

ANALISIS TEKNOLOGI PADA KAPAL RAMAH LINGKUNGAN : MENDORONG TRANSPORTASI LAUT BERKELANJUTAN DI ERA MODERN

*(Technology Analysis on Environmental Friends Ships : Promotion Sustainable Maritime
Transportation in the Modern Era)*

Syailla Cordova Ar-rahman¹, Naida Eka Sabila², Qaullam Sari Putri³, Maudyna Puteri
Izzaty⁴, Ma'ruf⁵

Universitas Pendidikan Indonesia, Jl. Dr. Setiabudi No.229, Isola, Kec. Sukasari,
Kota Bandung, Jawa Barat 40154, Indonesia
corresponding e-mail : syaillacordova@upi.edu

ABSTRACT

This study analyzes the application of eco-friendly technologies in the maritime industry to reduce greenhouse gas (GRK) emissions and create sustainable sea transportation. The shipping industry, which accounts for approximately 2.5% of global carbon emissions, faces pressure to adopt innovations such as hybrid propulsion systems, full electrification, alternative fuels (LNG, hydrogen, ammonia), and energy efficiency enhancement technologies like air lubrication. These technologies have demonstrated significant potential in reducing carbon emissions, with LNG reducing CO₂ emissions by up to 25%, while hydrogen and ammonia offer carbon-free solutions. However, key challenges include high costs, limited infrastructure, and complex international regulations. This study employs a literature review method to evaluate the effectiveness and challenges of these technologies, as well as their implications for ship operations and maritime sustainability. The results reveal that the implementation of eco-friendly technologies, such as air lubrication and alternative fuels, effectively reduces fuel consumption and emissions but requires substantial infrastructure investment. To support the decarbonization of the maritime sector, collaboration among industries, governments, and stakeholders is essential to accelerate the development and adoption of these technologies. This study provides strategic insights for the shipping industry to achieve net-zero carbon targets and global sustainable maritime transportation.

Keywords : *Alternative Fuels, Carbon Emissions, Eco-Friendly Technology, Maritime Sustainability, Ship Electrification.*

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis penerapan teknologi ramah lingkungan dalam industri maritim untuk mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) dan menciptakan transportasi laut yang berkelanjutan. Industri pelayaran, yang menyumbang sekitar 2,5% emisi karbon global, menghadapi tekanan untuk mengadopsi inovasi seperti sistem propulsi hibrida, elektrifikasi penuh, bahan bakar alternatif (LNG, hidrogen, amonia), serta teknologi peningkatan efisiensi energi seperti pelumasan udara. Teknologi ini telah menunjukkan potensi besar dalam mengurangi emisi karbon, dengan LNG mengurangi emisi CO₂ hingga 25%, sementara hidrogen dan amonia menawarkan solusi bebas karbon. Namun, tantangan utama meliputi biaya tinggi, keterbatasan infrastruktur, dan regulasi internasional yang kompleks. Studi ini menggunakan metode literatur untuk mengevaluasi efektivitas dan tantangan teknologi tersebut, serta implikasinya terhadap operasional kapal dan keberlanjutan maritim. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan teknologi ramah lingkungan, seperti pelumasan

udara dan bahan bakar alternatif, efektif dalam mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi, tetapi memerlukan investasi infrastruktur yang signifikan. Untuk mendukung dekarbonisasi sektor maritim, diperlukan kolaborasi antara industri, pemerintah, dan pemangku kepentingan guna mempercepat pengembangan dan implementasi teknologi ini. Studi ini memberikan wawasan strategis bagi industri pelayaran dalam mencapai target nol karbon dan keberlanjutan transportasi laut global.

Kata Kunci: Bahan Bakar Alternatif, Emisi Karbon, Teknologi Ramah Lingkungan, Keberlanjutan Maritim, Elektrifikasi Kapal

PENDAHULUAN

Perubahan iklim dan pengurangan kualitas lingkungan merupakan tantangan global yang mendesak, dan sektor maritim masih menjadi sorotan. Industri pelayaran, salah satu moda transportasi utama dalam perdagangan internasional, bertanggung jawab atas emisi gas rumah kaca (GRK) yang signifikan, khususnya dalam bentuk karbon dioksida (CO₂), sulfur oksida (SO_x), dan nitrogen oksida (NO_x) yang berasal dari bahan bakar fosil. Menurut laporan Organisasi Maritim Internasional (IMO), transportasi laut menyumbang sekitar 2,5% dari total emisi karbon dunia. Nilai ini diperkirakan akan terus meningkat kecuali diimbangi dengan langkah-langkah inovatif. Dengan upaya global untuk mencapai target net-zero carbon, industri pelayaran menghadapi tuntutan untuk mengurangi dampak lingkungannya, dan munculnya konsep transportasi ramah lingkungan menggunakan teknologi transportasi ramah lingkungan sebagai solusinya. Mewujudkan transportasi laut yang berkelanjutan. Hal ini sejalan dengan yang disampaikan pada penelitian terdahulu, bahwa IMO membuat aturan yang bernama ISM Code. ISM Code merupakan Kode Manajemen Keselamatan Internasional untuk keselamatan operasi kapal dan pencegahan pencemaran lingkungan laut (Maulani, S. F., dkk. , 2023).

Inovasi kapal ramah lingkungan mencakup berbagai elemen kunci, yaitu menganalisis berbagai teknologi ramah lingkungan yang diterapkan pada kapal, termasuk sistem hibrida, sistem listrik penuh, bahan bakar alternatif seperti LNG dan hidrogen, serta teknologi peningkatan efisiensi energi. dan Penggunaan bahan bakar alternatif seperti LNG (liquefied natural gas), biofuel, hidrogen dan amonia menunjukkan potensi besar dalam mengurangi emisi karbon dan polutan berbahaya lainnya. Misalnya, LNG dapat mengurangi emisi karbon sebesar 20-25% dibandingkan bahan bakar tradisional, sedangkan bahan bakar hidrogen dan biofuel dapat mengurangi emisi karbon lebih banyak lagi karena berasal dari sumber energi yang lebih ramah lingkungan. Teknologi ini telah diperkenalkan

di berbagai negara sebagai langkah strategis untuk mengurangi dampak lingkungan dari industri pelayaran. Namun, tantangan terbesar dalam menggunakan bahan bakar alternatif ini adalah terbatasnya infrastruktur karena pelabuhan di seluruh dunia belum sepenuhnya dilengkapi dengan stasiun pengisian bahan bakar LNG atau hidrogen. Dengan meningkatnya tekanan dari komunitas global untuk mencapai target net-zero carbon, penerapan teknologi ramah lingkungan pada kapal menjadi salah satu solusi penting untuk mengurangi dampak negatif dari industri ini terhadap lingkungan. Teknologi ramah lingkungan yang telah diterapkan meliputi sistem hibrida, sistem listrik penuh, bahan bakar alternatif, serta teknologi yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi energi kapal. Penggunaan sistem hibrida dan sistem listrik penuh, misalnya, dapat secara signifikan mengurangi konsumsi bahan bakar fosil dan mengurangi emisi polutan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas dan tantangan dari berbagai teknologi ramah lingkungan yang diterapkan pada kapal. Analisis ini mencakup sistem hibrida, sistem listrik penuh, penggunaan bahan bakar alternatif seperti LNG dan hidrogen, serta teknologi peningkatan efisiensi energi. Penelitian ini juga akan membahas implikasi implementasi teknologi ini terhadap operasional pelayaran dan tantangan yang dihadapi, seperti biaya, infrastruktur, dan regulasi. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang komprehensif mengenai perkembangan teknologi ramah lingkungan dalam sektor pelayaran serta potensinya dalam mewujudkan industri yang lebih berkelanjutan dan responsif terhadap perubahan iklim.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur untuk mengeksplorasi inovasi teknologi ramah lingkungan yang diterapkan pada kapal, seperti penerapan teknologi ramah lingkungan pada transportasi laut. Penelitian ini menganalisis berbagai teknologi ramah lingkungan yang diterapkan pada kapal, termasuk sistem hibrida, sistem listrik penuh, bahan bakar alternatif seperti LNG dan hidrogen, serta teknologi peningkatan efisiensi energi. Studi literatur memungkinkan peneliti untuk mengumpulkan dan menganalisis data sekunder dari berbagai sumber ilmiah, seperti jurnal, artikel, laporan teknis, dan publikasi dari organisasi internasional yang relevan, termasuk *International Maritime Organization* (IMO) dan lembaga maritim lainnya. Tahap analisis dilakukan dengan meninjau dan membandingkan hasil dari berbagai studi, baik yang berfokus pada inovasi teknologi

maupun dampaknya terhadap pengurangan emisi dan keberlanjutan transportasi laut. Analisis ini mencakup evaluasi efektivitas teknologi dari berbagai studi, serta tantangan dan peluang yang diidentifikasi dalam literatur terkait implementasi teknologi tersebut di kapal.

Pendekatan studi literatur ini memberikan pemahaman mendalam tentang perkembangan teknologi ramah lingkungan di sektor maritim dan memetakan kesenjangan penelitian yang ada. Dengan demikian, studi ini berkontribusi dalam memberikan landasan teoritis untuk pengembangan kebijakan dan implementasi teknologi ramah lingkungan di industri pelayaran di masa depan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Industri maritim merupakan salah satu sektor yang paling berpengaruh dalam perekonomian global, di mana sekitar 90% perdagangan dunia dilakukan melalui jalur laut. Namun, di sisi lain sektor ini juga menyumbang sejumlah besar emisi gas rumah kaca (GRK) dan polutan udara, yang mengakibatkan perubahan iklim dan kualitas udara yang buruk. Menurut data dari *International Maritime Organization* (IMO), transportasi laut menyumbang 2,2% dari total emisi karbondioksida global, dengan tingkat emisi *nitrogen oksida* (NOx), *sulfur oksida* (Sox), dan partikulat yang signifikan. Dengan semakin maraknya isu perubahan iklim dan tuntutan akan praktik berkelanjutan, kebutuhan akan transportasi di sektor maritim menjadi semakin penting di era modern.

Seiring dengan berkembangnya teknologi ramah lingkungan, terdapat upaya yang signifikan dalam industri maritim untuk beralih ke metode yang lebih berkelanjutan. Salah satu pendekatan utama yang diambil adalah penerapan teknologi ramah lingkungan pada transportasi laut, seperti elektrifikasi, bahan bakar alternatif, dan sistem pembersih gas buang. Beberapa teknologi ini harus memenuhi standar operasional kapal yang aman dan lebih efisien, tanpa mengurangi jangkauan atau performa operasional. Dalam konteks ini, diperlukan pendekatan berbasis penilaian risiko yang komprehensif, seperti kerangka *Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis* (FMECA) untuk mengidentifikasi dan mengelola risiko yang terkait dengan penerapan teknologi baru pada kapal.

Penerapan Teknologi Ramah Lingkungan pada Kapal

Pada artikel yang berjudul “Teknologi Perkuatan Struktur Kapal yang Ramah Lingkungan: Perspektif Analisis Risiko” terdapat Teknologi Elektrifikasi yaitu seperti sistem propulsi hibrida dan listrik penuh, diadopsi untuk mengurangi emisi gas buangan

dari kapal. Sistem listrik penuh pada kapal feri, misalnya, terbukti mampu mengurangi emisi CO₂ secara signifikan. Namun, implementasi teknologi ini menghadapi beberapa tantangan, salah satunya kebutuhan kapasitas baterai yang tinggi dan infrastruktur pengisian daya yang mahal. Ada juga teknologi seperti pelumasan udara, pemulihan panas limbah dan panel surya menjadi inovasi yang meningkatkan efisiensi energi pada kapal. Sistem pelumasan udara, menciptakan lapisan gelembung udara di sepanjang lambung kapal untuk mengurangi hambatan dan konsumsi bahan bakar. Menurut laporan dalam jurnal *Sustainability*, emisi NO_x dan SO_x dari kapal-kapal berkontribusi besar terhadap pencemaran udara, yang dapat berdampak langsung pada kesehatan masyarakat serta ekosistem laut dan pesisir yang sensitif (Viana et al., 2014).

Pengaruh Emisi Kapal terhadap Lingkungan

Kontribusi emisi kapal terhadap polusi udara menyumbang 2,2% emisi CO₂ global berbahan bakar fosil di tahun 2019, proporsi signifikan dari polutan udara lainnya seperti NO_x, SO_x, dan partikulat. Ini menempatkan sektor maritim dalam lima besar industri penyumbang polusi udara global, data tersebut diambil dari jurnal berjudul “Pengangkutan Laut Berkelanjutan Transportasi: Status saat ini dan Arah Masa Depan”. Sangat penting adanya kepatuhan terhadap lingkungan, contohnya regulasi seperti batas sulfur IMO 2020 dan Indikator Intensitas Karbon (CII) mendorong kapal-kapal untuk beralih ke teknologi yang lebih ramah lingkungan dan memastikan keberlanjutan operasi maritime yang lebih baik lagi.

Dalam upaya untuk mengurangi dampak negatif dari sektor ini, berbagai regulasi telah diterapkan. Salah satu kebijakan penting adalah IMO 2020 Sulphur Cap, yang mewajibkan kapal-kapal untuk menggunakan bahan bakar dengan kandungan sulfur tidak lebih dari 0,5% m/m (massa per massa), kecuali kapal-kapal yang dilengkapi dengan scrubber atau teknologi pembersih gas buang. Kebijakan ini diperkirakan dapat mengurangi emisi SO_x hingga 77%, yang berdampak signifikan pada penurunan polusi udara dan risiko kesehatan terkait (IMO, 2020).

Selain itu, IMO juga memperkenalkan Indikator Intensitas Karbon (CII) dan Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI), yang mengukur efisiensi energi kapal berdasarkan intensitas karbon yang dihasilkan selama operasi. Melalui penerapan CII dan EEXI, setiap kapal akan dinilai dan diklasifikasikan sesuai dengan tingkat emisi karbonnya, mendorong operator kapal untuk meningkatkan efisiensi energi dan menurunkan emisi karbon.

Peraturan ini menciptakan insentif bagi industri pelayaran untuk beralih ke teknologi yang lebih ramah lingkungan, seperti sistem propulsi hibrida, bahan bakar alternatif, dan teknologi pemulihan panas limbah, demi mencapai target penurunan emisi yang lebih ambisius (Tadros et al., 2023).

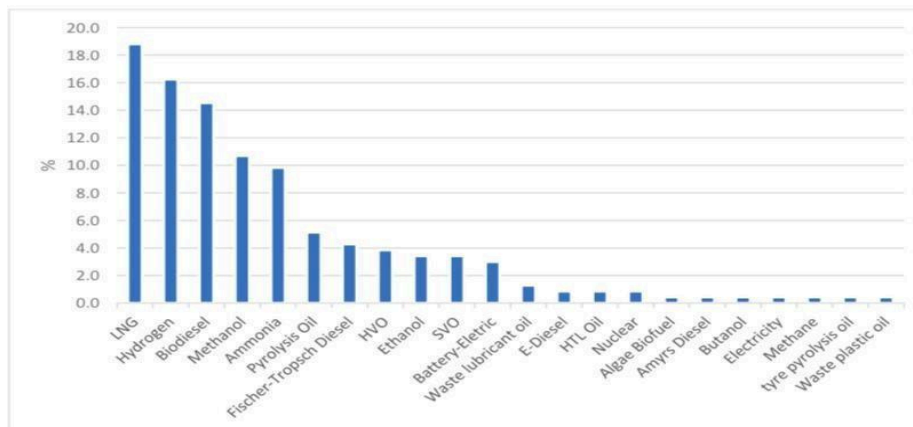
Efektivitas Teknologi Ramah Lingkungan dalam mendorong Keberlanjutan

Penerapan teknologi ramah lingkungan pada transportasi laut telah menunjukkan dampak positif dalam mengurangi emisi gas karbon dan polutan lainnya, terutama melalui air lubrication dan penggunaan scrubber. Teknologi hibrida dan listrik penuh, meskipun memiliki tantangan dalam hal biaya infrastruktur, menawarkan pengurangan emisi yang substansial serta berpotensi mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dalam jangka panjang. Hal ini sangat sesuai dengan tren global menuju elektrifikasi di sektor transportasi, yang juga diterapkan pada sektor maritim. Selain teknologi propulsi, adopsi bahan bakar alternatif seperti *Liquefied Natural Gas* (LNG) dan hidrogen menandai arah baru bagi transportasi laut yang lebih bersih. LNG mampu mengurangi emisi SO_x hingga hampir 100%, sementara hidrogen dan amonia sebagai bahan bakar tanpa emisi karbon menghadirkan potensi yang meskipun menghadapi tantangan logistik terkait penyimpanan dan keamanannya.

Bahan Bakar Alternatif: LNG dan Hidrogen

LNG dianggap sebagai solusi transisi karena sifatnya yang lebih ramah lingkungan dibandingkan bahan bakar minyak konvensional. LNG mampu mengurangi emisi NO_x hingga 85%, SO_x hingga hampir nol, serta emisi CO₂ hingga 20-25% (Vinicius Andrade et al., 2022). Dengan regulasi seperti IMO 2020 yang menetapkan batas maksimum kandungan sulfur dalam bahan bakar, LNG menjadi pilihan yang memenuhi standar lingkungan dan memungkinkan kapal-kapal tetap beroperasi sesuai regulasi internasional tanpa perlu mengubah desain mesin secara drastis. Meskipun demikian, LNG menghadapi tantangan besar dalam aspek penyimpanan dan distribusi, karena bahan bakar ini harus disimpan pada suhu sangat rendah (-162°C) untuk mempertahankan bentuk cairnya. Hal ini memerlukan investasi tinggi pada infrastruktur pelabuhan dan sistem penyimpanan khusus yang saat ini belum tersedia di semua pelabuhan. Di sisi lain, hidrogen dan amonia menawarkan peluang besar sebagai bahan bakar non-karbon yang berpotensi untuk sepenuhnya menghilangkan emisi CO₂ dari operasi kapal. Hidrogen, ketika digunakan dalam sel bahan bakar, menghasilkan energi dengan hanya mengeluarkan uap air sebagai

produk sampingan. Ini menjadikannya bahan bakar yang sangat bersih tanpa emisi karbon atau polutan udara lainnya. Namun, hidrogen sebagai bahan bakar maritim memiliki tantangan terkait penyimpanan dan keselamatan. Hidrogen harus disimpan dalam bentuk cair atau gas bertekanan tinggi, yang memerlukan tangki penyimpanan khusus untuk menjaga stabilitas bahan bakar. Penyimpanan ini memerlukan infrastruktur yang signifikan di pelabuhan serta penanganan yang ketat untuk memastikan keselamatan dalam transportasi (Vinicius Andrade et al., 2022).



Gambar 1. Bahan Bakar Alternatif
Sumber: Web of Science

- Sumbu X menunjukkan jenis-jenis bahan bakar alternatif yang disebutkan dalam penelitian (seperti LNG, Hidrogen, Biodiesel, Metanol, Ammonia, dll.).
- Sumbu Y menunjukkan persentase penyebutan masing-masing bahan bakar alternatif dalam jurnal yang dianalisis.

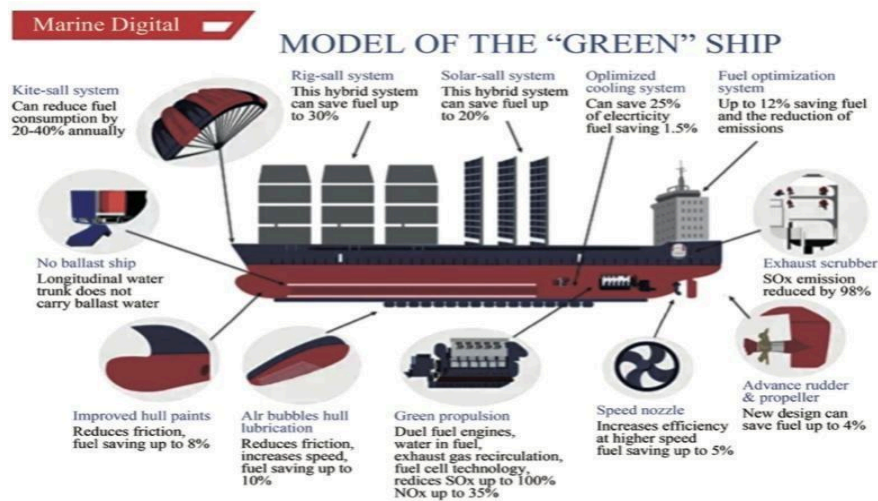
Elektrifikasi pada Kapal: Sistem Hibrida dan Sistem Listrik Penuh

Elektrifikasi di sektor maritim melalui sistem hibrida dan sistem listrik penuh telah menjadi perhatian utama dalam upaya mengurangi emisi gas rumah kaca. Sistem hibrida, yang menggabungkan motor listrik dan mesin berbahan bakar fosil, memberikan fleksibilitas dalam operasi kapal karena dapat beralih antara kedua sumber energi sesuai kebutuhan. Saat kapal berada di pelabuhan atau beroperasi pada kecepatan rendah, motor listrik dapat diaktifkan, sehingga mengurangi konsumsi bahan bakar fosil dan emisi CO₂, NO_x, serta SO_x. Menurut Zhechen Zhang et al. (2024), kapal dengan sistem hibrida mampu mengurangi emisi CO₂ hingga 20% dibandingkan kapal dengan mesin konvensional, terutama karena propulsi listrik mengurangi kebutuhan bahan bakar pada saat operasi yang tidak membutuhkan daya penuh.

Sistem listrik penuh, khususnya diimplementasikan pada kapal feri jarak pendek, memberikan pengurangan emisi yang lebih signifikan karena kapal sepenuhnya ditenagai oleh baterai. Paul Windover et al. (2012) menemukan bahwa kapal feri listrik yang beroperasi dengan energi terbarukan dapat mencapai pengurangan emisi CO₂ hampir 100%. Sistem ini sangat efektif untuk kapal yang beroperasi pada rute-rute pendek di mana kebutuhan daya yang besar selama perjalanan panjang tidak diperlukan. Meski demikian, elektrifikasi penuh menghadapi tantangan besar, terutama terkait kebutuhan daya baterai yang besar untuk menyimpan energi listrik yang cukup. Infrastruktur pengisian daya yang cepat dan efisien juga menjadi prasyarat untuk memastikan kelancaran operasi kapal listrik penuh di pelabuhan. Biaya investasi yang tinggi dalam pemasangan baterai berkapasitas besar dan keterbatasan infrastruktur pengisian daya menjadi kendala utama dalam implementasi skala besar untuk kapal-kapal besar atau jarak jauh (Zhechen Zhang et al., 2024).

Pengurangan Emisi Gas Karbon dan Polutan : Pelumasan Udara (Air Lubrication)

Pelumasan udara adalah salah satu inovasi yang telah terbukti efektif dalam mengurangi hambatan pada lambung kapal. Teknologi ini bekerja dengan menciptakan lapisan gelembung udara di sepanjang lambung kapal, sehingga mengurangi gesekan antara permukaan kapal dan air laut. Dengan menurunkan hambatan hidrodinamis, teknologi pelumasan udara dapat mengurangi konsumsi bahan bakar hingga 10% tergantung pada tipe dan ukuran kapal (S Gökçay et al., 2011). Teknologi ini sangat bermanfaat dalam pengoperasian kapal besar yang cenderung menghadapi hambatan lebih besar di air, sehingga teknologi ini dapat memberikan penghematan bahan bakar yang signifikan. Sistem pelumasan udara untuk menghasilkan lapisan udara di bawah lunas kapal guna mengurangi gesekan antara kapal dan air sehingga mengurangi hambatan kapal (Giernalczyk dan Kaminski, 2021; Yanuar et al., 2018).



Gambar 2. Different solutions towards green ship (Marine Digital GmbH, 2020)

Studi dalam *Ocean Engineering Journal* menunjukkan bahwa implementasi pelumasan udara pada kapal kargo menghasilkan penghematan energi yang signifikan tanpa mempengaruhi kinerja operasional. Penurunan hambatan hidrodinamis tidak hanya mengurangi kebutuhan daya pada mesin, tetapi juga memperpanjang umur peralatan dan mesin kapal karena operasi yang lebih efisien dan suhu yang lebih rendah.

Tantangan dan Solusi Keberlanjutan dalam Industri Maritim

Dalam mengimplementasikan teknologi ramah lingkungan pada kapal menghadapi kendala besar dalam hal biaya, infrastruktur, dan adaptasi teknologi. Seperti sistem propulsi listrik penuh membutuhkan pengembangan infrastruktur, pengisian daya yang cukup luas di pelabuhan, sementara bahan bakar alternatif memerlukan fasilitas penyimpanan yang aman dan tahan lama. Dengan semakin ketatnya peraturan internasional, seperti batas sulfur dari IMO, kapal-kapal diharapkan untuk meningkatkan efisiensi operasional mereka. Oleh karena itu, pengelolaan risiko berbasis kerangka FMECA, yang mempertimbangkan aspek teknis, lingkungan, ekonomi, serta regulasi, menjadi penting untuk mendorong adaptasi teknologi secara berkelanjutan dan mengurangi potensi kegagalan risiko.

Arah Masa Depan Transportasi Laut Berkelanjutan

Untuk mendorong transportasi laut berkelanjutan diperlukan pendekatan terintegrasi, yang mencakup penerapan teknologi baru, kepatuhan terhadap regulasi internasional, dan dukungan berbagai pemangku kepentingan. Strategi dekarbonasi maritim, seperti yang diproyeksikan oleh IMO, perlu terus dikembangkan agar industri maritim mampu mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) hingga 50% pada tahun 2050. Kolaborasi antara industri dan pembuat kebijakan sangat mendukung adopsi teknologi maritim ramah

lingkungan, termasuk penelitian lebih lanjut untuk mengatasi hambatan implementasi, serta investasi dalam infrastruktur yang memungkinkan teknologi baru berkembang dan diterapkan secara luas.

KESIMPULAN

Industri kelautan merupakan sektor penting dalam ekonomi global, dengan 90% transportasi global terjadi melalui atau melewati jalur laut. Namun, industri ini juga berkontribusi dengan signifikan terhadap emisi gas rumah kaca dan pengasaman laut, yang mempengaruhi perubahan iklim dan kualitas laut. Sektor transportasi laut juga berkontribusi terhadap 2,5% emisi karbon global, untuk mencapai target nol karbon, industri kelautan harus berinovasi dan menggunakan teknologi transportasi berkelanjutan. Inovasi dalam transportasi laut meliputi pemanfaatan sumber energi terbarukan seperti LNG, biofuel, hidrogen, dan amonia, yang memiliki potensi signifikan dalam mengurangi emisi karbon dan mengurangi emisi gas. Contohnya seperti konsep transportasi ramah lingkungan dengan menggunakannya teknologi transportasi ramah lingkungan dapat menjadi solusi untuk mewujudkan transportasi laut yang berkelanjutan.

Pengembangan teknologi lingkungan sangat penting untuk pendekatan yang lebih berkelanjutan. Salah satu teknologi tersebut adalah sistem baling-baling hibrida, yang membantu mengurangi emisi gas dari laut. Selain itu, sistem penyimpanan energi, panel surya, dan turbin angin merupakan cara inovatif untuk meningkatkan efisiensi energi. Namun, teknologi ini juga membutuhkan investasi infrastruktur yang signifikan dan pembangkit listrik berkualitas tinggi serta tantangan terbesar dalam menggunakan bahan bakar alternatif adalah terbatasnya infrastruktur di pelabuhan-pelabuhan di seluruh dunia.

Selain itu perubahan iklim dan penurunan kualitas lingkungan menjadi salah satu tantangan global yang mendesak, lagi dan lagi sektor maritim menjadi sorotan utama. Industri pelayaran, sebagai salah satu moda transportasi utama dalam perdagangan internasional, bertanggung jawab atas emisi gas rumah kaca (GRK) yang signifikan, terutama dalam bentuk karbon dioksida (CO₂), sulfur oksida (SO_x), dan nitrogen oksida (NO_x) yang berasal dari bahan bakar fosil.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah turut serta mendukung untuk penyelesaian paper ini. Tanpa bantuan, dukungan, dan saran berharga dari berbagai pihak, pencapaian penelitian ini tidak akan terwujud dengan baik.

Akhir kata, terima kasih kepada semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu namun telah memberikan kontribusi dalam berbagai bentuk. Semoga paper ini dapat memberikan manfaat dan sumbangan positif bagi perkembangan ilmu pengetahuan di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- dos Santos, V. A., Pereira da Silva, P., & Serrano, L. M. V. (2022). The maritime sector and its problematic decarbonization: A systematic review of the contribution of alternative fuels. *Energies*, 15(10), 3571.
- Gokcay, S., & Insel, M. (2011, March). Utilising air lubrication for energy efficient high speed marine vehicles. In *Conference on High Speed Marine Vessels (RINA)* (pp. 2-3).
- Kolios A. Retrofitting Technologies for Eco-Friendly Ship Structures: A Risk Analysis Perspective. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024; 12(4):679.
- Maulani, S. F., Arrafi, M. A., Prabowo, F. G., Putri, L., Abdurroqib, N. H., & Julianto, Z. P. M. (2023). Penerapan International Safety Management (ISM CODE) Pada PT AKR Sea Transport.
- Singh S, Dwivedi A, Pratap S. Sustainable Maritime Freight Transportation: Current Status and Future Directions. *Sustainability*. 2023; 15(8):6996.
- Tadros, M., Ventura, M., & Guedes Soares, C. (2023). Review of the IMO initiatives for ship energy efficiency and their implications. *Journal of Marine Science and Application*, 22(4), 662-680.
- Teuchies, J., Cox, T. J., Van Itterbeeck, K., Meysman, F. J., & Blust, R. (2020). The impact of scrubber discharge on the water quality in estuaries and ports. *Environmental Sciences Europe*, 32, 1-11.
- Viana, M., Hammingh, P., Colette, A., Querol, X., Degraeuwe, B., de Vlieger, I., & Van Aardenne, J. (2014). Impact of maritime transport emissions on coastal air quality

in Europe. *Atmospheric Environment*, 90, 96-105.

Windover, P., Roy, B., & Tario, J. (2012). Electric Propulsion in Short Sea Shipping. *World Electric Vehicle Journal*, 5(2), 288-299.

Zhang, Z., Song, C., Zhang, J., Chen, Z., Liu, M., Aziz, F., ... & Yap, P. S. (2023). Digitalization and innovation in green ports: A review of current issues, contributions and the way forward in promoting sustainable ports and maritime logistics. *Science of the Total Environment*, 169075.