

Digitalisasi Mesin Kapal untuk Transportasi Maritim Berkelanjutan dengan Efisiensi Energi dan Pengendalian Emisi

Puryadi^{1*}

¹ Teknologi Rekayasa Permesinan Kapal, Politeknik Bumi Akpelni

*e-mail korespondensi: puryadi@akpelni.ac.id

Abstract

The digital transformation of ship engines has emerged as a crucial strategy to improve energy efficiency and reduce emissions within the framework of sustainable maritime transportation. This study investigates three central issues: (1) how digitalization can enhance the energy efficiency of ship engines, (2) the extent to which digital technologies support the control of CO₂ emissions, and (3) which strategies are most effective in integrating digital innovation with environmentally friendly practices in the maritime industry. The primary objective of this research is to analyze the role of ship engine digitalization in performance optimization, fuel consumption reduction, and emission control, and to formulate a conceptual framework that links technological innovation to environmental sustainability. The study adopts a qualitative–conceptual approach, employing thematic analysis grounded in the scientific literature, industrial reports, and empirical studies published over the past five years (2020–2025). Data analysis was conducted through pattern identification, conceptual synthesis, and the integration of findings to generate a holistic understanding of the topic. The results indicate that implementing digitalization—particularly through real-time monitoring, predictive maintenance, and propulsion optimization—can reduce fuel consumption by approximately 12–15% and CO₂ emissions by 10–13%, while simultaneously enhancing operational productivity. These findings highlight the importance of synergy between public policy and digital innovation, offering an integrative conceptual framework to accelerate the realization of sustainable maritime transport.

Keywords: Ship engine digitalization, energy efficiency, emission control, sustainable maritime transport, environmentally friendly innovation

Abstrak

Transformasi digital pada mesin kapal menjadi strategi krusial untuk meningkatkan efisiensi energi dan menurunkan emisi dalam transportasi maritim berkelanjutan. Penelitian ini mengkaji tiga masalah utama: (1) bagaimana digitalisasi dapat meningkatkan efisiensi energi mesin kapal, (2) sejauh mana teknologi digital mendukung pengendalian emisi CO₂, dan (3) strategi apa yang paling efektif untuk mengintegrasikan inovasi digital dengan praktik ramah lingkungan di industri maritim. Tujuan penelitian adalah untuk menganalisis peran digitalisasi mesin kapal dalam optimalisasi performa, pengurangan konsumsi bahan bakar, dan pengendalian emisi, serta merumuskan kerangka konseptual yang menghubungkan inovasi teknologi dengan keberlanjutan lingkungan. Penelitian menggunakan pendekatan kualitatif konseptual dengan analisis tematik, berbasis literatur ilmiah, laporan industri, dan kajian empiris lima tahun terakhir (2020–2025). Analisis dilakukan dengan identifikasi pola, sintesis konsep, dan integrasi temuan untuk menghasilkan pemahaman holistik. Hasil menunjukkan bahwa penerapan digitalisasi melalui monitoring real-time, predictive maintenance, dan optimasi propulsi dapat menurunkan konsumsi bahan bakar 12–15% dan emisi CO₂ 10–13%, sekaligus meningkatkan produktivitas. Penelitian ini menegaskan pentingnya sinergi antara kebijakan publik dan inovasi digital, serta memberikan kontribusi berupa kerangka konseptual integratif bagi percepatan transportasi maritim berkelanjutan.

Kata kunci: Digitalisasi mesin kapal, efisiensi energi, pengendalian emisi, transportasi maritim berkelanjutan, inovasi ramah lingkungan

PENDAHULUAN

Transportasi maritim merupakan tulang punggung utama perdagangan global yang berperan dalam mengangkut lebih dari 80% volume perdagangan internasional (International Maritime Organization [IMO], 2023). Di balik kontribusi ekonominya, sektor ini juga menjadi sumber signifikan emisi gas rumah kaca (GRK), khususnya karbon dioksida (CO₂), serta polutan udara seperti nitrogen oksida (NO_x) dan sulfur oksida (SO_x) yang berdampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia (Raza, 2023). Sebagai upaya mitigasi, IMO telah menetapkan target pengurangan intensitas emisi karbon sebesar 40% pada tahun 2030 dan pencapaian net-zero emission pada tahun 2050. Namun, negara-negara berkembang masih menghadapi hambatan implementatif akibat keterbatasan infrastruktur teknologi, sumber daya manusia, dan regulasi adaptif yang mendukung transisi menuju pelayaran hijau (Xue, 2024).

Berbagai penelitian sebelumnya menyoroti solusi teknis untuk mengurangi emisi sektor maritim melalui efisiensi energi dan substitusi bahan bakar. Misalnya, pemanfaatan biofuel, desain lambung kapal yang efisien, dan optimasi rute pelayaran berbasis data terbukti mampu menekan konsumsi bahan bakar (Chen & Zhang, 2022; Khabir, 2025). Selain itu, perkembangan teknologi digital seperti digital twin, machine learning, dan sistem pemantauan real-time membuka peluang baru untuk meningkatkan kinerja mesin kapal secara adaptif terhadap kondisi operasional (Li et al., 2023). Namun demikian, sebagian besar studi masih bersifat sektoral dan berorientasi teknis, belum mengkaji keterkaitan holistik antara digitalisasi, efisiensi energi, dan kebijakan pengendalian emisi (Rahman & Al-Mutairi, 2024).

Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan kerangka konseptual yang mengintegrasikan digitalisasi mesin kapal dengan pendekatan efisiensi energi dan strategi pengendalian emisi dalam konteks transportasi maritim berkelanjutan di negara berkembang. Integrasi tersebut diharapkan dapat menjembatani kesenjangan antara inovasi teknologi dan kebijakan implementatif, serta memperkuat adaptabilitas industri pelayaran terhadap standar emisi global. Pendekatan ini tidak hanya menekankan aspek teknologis, tetapi juga mencakup dimensi manajerial dan regulatif yang relevan dengan pembangunan industri maritim yang hijau dan berdaya saing (Han & Liu, 2024).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini difokuskan untuk menganalisis peran digitalisasi mesin kapal dalam meningkatkan efisiensi energi dan menurunkan emisi karbon, serta merumuskan strategi implementatif bagi industri pelayaran dalam mengadopsi praktik transportasi maritim berkelanjutan. Secara khusus, penelitian ini menjawab tiga pertanyaan utama, yaitu: (1) bagaimana digitalisasi dapat meningkatkan efisiensi energi mesin kapal, (2) sejauh mana teknologi digital berkontribusi terhadap pengendalian emisi, dan (3) strategi apa yang paling efektif untuk mengintegrasikan inovasi digital dengan praktik ramah lingkungan.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif konseptual dengan desain analisis tematik untuk mengeksplorasi peran digitalisasi dalam meningkatkan efisiensi energi dan pengendalian emisi pada mesin kapal. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan integrasi temuan dari literatur ilmiah, laporan industri, dan kajian empiris, sehingga dapat menghasilkan kerangka konseptual yang komprehensif dan aplikatif.

Populasi penelitian mencakup publikasi akademik, laporan industri maritim, dan dokumen kebijakan yang diterbitkan dalam lima tahun terakhir (2020–2025). Sampel penelitian dipilih secara purposive sampling, dengan kriteria: (1) membahas digitalisasi atau inovasi teknologi pada mesin kapal, (2) menyoroti efisiensi energi atau pengendalian emisi, dan (3) diterbitkan di jurnal internasional bereputasi atau laporan institusi industri terpercaya.

Data dikumpulkan melalui studi literatur sistematis, meliputi jurnal ilmiah, laporan perusahaan pelayaran, dokumen kebijakan pemerintah, dan publikasi organisasi internasional seperti IMO.

Instrumen penelitian berupa lembar ekstraksi data, yang digunakan untuk mencatat informasi penting seperti jenis teknologi, dampak terhadap efisiensi energi, pengurangan emisi, dan implementasi kebijakan.

Analisis dilakukan secara tematik, mencakup identifikasi pola, sintesis konsep, dan integrasi temuan dari berbagai sumber. Validitas dijaga melalui triangulasi sumber, membandingkan temuan dari literatur akademik, laporan industri, dan kajian empiris. Reliabilitas diperkuat melalui verifikasi silang antarpencarian, sehingga interpretasi temuan konsisten dan dapat dipercaya. Pendekatan ini memungkinkan pengembangan kerangka konseptual yang dapat dijadikan panduan strategis bagi perusahaan pelayaran dan pembuat kebijakan dalam menerapkan digitalisasi mesin kapal secara berkelanjutan.

PEMBAHASAN

Analisis literatur dan laporan industri menunjukkan bahwa digitalisasi mesin kapal memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi energi. Untuk rumusan masalah pertama, digitalisasi memungkinkan optimasi performa mesin melalui *monitoring real-time*, *predictive maintenance*, dan pengendalian propulsi berbasis data. Implementasi teknologi ini terbukti menurunkan konsumsi bahan bakar hingga 12–15%, meningkatkan efisiensi operasional, dan mengurangi frekuensi kerusakan mesin, sehingga memberikan manfaat ekonomi sekaligus lingkungan (Raza, 2023; Xue, 2024).

Terkait rumusan masalah kedua, pengendalian emisi CO₂ menjadi lebih terukur melalui integrasi sensor digital dan sistem pemantauan berbasis IoT. Studi menunjukkan bahwa kapal yang mengadopsi sistem digitalisasi mengalami penurunan emisi CO₂ sebesar 10–13% dibanding kapal konvensional. Penggunaan algoritma optimasi rute dan pengaturan load propulsi secara otomatis menjadi kunci dalam mencapai pengurangan emisi yang signifikan (Khabir, 2025).

Untuk rumusan masalah ketiga, strategi integrasi inovasi digital dengan praktik ramah lingkungan melibatkan kombinasi kebijakan publik, pelatihan SDM, dan kolaborasi antar-pemangku kepentingan. Studi kasus di Indonesia dan negara maju menunjukkan bahwa keberhasilan implementasi digitalisasi memerlukan regulasi adaptif, insentif fiskal, dan kerangka standar operasional ramah lingkungan. Kerangka konseptual yang dihasilkan menghubungkan digitalisasi, efisiensi energi, dan pengendalian emisi, menyediakan panduan strategis bagi perusahaan pelayaran dan pembuat kebijakan dalam mempercepat transisi industri maritim berkelanjutan.

Temuan penelitian menunjukkan bahwa digitalisasi mesin kapal secara signifikan meningkatkan efisiensi energi dan menurunkan emisi CO₂, sejalan dengan prinsip ***Innovation Diffusion Theory*** yang menekankan pentingnya adopsi teknologi baru dalam meningkatkan kinerja operasional. Monitoring real-time, predictive maintenance, dan optimasi propulsi berbasis data memungkinkan pengambilan keputusan lebih cepat dan tepat, yang selaras dengan teori manajemen teknologi dan efisiensi energi dalam konteks maritim (Raza, 2023).

Dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, studi ini menekankan integrasi simultan antara digitalisasi mesin, efisiensi energi, dan pengendalian emisi. Sebagian besar literatur terdahulu membahas teknologi digital atau efisiensi energi secara terpisah, atau fokus pada penggunaan bahan bakar alternatif dan optimasi rute (Xue, 2024; Khabir, 2025). Kebaruan penelitian ini terletak pada **pengembangan kerangka konseptual holistik** yang menggabungkan ketiga dimensi tersebut dan memperhatikan faktor kebijakan publik, pelatihan SDM, serta kolaborasi lintas pemangku kepentingan.

Implikasi praktis dari penelitian ini cukup luas. Pertama, perusahaan pelayaran dapat memanfaatkan digitalisasi untuk meningkatkan produktivitas sekaligus mengurangi dampak lingkungan. Kedua, pembuat kebijakan dapat merancang regulasi dan insentif yang lebih tepat

sasaran untuk mendorong adopsi teknologi ramah lingkungan. Kerangka konseptual yang dihasilkan juga dapat menjadi panduan bagi negara berkembang yang menghadapi keterbatasan infrastruktur dan sumber daya.

Meski demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan. Analisis bersifat konseptual dan berbasis literatur, sehingga implementasi empiris di lapangan belum diuji secara langsung. Selain itu, fokus penelitian terbatas pada literatur lima tahun terakhir, sehingga potensi temuan dari studi sebelumnya yang relevan mungkin belum sepenuhnya terakomodasi. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menguji efektivitas kerangka konseptual ini melalui studi empiris, evaluasi kinerja mesin di lapangan, dan analisis cost-benefit implementasi digitalisasi.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa **digitalisasi mesin kapal yang sinergis dengan praktik efisiensi energi dan pengendalian emisi** merupakan strategi kunci dalam mempercepat transisi industri maritim menuju transportasi berkelanjutan, sekaligus menyediakan model konseptual yang dapat direplikasi di berbagai konteks regional

Hasil penelitian menunjukkan bahwa digitalisasi mesin kapal dapat meningkatkan efisiensi energi dan menurunkan emisi CO₂ secara signifikan melalui penerapan monitoring real-time, predictive maintenance, dan optimasi propulsi berbasis data. Temuan ini mendukung konsep *Innovation Diffusion Theory*, yang menekankan pentingnya adopsi teknologi baru untuk meningkatkan kinerja operasional. Implementasi sistem digital pada mesin kapal memungkinkan pengambilan keputusan berbasis data yang lebih cepat dan akurat, sehingga konsumsi bahan bakar berkurang 12–15% dan emisi CO₂ menurun 10–13% (Raza, 2023; Xue, 2024). Jika dibandingkan dengan studi terdahulu, sebagian besar penelitian fokus pada satu aspek, seperti efisiensi energi melalui biofuel atau optimasi rute, atau digitalisasi mesin secara teknis tanpa mengaitkannya dengan keberlanjutan lingkungan (Khabir, 2025). Penelitian ini menonjol karena mengembangkan **kerangka konseptual holistik** yang mengintegrasikan digitalisasi, efisiensi energi, dan pengendalian emisi, sekaligus mempertimbangkan faktor kebijakan publik, pelatihan SDM, dan kolaborasi antar-pemangku kepentingan. Implikasi praktis penelitian ini sangat relevan bagi industri dan pembuat kebijakan. Perusahaan pelayaran dapat meningkatkan produktivitas sekaligus menurunkan dampak lingkungan, sementara regulator dapat merancang insentif dan standar yang mendorong adopsi teknologi ramah lingkungan. Kerangka konseptual ini juga berguna bagi negara berkembang yang menghadapi keterbatasan infrastruktur dan sumber daya, sebagai panduan strategis untuk mengimplementasikan digitalisasi secara efektif. Meski demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan. Analisis bersifat konseptual dan berbasis literatur, sehingga belum diuji secara empiris di lapangan. Selain itu, fokus pada literatur lima tahun terakhir dapat menyebabkan beberapa studi terdahulu yang relevan belum terakomodasi. Penelitian lanjutan disarankan untuk menguji efektivitas kerangka konseptual melalui studi empiris, evaluasi performa mesin di lapangan, dan analisis cost-benefit implementasi digitalisasi. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa **digitalisasi mesin kapal yang terintegrasi dengan efisiensi energi dan pengendalian emisi** menjadi strategi kunci untuk mempercepat transisi industri maritim menuju transportasi berkelanjutan, sekaligus menyediakan model konseptual yang dapat diterapkan secara global maupun lokal.

SIMPULAN

Penelitian ini menegaskan bahwa digitalisasi mesin kapal memiliki peran strategis dalam meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi emisi CO₂ di sektor transportasi maritim. Temuan menunjukkan bahwa penerapan monitoring real-time, predictive maintenance, dan optimasi propulsi berbasis data dapat menurunkan konsumsi bahan bakar hingga 12–15% dan emisi CO₂ sebesar 10–13%, sekaligus meningkatkan produktivitas operasional. Kebaruan penelitian terletak pada pengembangan kerangka konseptual yang mengintegrasikan

digitalisasi, efisiensi energi, dan pengendalian emisi secara holistik, sekaligus mempertimbangkan faktor kebijakan publik dan kolaborasi lintas pemangku kepentingan. Hasil penelitian ini memberikan kontribusi konseptual bagi perusahaan pelayaran dan pembuat kebijakan dalam mempercepat transisi menuju transportasi maritim berkelanjutan.

Rekomendasi Kebijakan Publik

1. **Regulasi Adaptif dan Standar Operasional:** Pemerintah perlu merumuskan regulasi dan standar yang mendorong implementasi digitalisasi mesin kapal, termasuk insentif fiskal bagi perusahaan yang menerapkan teknologi ramah lingkungan.
2. **Dukungan Infrastruktur dan SDM:** Investasi dalam infrastruktur digital dan pelatihan sumber daya manusia diperlukan untuk memastikan adopsi teknologi berjalan efektif dan berkelanjutan.
3. **Kolaborasi Multi-Pemangku Kepentingan:** Perusahaan pelayaran, regulator, dan lembaga penelitian perlu bekerja sama dalam pengembangan, uji coba, dan evaluasi teknologi digital untuk memastikan hasil yang optimal.
4. **Pemantauan dan Evaluasi Berkala:** Sistem monitoring dan evaluasi berbasis data harus diterapkan untuk menilai efektivitas digitalisasi mesin kapal dalam meningkatkan efisiensi energi dan menurunkan emisi secara kontinu.

Dengan strategi ini, digitalisasi mesin kapal dapat menjadi pendorong utama transformasi industri maritim menuju keberlanjutan, sekaligus memberikan model implementatif yang dapat direplikasi di berbagai konteks regional maupun global.

DAFTAR PUSTAKA

- International Maritime Organization. (2023a). *Cutting GHG emissions in shipping: IMO strategy and measures*. <https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/cutting-ghg-emissions.aspx>
- International Maritime Organization. (2023b). *IMO approves net-zero regulations for international shipping*. <https://www.imo.org/en/mediacentre/pressbriefings/pages/imo-approves-netzero-regulations.aspx>
- JawaPos.com. (2023). *Inovasi PIS dalam green shipping turunkan emisi karbon hingga 51.357 ton CO₂*. <https://www.jawapos.com/bisnis/016317407/inovasi-pis-dalam-green-shipping-turunkan-emisi-karbon-hingga-51357-ton-co2>
- Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. (2021). *Strategi nasional transportasi laut ramah lingkungan 2021–2025*. Jakarta: Direktorat Jenderal Perhubungan Laut.
- Khabir, A. (2025). *Green digital shipping corridors: Integrating digitalization and decarbonization in maritime transport*. *Logistics*, 9(2), 68. <https://doi.org/10.3390/logistics9020068>
- Pelindo TPK. (2023). *MSC temukan formula penurunan emisi CO₂ dengan bahan bakar campuran biofuel*. <https://www.pelindotpk.co.id/msc-temukan-formula-penurunan-emisi-co2-dengan-bahan-bakar-campuran-biofuel>
- Raza, S. (2023). *Digital innovation and environmental efficiency in maritime logistics: IoT and AI applications*. *Journal of Maritime Studies*, 12(4), 245–263. <https://doi.org/10.1016/j.jms.2023.04.005>
- United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). (2021). *Review of maritime transport 2021: Trends, policies, and sustainability measures*. Geneva: UNCTAD. <https://unctad.org/webflyer/review-maritime-transport-2021>
- World Economic Forum. (2022). *Shaping the future of global maritime transport: Digitalization and decarbonization insights*. Geneva: WEF. <https://www.weforum.org/reports/shaping-the-future-of-global-maritime-transport>

Xue, L. (2024). *Digital green shipping innovation: Policy and technology integration in maritime sustainability*. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 115, 103755. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.103755>