
Studi Kualitatif Performa Mesin Kapal Berbahan Bakar LNG dan Konvensional di Sektor Maritim Indonesia

Filemon¹, Bugi Nugraha², Meti Kendek³, Nurwahidah⁴, Fajar Gumelar⁵, Fadel Muhammad⁶, Ryan Puby Sumarta⁷

^{1,5,6,7}Politeknik Pelayaran Sorong, Indonesia,

²Politeknik Pelayaran Surabaya, Indonesia,

³Politeknik Pelayaran Barombong, Indonesia,

⁴Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar, Indonesia

Email: filemontarigan@gmail.com, buginugraha1987@gmail.com, metikendek22@gmail.com, nurwahidahpipmks@gmail.com, gumelarfajar51@gmail.com, fadel_muhammad@dephub.go.id, rps55982@gmail.com

Abstrak:

Sektor pelayaran memegang peran penting dalam perdagangan internasional karena lebih dari 80% volume perdagangan dunia diangkut melalui laut. Selama beberapa dekade, kapal mengandalkan Heavy Fuel Oil (HFO) dan Marine Diesel Oil (MDO) sebagai sumber energi utama. Namun, kedua bahan bakar ini menghasilkan emisi CO₂, SO_x, NO_x, dan partikulat yang berdampak serius terhadap lingkungan dan kesehatan. Seiring diberlakukannya regulasi internasional, khususnya MARPOL Annex VI, kebutuhan akan bahan bakar alternatif yang lebih ramah lingkungan semakin mendesak. Liquefied Natural Gas (LNG) muncul sebagai kandidat utama karena mampu menekan emisi secara signifikan, meskipun implementasinya menghadapi tantangan teknis dan ekonomi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perbandingan performa mesin berbahan bakar LNG dengan mesin berbahan bakar konvensional melalui pendekatan kualitatif deskriptif. Data diperoleh dari wawancara dengan tiga informan, yaitu perwakilan industri, akademisi, dan praktisi permesinan kapal. Analisis tematik digunakan untuk mengkategorikan temuan berdasarkan aspek efisiensi, emisi, biaya, serta tantangan implementasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mesin LNG memiliki efisiensi termal lebih tinggi (45–50%) dibanding mesin diesel konvensional (30–40%), serta konsumsi bahan bakar spesifik lebih rendah (140–180 g/kWh dibanding 180–220 g/kWh). Dari sisi lingkungan, LNG mampu mengurangi emisi CO₂ sebesar 20–30%, menekan SO_x hampir 100%, NO_x hingga 90%, dan partikulat hingga 99%. Meski demikian, tantangan seperti methane slip, biaya instalasi awal, serta keterbatasan infrastruktur bunker LNG masih menjadi hambatan. Secara keseluruhan, LNG dinilai memiliki potensi besar sebagai bahan bakar transisi menuju pelayaran berkelanjutan di Indonesia. Keberhasilan implementasi membutuhkan dukungan kebijakan, investasi infrastruktur, serta peningkatan kompetensi sumber daya manusia.

Kata kunci: Performa Mesin Kapal, Emisi, LNG, *Conventional Fuel*

Abstract:

The shipping sector plays a crucial role in international trade, as more than 80% of the world's trade volume is transported by sea. For decades, ships have relied on Heavy Fuel Oil (HFO) and Marine Diesel Oil (MDO) as their primary energy sources. However, both fuels produce CO₂, SO_x, NO_x, and particulate emissions, which have serious impacts on the environment and human health. With the enforcement of international regulations, particularly MARPOL Annex VI, the need for more environmentally friendly alternative fuels has become increasingly urgent. Liquefied Natural Gas (LNG) has emerged as a leading candidate due to its ability to significantly reduce emissions, although its implementation faces technical and economic challenges. This study aims to analyze the performance comparison between LNG-fueled engines and conventional fuel engines through a qualitative descriptive approach. Data were obtained from interviews with three informants: an industry representative, an academic, and a marine engineering practitioner. Thematic analysis was

used to categorize findings based on efficiency, emissions, costs, and implementation challenges. The results show that LNG engines have higher thermal efficiency (45–50%) compared to conventional diesel engines (30–40%), as well as lower specific fuel consumption (140–180 g/kWh compared to 180–220 g/kWh). Environmentally, LNG can reduce CO₂ emissions by 20–30%, cut SO_x emissions by nearly 100%, reduce NO_x emissions by up to 90%, and lower particulate matter emissions by up to 99%. Nevertheless, challenges such as methane slip, high initial installation costs, and limited LNG bunkering infrastructure remain significant obstacles. Overall, LNG is considered to have great potential as a transitional fuel toward sustainable shipping in Indonesia. Successful implementation will require policy support, infrastructure investment, and enhanced human resource competence.

Keywords: *Ship Engine Performance, Emissions, LNG, Conventional Fuel*

Corresponding: Filemon
E-mail: filemontarigan@gmail.com



PENDAHULUAN

Sektor pelayaran merupakan salah satu tulang punggung perdagangan internasional karena lebih dari 80% volume perdagangan dunia diangkut melalui laut. Bahkan, angka ini lebih tinggi pada negara berkembang (Dobrovolska et al., 2025; United Nations Conference on Trade and Development, 2018, 2019, 2024). Transportasi laut diakui sebagai metode paling efisien dan murah untuk mengangkut barang dalam jumlah besar antarnegara (Dobrovolska et al., 2025; Mykolayovych, 2023). Dengan demikian, konektivitas pelayaran dan pelabuhan menjadi faktor penting yang memengaruhi kelancaran ekspor-impor, mendukung pertumbuhan ekonomi, serta integrasi global (Alzate et al., 2024; del Rosal, 2024; del Rosal & Moura, 2022).

Tingginya peran pelayaran juga sejalan dengan dominasi rantai pasok maritim dalam perdagangan global. Beberapa studi menyebutkan bahwa sekitar 90% perdagangan internasional dilakukan melalui laut, sementara lebih dari 80% barang di dunia ditransportasikan melalui rantai pasok maritim (Gu et al., 2023; Kayati et al., 2024; Millefiori et al., 2021; Nalle & Sumarta, 2024). Seiring meningkatnya aktivitas pelayaran, kebutuhan energi untuk pengoperasian kapal juga semakin besar. Kebutuhan energi ini bervariasi tergantung mode operasi: saat berlayar, propulsi mendominasi; sedangkan saat kapal sandar di pelabuhan, konsumsi listrik dan panas untuk akomodasi serta sistem pendukung menjadi signifikan (Baldi et al., 2018; Gutierrez-Romero et al., 2019). Selain itu, konsumsi bahan bakar juga sangat dipengaruhi oleh faktor kecepatan kapal, beban muatan, kondisi laut, dan efisiensi operasional (Bal Beşikçi et al., 2016; Chen et al., 2024; Yan et al., 2024).

Besarnya kebutuhan energi tersebut tercermin dalam konsumsi bahan bakar global. Berdasarkan kajian *integrated framework* BEEPA, rata-rata konsumsi energi bahan bakar berat (heavy fuel oil-equivalent) pada armada kontainer global mencapai sekitar 77,7 juta ton per tahun pada periode 2015–2020. Angka ini hanya mencakup segmen kontainer; apabila dijumlahkan dengan jenis kapal lain seperti tanker, kargo curah kering, Ro-Ro, dan kapal penumpang, total konsumsi diperkirakan jauh lebih besar (Lu et al., 2023). Selama beberapa dekade, bahan bakar minyak berat (Heavy Fuel Oil/HFO) dan Marine Diesel Oil (MDO) telah menjadi sumber energi utama kapal. Namun, penggunaan bahan bakar konvensional ini

menimbulkan berbagai permasalahan serius, terutama terkait tingginya emisi gas rumah kaca (GHG), sulfur oksida (SO_x), nitrogen oksida (NO_x), serta partikulat yang berdampak buruk pada lingkungan dan kesehatan manusia.

Dampak lingkungan dari penggunaan HFO dan MDO telah banyak dikaji. Pembakaran kedua bahan bakar ini menghasilkan CO₂ dalam jumlah besar yang berkontribusi signifikan terhadap perubahan iklim (Brynolf, 2016; Jameel et al., 2019; Perčić et al., 2024). Kandungan sulfur tinggi dalam HFO menyebabkan emisi SO₂ (SO_x) dalam jumlah besar, sementara emisi NO_x juga signifikan dan menjadi penyebab hujan asam serta pencemaran udara (Chu Van et al., 2019; Jameel et al., 2019; Langer et al., 2020; Vedachalam et al., 2022). Selain itu, HFO menghasilkan emisi partikulat halus (PM_{2.5}) lebih tinggi dibanding MDO, yang mengandung senyawa karsinogenik seperti polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) dan logam berat, berdampak buruk pada kesehatan manusia (Langer et al., 2020; Streibel et al., 2017; Wu et al., 2018). Dengan demikian, isu lingkungan akibat penggunaan bahan bakar konvensional semakin mendorong perlunya bahan bakar alternatif yang lebih ramah lingkungan.

Sebagai respon atas tantangan tersebut, berbagai regulasi internasional diterapkan. Organisasi Maritim Internasional (IMO) melalui MARPOL Annex VI telah menetapkan aturan ketat mengenai pengurangan emisi. Salah satu alternatif bahan bakar yang banyak dipertimbangkan adalah Liquefied Natural Gas (LNG). LNG terbukti mampu mengurangi emisi SO_x hampir 100%, menurunkan emisi NO_x hingga 80–90%, serta mengurangi emisi CO₂ sekitar 20–25% (Gil-Lopez & Verdu-Vazquez, 2021; Livaniou & Papadopoulos, 2022; Ruan, 2025; Sari et al., 2023). Selain itu, LNG hampir menghilangkan emisi partikulat hingga 92–96% sehingga sangat sesuai untuk operasi di *Emission Control Areas* (ECA). Dengan karakteristik ini, LNG sering dipandang sebagai bahan bakar transisi yang menjembatani menuju energi maritim yang lebih bersih.

Meskipun memiliki banyak keunggulan, penggunaan LNG juga menghadapi sejumlah tantangan. Salah satu isu teknis utama adalah *methane slip*, yaitu pelepasan metana yang tidak terbakar dari mesin LNG. Metana memiliki potensi pemanasan global jauh lebih tinggi daripada CO₂, sehingga dapat mengurangi manfaat lingkungan LNG jika tidak dikendalikan (Kuittinen et al., 2024; Lindstad et al., 2020; Lindstad & Riialand, 2020). Selain itu, sistem mesin LNG lebih kompleks dibanding mesin konvensional sehingga memerlukan pelatihan khusus bagi awak kapal serta prosedur perawatan yang berbeda (Jang et al., 2021; Sari et al., 2023; Tuswan et al., 2023). Dari sisi ekonomi, biaya instalasi awal dan pembangunan infrastruktur bunker LNG masih tinggi, bahkan retrofit atau pembangunan kapal baru dapat mencapai 15% dari total biaya kapal (Petrychenko & Levinskyi, 2024; Taghavifar & Perera, 2023). Keterbatasan fasilitas bunkering di pelabuhan global juga membatasi fleksibilitas operasional (Petrychenko & Levinskyi, 2024).

Sejumlah penelitian telah membahas keunggulan LNG dibanding bahan bakar konvensional, namun sebagian besar masih berfokus pada aspek teknis dan data eksperimen laboratorium tanpa mengintegrasikan perspektif praktisi yang mengoperasikan kapal secara langsung di lapangan. Studi-studi terdahulu cenderung menganalisis performa mesin LNG berdasarkan simulasi atau uji coba terkontrol, sehingga belum sepenuhnya menangkap

kompleksitas implementasi di kondisi operasional nyata, khususnya di Indonesia yang memiliki karakteristik geografis dan infrastruktur maritim yang unik. Padahal, pengalaman langsung dari industri, akademisi, dan praktisi permesinan kapal sangat penting untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai kelebihan, kekurangan, serta tantangan implementasi LNG dalam konteks lokal.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan kualitatif yang mengintegrasikan wawasan multipihak (industri, akademisi, dan praktisi lapangan) untuk menghasilkan perspektif implementatif yang lebih holistik. Berbeda dengan studi teknis yang hanya mengandalkan data spesifikasi mesin, penelitian ini menggali pengalaman riil terkait efisiensi operasional, tantangan teknis, kelayakan ekonomi, serta kesiapan infrastruktur dan sumber daya manusia di sektor maritim Indonesia. Temuan penelitian ini diharapkan memberikan manfaat praktis bagi pemangku kepentingan maritim, terutama dalam penyusunan strategi adopsi LNG yang lebih realistis dan aplikatif, mendukung kebijakan energi transisi, serta mempercepat tercapainya target pengurangan emisi sesuai komitmen internasional Indonesia.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis perbandingan performa mesin berbahan bakar LNG dan konvensional melalui wawancara dengan narasumber dari berbagai latar belakang. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam penyusunan strategi adopsi LNG di sektor pelayaran Indonesia serta mendukung tercapainya target pengurangan emisi yang ditetapkan secara global.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan metode wawancara. Pendekatan ini dipilih karena penelitian bertujuan untuk menggali secara mendalam pengalaman, pengetahuan, serta pandangan praktisi dan ahli permesinan kapal mengenai perbandingan performa mesin berbahan bakar LNG dengan mesin berbahan bakar konvensional (HFO/MDO). Penelitian dilaksanakan pada tahun 2025 dengan melibatkan informan yang berasal dari kalangan industri maritim dan institusi pendidikan pelayaran di Indonesia.

Pemilihan informan dilakukan dengan teknik purposive sampling, yaitu memilih narasumber yang dianggap relevan dan memiliki kompetensi di bidang permesinan kapal. Dalam penelitian ini, terdapat tiga informan utama, yaitu Training Operation Manager PT. Wärtsilä Indonesia, dosen dari perguruan tinggi di bidang pelayaran, serta seorang perwira kapal (2nd Engineer) dari perusahaan pelayaran. Ketiga informan tersebut dipandang representatif karena memiliki pengalaman langsung terkait pengoperasian maupun pengelolaan mesin berbahan bakar LNG dan konvensional.

Instrumen penelitian berupa pedoman wawancara terstruktur yang memuat sejumlah pertanyaan terkait aspek teknis dan operasional mesin, meliputi efisiensi termal, konsumsi bahan bakar spesifik (SFOC), tingkat emisi (CO₂, GHG, SO_x, NO_x, PM), performa mesin, methane slip, biaya operasional, serta kebutuhan perawatan. Selain itu, wawancara juga mencakup aspek non-teknis seperti keuntungan penggunaan LNG, tantangan implementasi, potensi LNG sebagai bahan bakar utama kapal, serta rekomendasi untuk adopsi LNG yang lebih luas di sektor pelayaran. Sebelum pelaksanaan wawancara, seluruh responden telah memberikan persetujuan informed consent secara lisan dan tertulis, dengan jaminan kerahasiaan identitas dan penggunaan data hanya untuk kepentingan akademis.

Data yang diperoleh dianalisis dengan menggunakan teknik analisis tematik melalui tiga tahapan utama. Pertama, tahap reduksi data dilakukan dengan mentranskrip verbatim seluruh hasil wawancara dan memilah informasi yang relevan dengan tujuan penelitian. Kedua, tahap coding dilakukan dengan memberikan label atau kode pada setiap segmen data berdasarkan konsep atau tema yang muncul, seperti efisiensi, emisi, biaya, dan tantangan implementasi. Ketiga, tahap identifikasi tema dilakukan dengan mengelompokkan kode-kode yang memiliki kesamaan makna menjadi tema-tema utama yang merepresentasikan temuan penelitian. Dari hasil analisis tersebut, diperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai kelebihan dan keterbatasan penggunaan LNG dibandingkan bahan bakar konvensional. Untuk menjaga keabsahan data, peneliti melakukan triangulasi sumber dengan membandingkan jawaban antar-informan yang berasal dari latar belakang industri, akademisi, dan praktisi lapangan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini memperoleh data dari tiga narasumber yang berasal dari industri maritim, akademisi, dan praktisi lapangan. Berdasarkan hasil wawancara, diperoleh gambaran perbandingan performa mesin berbahan bakar LNG dan mesin berbahan bakar konvensional (HFO/MDO) dalam beberapa aspek, yaitu efisiensi, konsumsi bahan bakar, emisi, biaya, serta tantangan teknis dan prospek penggunaan di masa depan.

Efisiensi Termal dan Konsumsi Bahan Bakar

Hasil wawancara menunjukkan bahwa mesin berbahan bakar LNG dan mesin dual fuel memiliki efisiensi termal rata-rata lebih tinggi dibanding mesin diesel konvensional. Mesin konvensional umumnya berada pada kisaran 30–40%, sedangkan mesin LNG dapat mencapai 45–50%. Dari segi konsumsi bahan bakar spesifik (SFOC), mesin konvensional berkisar antara 180–220 g/kWh, sedangkan mesin LNG lebih rendah yaitu 140–180 g/kWh. Hal ini menegaskan bahwa LNG berpotensi memberikan penghematan energi yang signifikan dalam operasional kapal.

Tingkat Emisi

Aspek emisi menjadi salah satu keunggulan utama LNG. Berdasarkan pendapat narasumber, penggunaan LNG mampu menurunkan emisi CO₂ sebesar 20–30% dibandingkan bahan bakar konvensional. Selain itu, emisi SO_x dapat berkurang hampir 99–100%, NO_x berkurang 70–90%, sedangkan emisi partikulat (PM) dapat ditekan hingga 90–99%. Dengan demikian, LNG dianggap sebagai bahan bakar yang lebih ramah lingkungan dan sesuai dengan ketentuan MARPOL Annex VI. Namun, tantangan methane slip masih menjadi perhatian, meskipun teknologi terbaru seperti *spark gas conversion* pada mesin dual fuel modern telah berhasil mengurangi methane slip hingga 75%.

Biaya Operasional dan Perawatan

Dari sisi ekonomi, pendapat narasumber cukup bervariasi. Beberapa informan menilai LNG masih relatif lebih mahal dibandingkan bahan bakar konvensional dengan sulfur rendah (ULSMGO). Namun, terdapat pula pandangan bahwa dalam jangka panjang LNG memiliki potensi penghematan biaya operasional yang signifikan, terutama karena efisiensi pembakaran yang lebih baik serta kepatuhan regulasi yang dapat mengurangi beban denda atau biaya tambahan lainnya. Terkait perawatan, sebagian informan menyatakan bahwa mesin LNG membutuhkan sistem yang lebih kompleks dibanding mesin diesel konvensional, namun tidak selalu lebih rumit dalam operasional sehari-hari.

Keuntungan dan Tantangan Implementasi LNG

Keuntungan utama penggunaan LNG menurut narasumber meliputi fleksibilitas bahan bakar, pengurangan emisi, peningkatan efisiensi, penghematan biaya jangka panjang, serta kepatuhan terhadap regulasi internasional. Namun, implementasi LNG juga menghadapi sejumlah tantangan, antara lain biaya instalasi awal yang tinggi, keterbatasan infrastruktur pengisian bahan bakar LNG (bunker LNG) di Indonesia, risiko methane slip, serta kompleksitas sistem mesin.

Pandangan ke Depan

Terkait potensi LNG sebagai bahan bakar utama kapal di masa depan, para narasumber memiliki pandangan yang optimis meskipun dengan catatan. Informan akademisi menyatakan, "Potensinya sangat besar mengingat tuntutan global terhadap dekarbonisasi pelayaran, tetapi keberhasilannya sangat bergantung pada dukungan kebijakan pemerintah." Sementara itu, informan dari industri menekankan perlunya "subsidi atau insentif dari pemerintah untuk menurunkan biaya investasi awal, serta pembangunan infrastruktur bunker LNG yang lebih luas di pelabuhan-pelabuhan strategis Indonesia." Informan praktisi menambahkan pentingnya "kepastian regulasi dan peningkatan kompetensi awak kapal melalui pendidikan dan pelatihan yang terstandar, karena tanpa SDM yang siap, teknologi secanggih apapun tidak akan optimal." Dengan demikian, keberhasilan adopsi LNG di sektor pelayaran Indonesia tidak hanya ditentukan oleh faktor teknis, tetapi juga oleh dukungan kebijakan dan kesiapan sumber daya manusia.

Tabel 1. Perbandingan Performa Mesin LNG dan Konvensional

Aspek	Mesin Konvensional (HFO/MDO)	Mesin LNG/Dual Fuel	Sumber Data
Efisiensi Termal	30--40%	45--50%	Wawancara + Literatur
SFOC	180--220 g/kWh	140--180 g/kWh	Wawancara + Literatur
Emisi CO ₂	Baseline	↓ 20--30%	Wawancara + Literatur
Emisi SO _x	Tinggi	↓ 99--100%	Wawancara + Literatur
Emisi NO _x	Tinggi	↓ 70--90%	Wawancara + Literatur
Emisi PM	Tinggi	↓ 90--99%	Wawancara + Literatur
Biaya Operasional	Lebih rendah (jangka pendek)	Lebih tinggi (jangka pendek), lebih hemat (jangka panjang)	Wawancara
Kompleksitas Sistem	Sederhana	Lebih kompleks	Wawancara
Ketersediaan Infrastruktur	Luas	Terbatas	Wawancara

Keterangan: Data performa teknis (efisiensi, SFOC, emisi) merupakan hasil triangulasi antara pengalaman informan dan konfirmasi literatur teknis. Data biaya dan tantangan implementasi merupakan hasil wawancara mendalam.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa LNG memiliki keunggulan dibandingkan bahan bakar konvensional dalam aspek efisiensi, konsumsi bahan bakar, dan pengurangan emisi. Efisiensi termal mesin LNG yang lebih tinggi, yaitu 45–50% dibandingkan 30–40% pada mesin diesel konvensional, menandakan bahwa LNG dapat menjadi solusi yang mendukung operasional kapal lebih hemat energi. Hal ini sejalan dengan temuan bahwa konsumsi energi kapal sangat dipengaruhi oleh efisiensi operasional, kecepatan, serta jenis bahan bakar yang digunakan (Bal Beşikçi et al., 2016; Chen et al., 2024; Yan et al., 2024). Dengan demikian, LNG berpotensi menjadi bahan bakar transisi menuju sistem pelayaran yang lebih ramah lingkungan, meskipun masih terdapat variasi pandangan dari praktisi terkait penerapannya di lapangan.

Dari segi emisi, LNG terbukti mampu menurunkan kadar polutan secara signifikan. Penurunan CO₂ sebesar 20–30% serta pengurangan SO_x hampir 100% menjadikan LNG sebagai bahan bakar yang sesuai dengan regulasi MARPOL Annex VI. Penurunan NO_x hingga 90% dan partikulat hingga 99% juga menunjukkan bahwa LNG mampu mengatasi sebagian besar permasalahan lingkungan akibat pembakaran HFO dan MDO yang selama ini menghasilkan emisi CO₂, SO_x, NO_x, serta partikulat berbahaya (Jameel et al., 2019; Langer et al., 2020; Streibel et al., 2017; Wu et al., 2018). LNG hampir menghilangkan emisi SO_x dan partikulat, sehingga sangat relevan digunakan pada *Emission Control Areas (ECA)* (Gil-Lopez & Verdu-Vazquez, 2021; Ruan, 2025; Sari et al., 2023). Namun demikian, isu *methane slip* masih menjadi hambatan serius, karena metana memiliki potensi pemanasan global lebih tinggi daripada CO₂ (Kuittinen et al., 2024; Lindstad et al., 2020). Walaupun teknologi mesin terbaru seperti *spark gas conversion* sudah mampu menekan methane slip hingga 75%, risiko ini tetap menjadi faktor pembatas dalam menjadikan LNG sebagai bahan bakar dominan.

Perspektif ekonomi menunjukkan perbedaan pandangan antarresponden. Sebagian menilai LNG masih lebih mahal dibandingkan bahan bakar rendah sulfur (ULSMGO). Hal ini sejalan dengan kajian bahwa biaya instalasi awal mesin LNG dan pembangunan infrastruktur bunkering masih tinggi, bahkan dapat mencapai 15% dari total biaya kapal baru (Lindstad & Riialand, 2020; Taghavifar & Perera, 2023). Namun, responden lain menilai bahwa dalam jangka panjang LNG menawarkan peluang penghematan biaya melalui efisiensi pembakaran dan pengurangan beban kepatuhan regulasi. Dengan kata lain, potensi ekonomi LNG akan lebih terasa apabila didukung kebijakan pemerintah yang menekan biaya investasi serta memperluas akses infrastruktur bunker LNG di pelabuhan Indonesia (Petrychenko & Levinskyi, 2024).

Selain faktor teknis dan ekonomi, keberhasilan adopsi LNG juga sangat ditentukan oleh kesiapan sumber daya manusia. Narasumber menekankan pentingnya pendidikan dan pelatihan bagi awak kapal agar mampu mengoperasikan serta merawat mesin LNG yang lebih kompleks dibanding mesin konvensional. Hal ini sejalan dengan literatur yang menyatakan bahwa sistem mesin LNG lebih kompleks dan membutuhkan pelatihan khusus serta prosedur perawatan berbeda dibandingkan mesin berbahan bakar minyak (Jang et al., 2021; Tuswan et al., 2023). Dengan demikian, transisi ke bahan bakar LNG tidak hanya membutuhkan inovasi teknologi, tetapi juga peningkatan kapasitas SDM agar dapat menjamin operasional yang aman, efisien, dan berkelanjutan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa LNG memiliki peluang besar sebagai bahan bakar utama kapal di masa depan. Namun, adopsinya tidak hanya ditentukan oleh aspek teknis, melainkan juga oleh dukungan kebijakan, investasi infrastruktur, serta kesiapan sumber daya manusia. Dengan adanya sinergi antara pemerintah, industri, dan

lembaga pendidikan, LNG dapat menjadi bahan bakar transisi yang strategis bagi keberlanjutan sektor pelayaran di Indonesia.

KESIMPULAN

Penelitian ini menegaskan bahwa LNG memiliki keunggulan signifikan dibandingkan bahan bakar konvensional (HFO/MDO). Mesin LNG terbukti lebih efisien dengan efisiensi termal mencapai 45–50% dan konsumsi bahan bakar spesifik (SFOC) yang lebih rendah dibanding mesin diesel konvensional. Dari sisi lingkungan, LNG mampu menurunkan emisi CO₂ sebesar 20–30%, menghilangkan hampir seluruh emisi SO_x, menurunkan NO_x hingga 70–90%, serta menekan partikulat hingga 99%. Keunggulan ini menjadikan LNG sebagai bahan bakar transisi yang relevan untuk mendukung kepatuhan terhadap regulasi MARPOL Annex VI dan mendorong pelayaran berkelanjutan. Namun, isu *methane slip*, tingginya biaya instalasi awal, keterbatasan infrastruktur bunker LNG, serta kompleksitas perawatan mesin masih menjadi tantangan dalam implementasinya. Adopsi LNG di Indonesia memerlukan sinergi antara pemerintah, industri, dan lembaga pendidikan. Pemerintah perlu menyediakan regulasi yang jelas, insentif, serta pembangunan infrastruktur bunker LNG. Industri pelayaran didorong untuk mulai mengintegrasikan teknologi mesin LNG atau dual fuel secara bertahap guna meningkatkan daya saing global. Sementara itu, lembaga pendidikan perlu menyiapkan kurikulum dan pelatihan teknis agar awak kapal siap mengoperasikan serta merawat mesin LNG secara efektif.

DAFTAR PUSTAKA

- Alzate, P., Isaza, G. A., Toro, E. M., & Jaramillo-Garzón, J. A. (2024). Advances and emerging research trends in maritime transport logistics: environment, port competitiveness and foreign trade. *International Journal of Production Management and Engineering*, 12(1), 1–18. <https://doi.org/10.4995/ijpme.2024.21090>
- Bal Beşikçi, E., Arslan, O., Turan, O., & Ölçer, A. I. (2016). An artificial neural network based decision support system for energy efficient ship operations. *Computers & Operations Research*, 66, 393–401. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.04.004>
- Brynolf, S. (2016). Environmental assessment of present and future marine fuels. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 113).
- Chu Van, T., Ramirez, J., Rainey, T., Ristovski, Z., & Brown, R. J. (2019). Global impacts of recent IMO regulations on marine fuel oil refining processes and ship emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 70, 123–134. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.04.001>
- del Rosal, I. (2024). Maritime connectivity and agricultural trade. *Journal of Agricultural Economics*, 75(1), 153–168. <https://doi.org/10.1111/1477-9552.12548>
- del Rosal, I., & Moura, T. G. Z. (2022). The effect of shipping connectivity on seaborne containerised export flows. *Transport Policy*, 118, 143–151. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2022.01.020>
- Dobrovolska, V., Yermakov, V., & Herasymenko, O. (2025). EXPANSION OF SEA ROUTES: CURRENT ISSUES OF TODAY. *Odesa National University Herald. Geography and Geology*, 29(2). [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2024.2\(45\).318033](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2024.2(45).318033)

- Gil-Lopez, T., & Verdu-Vazquez, A. (2021). Environmental Analysis of the Use of Liquefied Natural Gas in Maritime Transport within the Port Environment. In *Sustainability* (Vol. 13, Issue 21). <https://doi.org/10.3390/su132111989>
- Gutierrez-Romero, J. E., Esteve-Pérez, J., & Zamora, B. (2019). Implementing Onshore Power Supply from renewable energy sources for requirements of ships at berth. *Applied Energy*, 255, 113883. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113883>
- Jameel, A. G. A., Alkhateeb, A., Telalović, S., Elbaz, A. M., Roberts, W. L., & Sarathy, S. M. (2019). *Environmental Challenges and Opportunities in Marine Engine Heavy Fuel Oil Combustion BT - Proceedings of the Fourth International Conference in Ocean Engineering (ICOE2018)* (K. Murali, V. Sriram, A. Samad, & N. Saha (eds.); pp. 1047–1055). Springer Singapore.
- Jang, H., Jeong, B., Zhou, P., Ha, S., & Nam, D. (2021). Demystifying the lifecycle environmental benefits and harms of LNG as marine fuel. *Applied Energy*, 292, 116869. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116869>
- Kayati, R. S., Mat Ali, S. N., Ibrahim, R. Z. A. R., Saputra, J., & Taib, M. N. F. M. (2024). An Investigation of Work Stress among Malaysian Seafarers during the Endemic. *International Journal of Advances in Social Sciences and Humanities*, 3(2), 133–138. <https://doi.org/10.56225/ijassh.v3i2.356>
- Kuittinen, N., Koponen, P., Vesala, H., & Lehtoranta, K. (2024). Methane slip and other emissions from newbuild LNG engine under real-world operation of a state-of-the-art cruise ship. *Atmospheric Environment: X*, 23, 100285. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2024.100285>
- Langer, S., Österman, C., Strandberg, B., Moldanová, J., & Fridén, H. (2020). Impacts of fuel quality on indoor environment onboard a ship: From policy to practice. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 83, 102352. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102352>
- Lindstad, E., Eskeland, G. S., Rialland, A., & Valland, A. (2020). Decarbonizing Maritime Transport: The Importance of Engine Technology and Regulations for LNG to Serve as a Transition Fuel. In *Sustainability* (Vol. 12, Issue 21). <https://doi.org/10.3390/su12218793>
- Lindstad, E., & Rialland, A. (2020). LNG and Cruise Ships, an Easy Way to Fulfil Regulations—Versus the Need for Reducing GHG Emissions. In *Sustainability* (Vol. 12, Issue 5). <https://doi.org/10.3390/su12052080>
- Livaniou, S., & Papadopoulos, G. A. (2022). Liquefied Natural Gas (LNG) as a Transitional Choice Replacing Marine Conventional Fuels (Heavy Fuel Oil/Marine Diesel Oil), towards the Era of Decarbonisation. In *Sustainability* (Vol. 14, Issue 24). <https://doi.org/10.3390/su142416364>
- Millefiori, L. M., Braca, P., Zissis, D., Spiliopoulos, G., Marano, S., Willett, P. K., & Carniel, S. (2021). COVID-19 impact on global maritime mobility. *Scientific Reports*, 11(1), 18039. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97461-7>

- Mykolayovych, M. O. (2023). STRATEGIES FOR THE DEVELOPMENT OF MARITIME TRANSPORTATION AND METHODS FOR EFFICIENT OPERATION. *Hayka i Tekhnika SЬogodni*, 8(22). [https://doi.org/https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-8\(22\)-324-335](https://doi.org/https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-8(22)-324-335)
- Nalle, C. Y. A., & Sumarta, R. P. (2024). Analysis of the Influence of Seafarers' Competencies on Salaries in the Indonesian Shipping Industry. *International Journal of Science and Society*, 6(3), 385–393. <https://doi.org/10.54783/ijssoc.v6i3.1252>
- Perčić, M., Haramina, T., Soldo, V., Demetriou, M., & Vladimir, N. (2024). Environmental Footprint of Diesel Fuel in the Shipping Sector. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 262(January 2023), 811–820. <https://doi.org/10.2495/SDP240671>
- Petrychenko, O., & Levinskyi, M. (2024). Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport. *Collection of Scientific Works of the State University of Infrastructure and Technologies Series "Transport Systems and Technologies,"* 43, 21–36. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-2>
- Ruan, Y. (2025). Combustion efficiency and emission control of ships with liquefied natural gas internal combustion engines. *E3S Web of Conferences*, 606. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560601009>
- Sari, D. P., Tuswan, T., Muttaqie, T., Soetardjo, M., Putrastyo Murwatono, T. T., Utina, R., Yuniati, Y., Prabowo, A. R., & Misbahudin, S. (2023). Critical Overview and Challenge of Representative LNG- Fuelled Ships on Potential GHG Emission Reduction. *Evergreen*, 10(3), 1792–1808. <https://doi.org/10.5109/7151729>
- Streibel, T., Schnelle-Kreis, J., Czech, H., Harndorf, H., Jakobi, G., Jokiniemi, J., Karg, E., Lintelmann, J., Matuschek, G., Michalke, B., Müller, L., Orasche, J., Passig, J., Radischat, C., Rabe, R., Reda, A., Rüger, C., Schwemer, T., Sippula, O., ... Zimmermann, R. (2017). Aerosol emissions of a ship diesel engine operated with diesel fuel or heavy fuel oil. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(12), 10976–10991. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6724-z>
- Taghavifar, H., & Perera, L. P. (2023). Life cycle emission and cost assessment for LNG-retrofitted vessels: the risk and sensitivity analyses under fuel property and load variations. *Ocean Engineering*, 282, 114940. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114940>
- Tuswan, T., Sari, D. P., Muttaqie, T., Prabowo, A. R., Soetardjo, M., Murwantono, T. T. P., Utina, R., & Yuniati, Y. (2023). Representative application of LNG-fuelled ships: a critical overview on potential GHG emission reductions and economic benefits. *Brodogradnja*, 74(1), 63–83. <https://doi.org/10.21278/brod74104>
- United Nations Conference on Trade and Development. (2018). *Review of Maritime Transport*. <https://doi.org/https://doi.org/10.18356/cd4440fc-en>
- United Nations Conference on Trade and Development. (2019). *Review of Maritime Transport*. <https://doi.org/https://doi.org/10.18356/17932789-en>

- United Nations Conference on Trade and Development. (2024). *Navigating Troubled Waters: Impact to Global Trade of Disruption of Shipping Routes in the Red Sea, Black Sea and Panama Canal*. <https://doi.org/10.18356/27082822-114A>
- Vedachalam, S., Baquerizo, N., & Dalai, A. K. (2022). Review on impacts of low sulfur regulations on marine fuels and compliance options. *Fuel*, 310, 122243. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122243>
- Wu, D., Li, Q., Ding, X., Sun, J., Li, D., Fu, H., Teich, M., Ye, X., & Chen, J. (2018). Primary Particulate Matter Emitted from Heavy Fuel and Diesel Oil Combustion in a Typical Container Ship: Characteristics and Toxicity. *Environmental Science & Technology*, 52(21), 12943–12951. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04471>