern. Metode yang digunakan adalah studi literatur naratif. Hasil kajian menunjukkan bahwa efisiensi energi permesinan dipengaruhi oleh kualitas bahan bakar, pemurnian fuel oil, performa pembakaran mesin induk, keandalan fresh water generator, peramalan beban listrik kapal, manajemen energi hibrida, kesiapan kapal berbasis baterai, desain mesin amonia, dan teknologi penangkapan karbon di atas kapal. Tantangan utama meliputi perubahan kondisi laut, penurunan performa komponen, kontaminasi bahan bakar, keterbatasan ruang penyimpanan energi, risiko keselamatan bahan bakar alternatif, dan kompetensi awak mesin dalam pengoperasian berbasis data. Solusi yang paling realistis adalah pemeliharaan berbasis kondisi, monitoring kualitas bahan bakar, optimalisasi purifier, pemanfaatan panas buang, peramalan kebutuhan daya, energy management system, serta transisi bertahap menuju teknologi hibrida, baterai, amonia, dan carbon capture. Penelitian ini menyimpulkan bahwa efisiensi energi perlu dipandang sebagai persoalan teknis, operasional, manajerial, dan pendidikan secara terpadu.

Kata kunci: efisiensi energi; permesinan kapal; mesin induk; energy management system; kapal modern

1. LATAR BELAKANG

Kapal laut modern menjadi tulang punggung transportasi barang dan penumpang, tetapi sektor ini menghadapi tuntutan efisiensi bahan bakar dan pengurangan emisi. Sistem permesinan kapal mencakup mesin induk, generator, boiler bantu, pompa, kompresor, sistem bahan bakar, pendingin, hingga perangkat kendali otomatis yang saling berkaitan. Jika salah satu subsistem tidak bekerja optimal, konsumsi bahan bakar dan biaya perawatan dapat meningkat serta mengganggu keselamatan operasi. Oleh karena itu, efisiensi energi perlu dikaji secara menyeluruh, bukan hanya dari performa mesin induk.

Isu efisiensi semakin penting seiring transisi pelayaran menuju sistem rendah karbon. Bai et al. (2025) menyebutkan bahwa pengurangan emisi kapal dapat dilakukan melalui bahan bakar alternatif, optimasi operasi kapal, desain lambung hijau, dan pemanfaatan panas buang.

Pada kapal berbasis mesin diesel, efisiensi masih dapat ditingkatkan melalui perawatan, monitoring, dan pengaturan operasi yang tepat.

Kualitas bahan bakar juga berpengaruh terhadap efisiensi energi. Marsudi dan Yanti (2025) menunjukkan bahwa penurunan viskositas bahan bakar meningkatkan specific fuel oil consumption, sedangkan kandungan sulfur dan air mempercepat korosi sistem injeksi. Rifaldi et al. (2024) menegaskan pentingnya fuel oil purifier dalam menjaga kebersihan bahan bakar. Selain itu, mesin bantu seperti fresh water generator juga memengaruhi efisiensi energi karena gangguan pada sistem dapat menyebabkan pemanfaatan panas buang menjadi tidak optimal.

Perkembangan teknologi turut mendorong pengelolaan energi kapal yang lebih cerdas, seperti penggunaan model predictive control, energy management system, kapal listrik berbasis baterai, hingga teknologi penangkapan CO₂. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini membahas analisis efisiensi energi sistem permesinan pada kapal laut modern melalui kajian literatur mengenai tantangan dan solusi. Kajian ini penting karena efisiensi energi berkaitan dengan penghematan bahan bakar, keselamatan kerja, kepatuhan regulasi, dan tanggung jawab lingkungan.

2. KAJIAN TEORETIS

Efisiensi energi dalam sistem permesinan kapal merupakan perbandingan antara energi yang dimanfaatkan untuk menghasilkan daya dengan energi yang masuk melalui bahan bakar atau sumber energi lain. Pada mesin diesel kapal, efisiensi dipengaruhi oleh kualitas pembakaran, sistem injeksi, pendinginan, pelumasan, serta beban operasi. Mesin yang masih beroperasi normal belum tentu efisien apabila konsumsi bahan bakarnya meningkat.

Bahan bakar menjadi faktor utama dalam kualitas pembakaran. Kontaminasi air, sulfur tinggi, dan viskositas yang tidak sesuai dapat menurunkan efisiensi panas serta mempercepat pembentukan deposit karbon. Marsudi dan Yanti (2025) menunjukkan bahwa kualitas bahan bakar berpengaruh terhadap biaya perawatan, sedangkan Rifaldi et al. (2024) menegaskan pentingnya fuel oil purifier dalam menjaga kebersihan bahan bakar sebelum masuk ke mesin diesel.

Efisiensi energi juga berkaitan dengan pemanfaatan panas buang, seperti pada fresh water generator yang menggunakan panas mesin untuk menghasilkan air tawar. Jika sistem ini terganggu, pemanfaatan energi menjadi tidak optimal. Selain itu, kapal modern mulai menerapkan energy management system untuk mengatur distribusi daya antara mesin, generator, baterai, dan beban listrik agar operasi lebih hemat dan aman. Fazzini et al. (2025) serta Mushtaq et al. (2025) menunjukkan bahwa pengelolaan energi berbasis data dan kendali prediktif mampu meningkatkan efisiensi operasi kapal.

Dalam transisi energi maritim, berbagai teknologi seperti bahan bakar amonia, kapal listrik berbasis baterai, dan penangkapan karbon mulai dikembangkan untuk menurunkan emisi kapal. Oleh karena itu, kajian efisiensi energi kapal perlu menggabungkan teori permesinan, manajemen energi, perawatan, dan dekarbonisasi secara terpadu.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur naratif. Metode ini dipilih karena tujuan penelitian adalah mengidentifikasi, membandingkan, dan menyintesis temuan dari berbagai penelitian terbaru mengenai efisiensi energi permesinan kapal. Sumber dipilih berdasarkan kesesuaian topik dengan mesin induk, mesin bantu, fuel oil purifier, kualitas bahan bakar, energy management system, sistem hibrida, baterai, amonia, dan carbon capture.

Tahapan penelitian dilakukan melalui empat langkah. Pertama, menentukan kata kunci pencarian, yaitu efisiensi energi kapal, sistem permesinan kapal, bahan bakar alternatif, propulsi hibrida, emisi kapal, hybrid ship energy management, ammonia marine engine, onboard CO₂ capture, dan shipboard electrical power demand. Kedua, menyeleksi jurnal yang relevan dan tersedia dalam bentuk open access. Ketiga, menganalisis inti literatur, terutama temuan yang berkaitan dengan tantangan dan solusi teknis. Keempat, menyintesis temuan ke dalam tema yang dapat digunakan sebagai dasar pembahasan. Kriteria inklusi dalam kajian memuat permesinan kapal atau isu energi dan emisi pelayaran, serta dapat menjelaskan tantangan atau solusi efisiensi energi, dan berkaitan dengan bidang maritim, atau tidak membahas aspek energi, emisi, permesinan, bahan bakar, dan manajemen operasional kapal.

Analisis dilakukan secara deskriptif-kualitatif. Setiap artikel dibaca untuk menemukan gagasan utama, data penting, dan implikasi teknis. Hasil bacaan kemudian dikelompokkan menjadi beberapa tema, yaitu kondisi efisiensi energi kapal modern, tantangan teknis sistem permesinan, solusi melalui bahan bakar alternatif, solusi melalui sistem hibrida dan kendali energi, solusi melalui tata kelola emisi, serta solusi melalui perawatan berbasis data.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Tantangan Efisiensi pada Mesin Induk dan Sistem Bahan Bakar

Mesin induk merupakan konsumen energi terbesar di kapal. Tantangan efisiensinya muncul ketika pembakaran tidak berlangsung sempurna. Penyebabnya dapat berasal dari tekanan injeksi yang tidak stabil, injector kotor, turbocharger tidak optimal, temperatur udara bilas meningkat, atau kualitas bahan bakar buruk. Marsudi dan Yanti (2025) menunjukkan bahwa penurunan kualitas bahan bakar dapat meningkatkan konsumsi bahan bakar spesifik dan biaya perawatan. Dalam praktiknya, operator kamar mesin perlu mengamati parameter harian seperti temperatur gas buang tiap silinder, tekanan bahan bakar, tekanan udara bilas, dan konsumsi bahan bakar per jam untuk mengetahui gejala inefisiensi.

Sistem bahan bakar menjadi titik kritis karena bahan bakar yang tidak bersih akan memengaruhi komponen berikutnya. Fuel oil purifier harus bekerja dengan temperatur, gravitasi disc, sealing water, dan jadwal sludge discharge yang sesuai. Rifaldi et al. (2024) menegaskan bahwa pemurnian bahan bakar membantu mencegah penyumbatan injector dan menurunnya efisiensi pembakaran. Jika purifier tidak dirawat, air dan kotoran dapat lolos ke service tank sehingga kualitas pembakaran menurun. Dengan demikian, pengoperasian purifier yang benar merupakan solusi dasar yang murah tetapi berdampak besar.

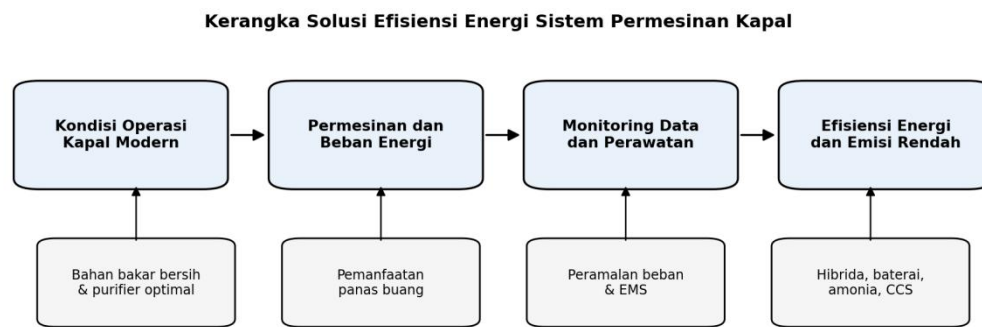
Tantangan lain adalah perubahan jenis bahan bakar akibat regulasi emisi sulfur. Penggunaan VLSFO atau MGO dapat mengubah karakteristik viskositas dan kestabilan bahan bakar. Apabila operator tidak menyesuaikan temperatur pemanasan, purifier, dan sistem transfer, risiko gangguan pembakaran meningkat. Oleh karena itu, efisiensi energi harus dimulai dari fuel management plan yang mencakup pemeriksaan bunker, pengujian sampel, pemisahan tangki, pencatatan pemakaian, serta tindakan koreksi jika ditemukan kontaminasi.

4.2 Efisiensi Mesin Bantu dan Pemanfaatan Panas Buang

Mesin bantu dan sistem penunjang memiliki pengaruh besar terhadap efisiensi energi kapal. Generator yang bekerja pada beban terlalu rendah cenderung kurang efisien karena konsumsi bahan bakar per kWh meningkat. Selain itu, pompa, kompresor, purifier, dan sistem pendingin juga memerlukan pengaturan operasi yang tepat agar tidak membuang energi secara berlebihan. Oleh karena itu, efisiensi energi harus diterapkan tidak hanya pada mesin induk, tetapi juga pada seluruh sistem permesinan bantu.

Fresh water generator (FWG) merupakan contoh pemanfaatan panas buang yang penting di kapal. Bumbungan et al. (2025) menjelaskan bahwa kerak, kebocoran vakum, dan

gangguan pompa dapat menurunkan performa FWG sehingga pemanfaatan energi menjadi tidak optimal. Solusi yang dapat dilakukan meliputi pembersihan evaporator, pemeriksaan ejector, pengawasan salinitas, dan pencatatan jam operasi. Sejalan dengan itu, Bai et al. (2025) menempatkan waste heat recovery sebagai salah satu teknologi penting dalam pengurangan emisi kapal. Meskipun tidak semua kapal dapat memasang sistem baru, efisiensi tetap dapat ditingkatkan melalui perawatan heat exchanger, pencegahan kebocoran, dan menjaga kebersihan permukaan perpindahan panas.



Sintesis penelitian: efisiensi energi dibangun melalui integrasi operasi, data, perawatan, dan teknologi rendah karbon.

Gambar 1. Kerangka solusi efisiensi energi sistem permesinan kapal modern

4.3 Digitalisasi, Peramalan Daya, dan Energy Management System

Kapal modern semakin bergantung pada data. Logbook kamar mesin, sensor temperatur, tekanan, flowmeter, alarm, dan data generator dapat digunakan untuk melihat pola energi. Tantangannya adalah data sering dicatat hanya sebagai kewajiban administratif, belum dianalisis untuk menemukan penyimpangan. Padahal, analisis data dapat menunjukkan kenaikan konsumsi bahan bakar, penurunan efisiensi generator, atau gejala kerusakan awal pada komponen. Dengan digitalisasi sederhana, data operasional dapat menjadi dasar pemeliharaan berbasis kondisi.

Fazzini et al. (2025) menunjukkan bahwa peramalan kebutuhan daya listrik kapal menggunakan data multivariat dapat membantu energy management system bekerja lebih efisien. Hal ini penting karena beban listrik kapal berubah sesuai operasi mesin, kondisi cuaca, aktivitas hotel load, dan kebutuhan penunjang. Pada kapal hibrida, Mushtaq et al. (2025) memperlihatkan bahwa model predictive control mampu mengatur baterai dan superkapasitor agar generator tidak menerima fluktuasi beban yang terlalu besar.

Solusi digital tidak harus langsung berbentuk sistem mahal. Kapal dapat memulai dengan pencatatan konsumsi bahan bakar harian, rasio konsumsi terhadap jarak tempuh, beban generator rata-rata, produksi FWG, dan frekuensi alarm. Data tersebut kemudian dibandingkan dengan kondisi normal. Jika terdapat penyimpangan, operator dapat melakukan inspeksi lebih awal. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip predictive maintenance, yaitu perawatan dilakukan berdasarkan gejala performa, bukan hanya berdasarkan jam kerja.

4.4 Teknologi Hibrida, Baterai, Amonia, dan Carbon Capture

Teknologi hibrida menjadi salah satu solusi antara mesin konvensional dan kapal rendah karbon. Sistem ini menggabungkan mesin diesel, generator, baterai, atau superkapasitor. Kelebihannya adalah mesin dapat beroperasi pada titik beban yang lebih efisien, sedangkan baterai membantu menanggung fluktuasi beban. Namun, teknologi ini membutuhkan sistem kendali yang baik. Tanpa energy management system, baterai justru dapat menjadi beban tambahan karena bobot, biaya, dan kebutuhan perawatannya.

Moon et al. (2025) menjelaskan bahwa kapal listrik berbasis baterai memiliki potensi besar untuk kapal domestik berukuran kecil sampai menengah, terutama pada rute tetap dan jarak pendek. Akan tetapi, penerapan baterai pada kapal jarak jauh masih menghadapi keterbatasan densitas energi, durasi pengisian, investasi, dan infrastruktur pelabuhan. Oleh sebab itu, kapal baterai lebih realistis diterapkan secara bertahap sesuai jenis kapal dan pola operasi. Pemahaman tentang baterai perlu dikaitkan dengan keselamatan listrik, pendinginan, fire risk, dan prosedur darurat.

Amonia merupakan kandidat bahan bakar bebas karbon. Zhou et al. (2024) menunjukkan bahwa desain mesin amonia dengan pilot diesel dapat meningkatkan efisiensi dan menurunkan emisi gas rumah kaca, tetapi masih menghadapi tantangan emisi NH₃ dan N₂O. Amonia juga bersifat toksik sehingga membutuhkan sistem penyimpanan, ventilasi, deteksi kebocoran, dan prosedur keselamatan yang sangat ketat. Dengan demikian, amonia bukan hanya persoalan bahan bakar baru, tetapi juga perubahan besar dalam manajemen keselamatan kamar mesin.

Penangkapan karbon di atas kapal dapat menjadi solusi transisi bagi kapal yang tetap menggunakan mesin konvensional. Jiang et al. (2025) meneliti absorbent fase-ubah untuk onboard CO₂ capture dan menemukan bahwa kombinasi tertentu dapat menurunkan kebutuhan energi regenerasi dibandingkan MEA. Teknologi ini menjanjikan, tetapi kapal harus menyediakan ruang untuk peralatan, energi untuk proses regenerasi, dan sistem penyimpanan CO₂. Artinya, manfaat pengurangan emisi perlu dibandingkan dengan tambahan beban energi dan biaya operasi.

4.5 Solusi Implementatif dalam Ranah Pendidikan dan Operasi Kapal

Berdasarkan kajian tersebut, solusi efisiensi energi dapat dibagi menjadi tiga tahap. Tahap pertama adalah perbaikan operasi dasar, seperti pengawasan kualitas bahan bakar, pengoperasian purifier, pengendalian temperatur bahan bakar, pembersihan heat exchanger, serta pengaturan beban generator. Tahap kedua adalah digitalisasi pencatatan dan analisis performa, sedangkan tahap ketiga berupa penerapan teknologi baru atau retrofit sesuai kebutuhan kapal.

Dalam bidang pendidikan, materi efisiensi energi perlu diintegrasikan dalam pembelajaran mesin induk, mesin bantu, listrik kapal, dan manajemen perawatan. Peserta didik tidak hanya perlu memahami pengoperasian mesin, tetapi juga mampu membaca data performa, menghitung konsumsi bahan bakar, dan mengevaluasi pengaruh kualitas bahan bakar terhadap efisiensi operasi.

Di tingkat perusahaan pelayaran, efisiensi energi perlu didukung dengan indikator operasional, seperti konsumsi bahan bakar per mil laut, konsumsi generator per kWh, gangguan sistem bahan bakar, dan performa fresh water generator. Indikator tersebut membantu perusahaan menilai efektivitas perbaikan yang dilakukan.

Pada akhirnya, efisiensi energi kapal bergantung pada integrasi antara teknologi, operator, data operasional, dan manajemen yang konsisten. Kedisiplinan dalam pengoperasian dan perawatan harian tetap menjadi faktor utama dalam menciptakan sistem permesinan kapal yang lebih hemat energi, andal, dan rendah emisi.

4.6 Prioritas Solusi dan Tantangan Implementasi

Prioritas efisiensi energi kapal harus ditentukan berdasarkan masalah yang paling sering muncul. Jika konsumsi bahan bakar meningkat, maka pengawasan kualitas bahan bakar dan purifier perlu diperkuat. Jika beban generator tidak stabil, maka pengaturan beban dan peramalan daya harus diperbaiki. Pendekatan ini membuat solusi lebih tepat sasaran dan realistis sesuai kondisi kapal.

Tantangan utama implementasi adalah keterbatasan biaya, ruang, dan kesiapan sumber daya manusia. Kapal lama umumnya lebih cocok menerapkan solusi operasional seperti

perawatan heat exchanger, pengujian bahan bakar, dan pengaturan generator, sedangkan kapal baru dapat memasukkan aspek efisiensi sejak tahap desain. Selain itu, operator perlu memiliki kemampuan membaca data, memahami alarm, dan melakukan analisis performa agar teknologi modern dapat dimanfaatkan secara optimal.

Dalam bidang pendidikan kemaritiman, efisiensi energi perlu diajarkan secara terpadu antara mesin induk, mesin bantu, listrik kapal, bahan bakar, dan keselamatan kerja. Pembelajaran juga perlu menekankan analisis data, penggunaan grafik performa, serta studi kasus nyata agar peserta didik mampu berpikir diagnostik dan menyusun solusi teknis berdasarkan kondisi operasional kapal.

4.8 Implikasi Pendidikan Berbasis Studi Kasus

Efisiensi energi perlu diterjemahkan ke dalam indikator yang mudah dipahami oleh operator, pendidik, dan manajemen kapal. Indikator utama adalah specific fuel oil consumption (SFOC), yaitu jumlah bahan bakar yang digunakan untuk menghasilkan daya tertentu. Kenaikan nilai SFOC dapat menunjukkan penurunan efisiensi pembakaran, kualitas bahan bakar yang buruk, atau kondisi perawatan mesin yang tidak optimal. Selain itu, konsumsi bahan bakar per mil laut juga penting karena menggambarkan hubungan antara penggunaan bahan bakar dengan jarak tempuh kapal sehingga dapat digunakan untuk menilai efisiensi operasi kapal.

Pada sistem kelistrikan, indikator yang digunakan adalah konsumsi bahan bakar generator per kWh dan performa pemanfaatan panas buang, seperti produksi fresh water generator serta kestabilan temperatur kerja. Gangguan sistem bahan bakar, seperti alarm purifier, kenaikan sludge, atau penyumbatan filter, juga dapat menjadi tanda hilangnya efisiensi energi. Selain itu, data konsumsi bahan bakar dapat digunakan untuk memperkirakan emisi kapal sehingga efisiensi energi menjadi lebih terukur dan dapat dianalisis lebih lanjut menggunakan data logbook kapal.

4.7 Indikator Kinerja Efisiensi Energi

Model implementasi efisiensi energi dapat dimulai dari audit sederhana melalui pemeriksaan logbook, konsumsi bahan bakar, beban generator, kondisi filter, jam kerja purifier, produksi fresh water generator, dan riwayat perawatan komponen utama. Data operasional tersebut dapat digunakan untuk menemukan titik pemborosan energi. Jika pencatatan belum lengkap, langkah awal yang perlu dilakukan adalah memperbaiki sistem dokumentasi agar data lebih akurat dan dapat dianalisis.

Tahap berikutnya adalah menentukan tindakan korektif yang memberikan dampak cepat, seperti pemeriksaan kualitas bahan bakar, penyetelan purifier, pembersihan filter dan heat exchanger, serta pengaturan operasi generator. Tindakan ini relatif sederhana, tetapi memerlukan ketelitian dan konsistensi. Setelah perbaikan dilakukan, data operasional perlu dibandingkan dengan kondisi sebelumnya agar manfaat efisiensi dapat terlihat secara objektif.

Tahap lanjutan adalah integrasi teknologi, seperti penggunaan sensor tambahan, fuel flowmeter, sistem pemantauan jarak jauh, dan energy management system. Kapal dengan pola operasi tertentu juga dapat mulai mengevaluasi sistem hibrida atau baterai. Namun, setiap kapal memiliki karakteristik berbeda sehingga solusi efisiensi energi harus disesuaikan dengan kebutuhan operasional kapal agar lebih realistis dan mudah diterapkan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil kajian, efisiensi energi sistem permesinan pada kapal laut modern dipengaruhi oleh banyak faktor yang saling berkaitan. Faktor tersebut meliputi kualitas bahan bakar, kinerja fuel oil purifier, kondisi mesin induk, performa mesin bantu, pemanfaatan panas buang, pengaturan beban listrik, data operasional, serta kesiapan teknologi rendah karbon. Tantangan utama terletak pada kontaminasi bahan bakar, penurunan performa

komponen, perubahan kondisi laut, beban listrik yang fluktuatif, keterbatasan ruang kapal, risiko keselamatan bahan bakar alternatif, dan kompetensi operator kamar mesin.

Solusi yang dapat diterapkan adalah pemeliharaan berbasis kondisi, pengawasan kualitas bahan bakar, optimalisasi purifier, pembersihan dan perawatan heat exchanger, pemanfaatan panas buang, peramalan kebutuhan daya listrik, penerapan energy management system, serta transisi bertahap menuju teknologi hibrida, baterai, amonia, dan penangkapan karbon. Bagi kapal yang masih menggunakan sistem konvensional, langkah paling realistis adalah memperkuat disiplin operasi, pencatatan data, dan analisis performa harian. Bagi kapal baru, desain sistem energi perlu disiapkan agar mampu menerima teknologi rendah karbon dengan tetap memperhatikan keselamatan.

Saran yang dapat diberikan adalah agar perusahaan pelayaran menyusun indikator efisiensi energi yang terukur dan melaksanakan audit energi secara berkala. Operator kamar mesin perlu dilatih menggunakan data operasional untuk mendeteksi inefisiensi sejak dini. Pada ranah pendidikan, pembelajaran efisiensi energi perlu diarahkan pada studi kasus, pembacaan data performa, dan penyusunan rekomendasi teknis. Penelitian berikutnya disarankan menggunakan data operasional kapal nyata untuk menghitung potensi penghematan bahan bakar dari kombinasi perawatan, digitalisasi, dan penerapan teknologi energi baru.

DAFTAR PUSTAKA

- Bai, J., Yan, Y., & Bai, X. (2025). A comprehensive review of ship emission reduction technologies for sustainable maritime transport. *Frontiers in Marine Science*, 12, 1576661. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1576661>
- Bumbungan, J. L., Nalle, C. Y. A., Filemon, F., & Sumarta, R. P. (2025). Evaluasi teknis dan manajerial sistem fresh water generator sebagai penunjang operasional kapal niaga. *JPB: Jurnal Patria Bahari*, 5(1), 1-6. <https://doi.org/10.54017/jpb.v5i1.180>
- Fazzini, P., La Tona, G., Diez, M., & Di Piazza, M. C. (2025). Enhanced forecasting of shipboard electrical power demand using multivariate input and variational mode decomposition with mode selection. *Scientific Reports*, 15, 23941. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-06153-z>
- Jiang, W., Hu, J., Sun, C., Zhang, S., Wang, W., & Zhang, K. (2025). Low-energy phase-change absorbents for efficient onboard CO₂ capture in the maritime sector. *Scientific Reports*, 15, 40318. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-24126-0>
- Marsudi, S., & Yanti, D. A. W. (2025). Dampak kualitas bahan bakar terhadap performa dan perawatan mesin induk kapal. *Jurnal Aplikasi Pelayaran dan Kepelabuhanan*, 16(1), 154-168. <https://doi.org/10.30649/japk.v16i1.185>
- Moon, H. S., Park, W. Y., Hendrickson, T., Phadke, A., & Popovich, N. (2025). Exploring the cost and emissions impacts, feasibility and scalability of battery electric ships. *Nature Energy*, 10, 41-54. <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01655-y>
- Mushtaq, R., Iqbal, M., Khaliq, A., & Iqbal, J. (2025). Optimal design of a hybrid ship energy management system under various sea conditions using Model Predictive Control. *PLOS ONE*, 20(7), e0326969. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0326969>
- Rifaldi, A., Nalle, C. Y. A., Riyanto, B., Hafita, Y. A., & Sumarta, R. P. (2024). Fuel oil purifier untuk kinerja mesin diesel kapal. *JPB: Jurnal Patria Bahari*, 4(1), 41-44. <https://doi.org/10.54017/jpb.v4i1.120>
- Zhou, X., Li, T., Chen, R., Wei, Y., Wang, X., Wang, N., Li, S., Kuang, M., & Yang, W. (2024). Ammonia marine engine design for enhanced efficiency and reduced greenhouse gas emissions. *Nature Communications*, 15, 2110. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46452-z>

