



Green Navy sebagai Strategi Pertahanan Berkelanjutan: Tinjauan Literatur Teknologi Kapal Ramah Lingkungan

Tiwi Gustria Ningsih^{1*}, Nurhazizah Yuslim²

¹⁻² Politeknik Negeri Batam, Indonesia

Alamat: Jl. Ahmad Yani, Tlk. Tering, Kec. Batam Kota, Kota Batam, Kepulauan Riau, Indonesia

Korespondensi penulis: tiwi@polibatam.ac.id*

Abstract. *Indonesia, as the world's largest archipelagic nation, holds a strategic position while simultaneously facing significant challenges in maintaining the sovereignty and security of its maritime territory. Increasingly complex maritime threats, such as illegal fishing, smuggling, and potential geopolitical conflicts, demand a transformation in maritime defense strategies to be more efficient and sustainable. In an era of increasing global awareness of the climate crisis, the maritime sector, including the defense sector, is being encouraged to decarbonize through the implementation of environmentally friendly ship technology. This research uses a literature review approach by examining various findings related to sustainable propulsion technology innovations relevant to the development of Indonesia's maritime defense fleet. The study results show that a hydrogen- and battery-based hybrid propulsion system can reduce carbon emissions by up to 73% and increase energy efficiency by 35%. In addition, wind-assisted propulsion system (WAPS) technology such as Flettner rotors and wing-sails contributes significantly to reducing fuel consumption by up to 30%, while extending ship cruising range without the need for intensive refueling. Meanwhile, the application of Computational Fluid Dynamics (CFD)-based propeller design optimization has been proven to reduce energy consumption by 13.2% and reduce noise levels by up to 15 dB, which greatly supports the needs of stealth operations in military missions. This study concludes that the implementation of environmentally friendly ship technology not only provides benefits in terms of energy efficiency and emission reduction, but also strengthens the operational resilience and strategic competitiveness of the Indonesian naval fleet amidst the dynamics of global maritime security. Thus, the Green Navy concept can be seen as a relevant and urgently needed sustainable defense strategy.*

Keywords: *Defense Strategy, Environmentally Friendly, Green Navy, Ship Technology, Sustainable.*

Abstrak. Indonesia sebagai negara kepulauan terbesar di dunia memiliki posisi strategis sekaligus menghadapi tantangan besar dalam menjaga kedaulatan dan keamanan wilayah lautnya. Ancaman maritim yang semakin kompleks, seperti *illegal fishing*, penyelundupan, hingga potensi konflik geopolitik, menuntut adanya transformasi dalam strategi pertahanan laut yang lebih efisien dan berkelanjutan. Di era meningkatnya kesadaran global terhadap krisis iklim, sektor maritim, termasuk bidang pertahanan, didorong untuk melakukan dekarbonisasi melalui penerapan teknologi kapal ramah lingkungan. Penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur dengan menelaah berbagai temuan terkait inovasi teknologi propulsi berkelanjutan yang relevan bagi pengembangan armada pertahanan laut Indonesia. Hasil studi menunjukkan bahwa sistem propulsi hibrida berbasis hidrogen dan baterai mampu menurunkan emisi karbon hingga 73% serta meningkatkan efisiensi energi sebesar 35%. Selain itu, teknologi *wind-assisted propulsion system* (WAPS) seperti *Flettner rotors* dan *wing-sails* berkontribusi signifikan dalam mengurangi konsumsi bahan bakar hingga 30%, sekaligus memperluas daya jelajah kapal tanpa memerlukan pengisian ulang energi yang intensif. Sementara itu, penerapan optimasi desain propeller berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) terbukti dapat menekan konsumsi energi sebesar 13,2% dan menurunkan tingkat kebisingan hingga 15 dB, yang sangat mendukung kebutuhan operasi *stealth* dalam misi militer. Penelitian ini menyimpulkan bahwa implementasi teknologi kapal ramah lingkungan bukan hanya memberikan manfaat pada aspek efisiensi energi dan pengurangan emisi, tetapi juga memperkuat ketahanan operasional serta daya saing strategis armada laut Indonesia di tengah dinamika keamanan maritim global. Dengan demikian, konsep *Green Navy* dapat dipandang sebagai strategi pertahanan berkelanjutan yang relevan dan mendesak untuk diwujudkan.

Kata kunci: Berkelanjutan, Green Navy, Ramah Lingkungan, Strategi Pertahanan, Teknologi Kapal.

1. LATAR BELAKANG

Indonesia sebagai negara kepulauan terbesar di dunia dengan lebih dari 17.000 pulau dan garis pantai sepanjang 54.716 km memiliki posisi strategis sekaligus tantangan dalam menjaga kedaulatan dan keamanan wilayah lautnya (Siregar & Achraf, 2022). Laut merupakan elemen strategis dalam pertahanan dan kedaulatan suatu negara. Dalam konteks Indonesia sebagai negara kepulauan, keberadaan armada laut yang tangguh dan modern menjadi prasyarat utama dalam menjaga keutuhan wilayah serta menghadapi ancaman yang bersifat asimetris maupun konvensional. Armada laut, khususnya kapal perang, tidak hanya berperan sebagai kekuatan pemukul tetapi juga sebagai garda depan dalam sistem deteksi dan pencegahan dini terhadap potensi pelanggaran wilayah kedaulatan negara.

Potensi ancaman di wilayah laut seperti *illegal fishing*, penyelundupan, perompakan, hingga konflik geopolitik menuntut penguatan strategi pertahanan laut yang adaptif dan berkelanjutan. Di sisi lain, kemajuan teknologi dan tuntutan terhadap keberlanjutan lingkungan memicu perlunya inovasi dalam desain dan konstruksi kapal, terutama dalam aspek efisiensi energi dan pengurangan emisi. Salah satu alternatif strategis yang muncul adalah pemanfaatan energi baru dan terbarukan (EBT), seperti tenaga surya, angin, ombak, dan suara sebagai sistem propulsi dan kelistrikan kapal. Sistem propulsi kapal perang konvensional masih sangat bergantung pada bahan bakar fosil yang berdampak terhadap lingkungan dan keberlanjutan operasional jangka panjang. Penggunaan sistem propulsi berbasis bahan bakar fosil telah lama menjadi standar dalam dunia kemiliteran karena keandalan dan efisiensinya. Akan tetapi, berbagai studi menunjukkan bahwa sektor transportasi laut, turut menyumbang signifikan terhadap emisi karbon global. Tay, Z. Y., & Konovessis, D (2023) mencatat bahwa sektor maritim menyumbang sekitar 3,3% dari emisi CO₂ dalam transportasi global. Hal ini menjadikan upaya dekarbonisasi dalam sektor kemaritiman, termasuk pertahanan laut, sebagai agenda penting yang harus segera direspons melalui pendekatan teknologi yang berkelanjutan. Salah satu langkah dalam mengurangi emisi dari operasional kapal adalah dengan mengimplementasikan dan menggantikan bahan bakar konvensional dengan alternatif yang lebih bersih dan ramah lingkungan (Betty, A., 2022).

Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian mengenai penerapan energi terbarukan pada kapal mulai menunjukkan hasil yang signifikan. Ariyanto, D., & Satoto, S. W (2019) menunjukkan bahwa penggunaan sel surya pada kapal wisata di Kepulauan Riau mampu memenuhi kebutuhan listrik kapal hingga 37,8 kWh dari total kebutuhan 21,695 kWh. Studi serupa oleh Maulana Harry Pratomo (2025) di PT XYZ menyebutkan implementasi sistem

PLTS mampu menghemat hingga Rp463 juta per tahun serta menurunkan emisi CO₂ sebanyak 43,64 ton/tahun. Kehadiran desain kapal berbasis energi terbarukan tidak hanya berdampak pada efisiensi operasional, tetapi juga secara strategis memperkuat sistem pertahanan laut Indonesia melalui mobilisasi kapal yang lebih mandiri, efisien, dan berkelanjutan.

Sejalan dengan tekanan regulasi internasional seperti *International Maritime Organization* (IMO) yang menargetkan penurunan emisi karbon hingga 50% pada tahun 2050 dibandingkan tahun 2008, berbagai inovasi sistem propulsi ramah lingkungan mulai dikembangkan. Teknologi seperti *hybrid* diesel-listrik, penggunaan *fuel cell* berbasis hidrogen atau amonia, serta *wind-assisted propulsion system* (WAPS) seperti *Flettner rotors* dan *wing-sails* telah terbukti mampu mengurangi konsumsi bahan bakar hingga 30% dalam kondisi tertentu (Kolodziejcki, M., & Sosnowski, M, 2025). Walaupun perkembangan ini cukup pesat di sektor komersial, penerapannya pada kapal perang masih sangat terbatas dan belum banyak dikaji secara mendalam, baik dari sisi teknis maupun strategi operasionalnya.

Salah satu contoh penerapan teknologi propulsi berkelanjutan dalam armada militer adalah *Great Green Fleet* milik Angkatan Laut Amerika Serikat yang menggunakan campuran bahan bakar nabati dan fosil untuk mengurangi ketergantungan energi impor sekaligus menurunkan emisi (U.S. Navy, 2016). Selain itu, kapal perang modern seperti Type 45 Destroyer milik Inggris juga telah menerapkan sistem *Integrated Electric Propulsion* (IEP) untuk mendukung kebutuhan *stealth* dan efisiensi bahan bakar. Namun demikian, riset-riset ilmiah mengenai pemanfaatan sistem ini secara holistik, terutama dalam konteks strategi pertahanan laut di kawasan tropis seperti Indonesia, masih sangat minim ditemukan dalam literatur akademik lima tahun terakhir.

Oleh karena itu, diperlukan kajian literatur yang komprehensif untuk mengevaluasi potensi, kelebihan, dan keterbatasan dari penerapan sistem propulsi ramah lingkungan pada kapal perang, serta bagaimana teknologi ini dapat mendukung strategi pertahanan laut yang berkelanjutan bagi Indonesia. Kajian ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah dan pertimbangan strategis dalam perumusan kebijakan pertahanan maritim berbasis teknologi ramah lingkungan di masa depan.

2. KAJIAN TEORITIS

Teknologi dan Efisiensi Energi

Dalam era modern yang ditandai dengan krisis energi global dan tuntutan terhadap keberlanjutan lingkungan, sektor maritim mulai mengadopsi pendekatan baru dalam sistem

propulsi dan kelistrikan kapal. Salah satu fokus utama adalah pengembangan dan penerapan teknologi energi terbarukan guna meningkatkan efisiensi energi serta menurunkan emisi karbon. Teknologi yang saat ini banyak dikembangkan mencakup penggunaan panel surya *monocrystalline* yang memiliki efisiensi tinggi dalam mengubah energi matahari menjadi listrik, turbin angin mini sebagai sumber energi alternatif saat kapal berlayar di perairan terbuka, serta sistem penyimpanan energi berbasis baterai lithium yang memiliki densitas energi tinggi dan efisiensi pengisian yang baik.

Menurut Tay, Z. Y., & Konovessis, D. (2023), sistem propulsi *hybrid* dan *all-electric* berbasis energi terbarukan memiliki potensi besar untuk menggantikan sistem konvensional dalam jangka panjang. Sistem ini mampu menurunkan konsumsi bahan bakar, mengurangi biaya operasional, serta memberikan kontribusi signifikan dalam pengurangan emisi gas rumah kaca. Selain itu, sistem ini juga meningkatkan performa operasional kapal secara keseluruhan, termasuk stabilitas suplai energi di laut, kemudahan pemeliharaan, dan pengurangan kebisingan yang sangat penting dalam aplikasi militer dan kapal *stealth*.

Energi Terbarukan pada Kapal

Implementasi energi terbarukan pada kapal bukan lagi sebatas konsep, melainkan telah diaplikasikan di berbagai jenis kapal mulai dari kapal wisata, nelayan, hingga industri. Gultom, T. T., & Suhelmi, S. (2024) mengembangkan kapal penangkap ikan dengan sistem energi terbarukan ganda yang menggabungkan tenaga surya, angin, dan suara, dan hasilnya menunjukkan pengurangan signifikan dalam konsumsi bahan bakar serta peningkatan efisiensi pelayaran di wilayah pesisir.

Studi lainnya oleh Ariyanto, D., & Satoto, S. W. (2019) menyatakan bahwa penerapan PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) pada kapal wisata di Kepulauan Riau mampu menghasilkan energi hingga 37,8 kWh cukup untuk memenuhi kebutuhan listrik harian kapal sebesar 21,6 kWh. Lebih lanjut, Maulana Harry Pratomo (2025) dalam penelitiannya di sektor industri menyebutkan bahwa implementasi PLTS pada kapal niaga mampu menghemat biaya operasional sebesar Rp463 juta per tahun, serta menurunkan emisi CO₂ sebanyak 43,64 ton/tahun. Hal ini menunjukkan bahwa inovasi berbasis EBT (Energi Baru Terbarukan) dalam dunia perkapalan sudah masuk tahap aplikatif dan efisien secara teknis maupun ekonomis.

Energi Terbarukan dalam Strategi Pertahanan Laut Indonesia

Dalam konteks strategis pertahanan nasional, khususnya pertahanan laut, teknologi energi terbarukan berpotensi besar menjadi bagian integral dari modernisasi alutsista Indonesia. Menurut Siregar, H., & Achnaf, M. (2022), strategi pertahanan laut tidak hanya

bergantung pada kekuatan militer dalam hal jumlah dan senjata, tetapi juga harus mampu beradaptasi terhadap ancaman kontemporer yang bersifat asimetris dan dinamis.

Salah satu kendala dalam operasi kapal militer di wilayah perbatasan adalah keterbatasan suplai bahan bakar, terutama di daerah terpencil. Dalam konteks ini, penggunaan sistem energi terbarukan memberikan keunggulan dalam hal kemandirian operasional dan keberlanjutan logistik. Selain itu, kapal militer berbasis energi terbarukan juga memungkinkan penerapan teknologi *low-noise (stealth)* dan *low-thermal signature*, yang meningkatkan kemampuan deteksi dan keunggulan taktis. Dengan demikian, integrasi teknologi energi terbarukan dalam sistem pertahanan laut Indonesia bukan hanya mencerminkan kemajuan teknologi, tetapi juga memperkuat daya tahan strategis dan kemandirian pertahanan nasional.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan metode studi literatur (*library research*). Pendekatan ini dipilih karena sesuai untuk menggali, menelaah, dan menganalisis informasi dan data yang telah tersedia secara konseptual maupun empiris dalam dokumen-dokumen ilmiah terkait topik pemanfaatan energi terbarukan dalam desain konstruksi kapal, serta relevansinya terhadap strategi pertahanan laut Indonesia.

Penelitian dilakukan melalui pencarian, pengumpulan, dan analisis terhadap literatur yang relevan, baik dari sumber nasional maupun internasional. Sumber-sumber literatur utama meliputi jurnal ilmiah terindeks seperti *Elsevier*, *MDPI*, *ScienceDirect*, serta jurnal nasional terakreditasi seperti *Jurnal Wave*, *Jurnal Teknik Elektro RELE*, dan *Jurnal Teknik*.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Efektivitas Sistem Propulsi Hibrida dalam Menurunkan Emisi dan Konsumsi Energi

Seiring meningkatnya perhatian global terhadap efisiensi energi dan pengurangan emisi karbon di sektor transportasi laut, penggunaan sistem propulsi hibrida berbasis energi terbarukan menjadi salah satu pendekatan yang banyak diteliti dan diuji coba. Salah satu studi oleh Maloberti, L., & Zaccone, R. (2025) yang mengevaluasi performa sistem propulsi hibrida pada kapal *ferry* jarak pendek (*short-range ferry*). Sistem yang dikaji menggabungkan tiga sumber tenaga utama yaitu generator diesel, *fuel-cell* berbasis hidrogen, dan baterai listrik. Berdasarkan hasil simulasi operasional yang dilakukan dalam penelitian tersebut, emisi karbon dioksida (CO₂) dapat dikurangi hingga 73% jika dibandingkan dengan sistem propulsi

konvensional yang sepenuhnya berbasis diesel. Hal ini sangat signifikan, terutama dalam upaya global untuk mencapai target *net-zero emission* pada sektor transportasi laut, sebagaimana diamanatkan dalam regulasi *International Maritime Organization* (IMO) untuk tahun 2050. Penurunan emisi ini juga sejalan dengan temuan dari Tay, Z. Y., & Konovessis, D. (2023), yang menyatakan bahwa sistem *all-electric* dan *hybrid* dalam transportasi laut memberikan dampak langsung terhadap berkurangnya jejak karbon kapal dan menurunkan polusi suara serta termal, yang penting dalam konteks operasi *stealth* kapal militer.

Selain pengurangan emisi, sistem propulsi hibrida juga menunjukkan peningkatan efisiensi energi sebesar 30–35% pada skenario pelayaran tertentu. Peningkatan ini terjadi terutama ketika sistem manajemen energi pada kapal diatur menggunakan metode optimasi berbasis profil pelayaran, yang memperhitungkan kebutuhan daya, kecepatan, dan durasi operasi. Temuan ini memperkuat hasil penelitian oleh Maulana Harry Pratomo (2025) yang menunjukkan bahwa efisiensi PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) pada kapal industri tidak hanya menghemat biaya operasional tetapi juga memperpanjang daya tempuh kapal tanpa harus sering melakukan pengisian ulang bahan bakar. Dalam konteks kapal militer, pengurangan ketergantungan pada logistik bahan bakar sangat krusial, terutama untuk misi jangka panjang di wilayah terpencil atau sensitif secara geopolitik.

Dalam zona perairan yang termasuk wilayah perlindungan lingkungan, sistem ini memungkinkan kapal beroperasi dalam mode *zero-emission* penuh dengan menggunakan tenaga dari baterai dan *fuel-cell* hidrogen. Mode ini tidak hanya menghilangkan emisi lokal tetapi juga memastikan bahwa operasi kapal tidak mengganggu ekosistem laut yang rentan. Dalam strategi *Green Navy* atau armada laut hijau yang telah mulai dirancang oleh sejumlah negara, termasuk potensi implementasi di Indonesia sebagaimana disarankan dalam roadmap nasional transisi energi.

Penerapan sistem ini pada kapal militer patroli jarak pendek sangat menjanjikan. Kapal jenis ini umumnya beroperasi dekat pantai dan sering berada di wilayah yang padat penduduk atau sensitif secara ekologis. Oleh karena itu, keberadaan moda listrik penuh yang tetap menjaga performa manuver kapal dapat menjadi solusi strategis dalam mendukung misi pengawasan dan pencegahan pelanggaran wilayah tanpa meninggalkan jejak emisi atau suara yang dapat terdeteksi oleh pihak lawan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian Maloberti, L., & Zacccone, R. (2025) mendukung gagasan bahwa sistem propulsi hibrida merupakan inovasi penting dalam pengembangan desain kapal modern, tidak hanya untuk sektor sipil, tetapi juga untuk mendukung strategi

pertahanan laut yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan. Sistem ini memperkuat argumentasi bahwa transisi menuju energi terbarukan dalam sektor perkapalan bukan hanya ideal secara lingkungan, tetapi juga realistis secara teknis dan strategis.

Potensi *Wind-Assisted Propulsion System* (WAPS) dalam Misi Laut Jarak Jauh

Dalam upaya transisi menuju sistem propulsi kapal yang ramah lingkungan dan efisien, salah satu teknologi adalah *Wind-Assisted Propulsion System* (WAPS). Teknologi ini memanfaatkan kekuatan angin sebagai sumber daya bantu untuk mendorong kapal, baik secara langsung melalui elemen layar, maupun secara mekanis melalui sistem berbasis efek Magnus seperti *Rotor Flettner*. Dalam konteks efisiensi energi dan strategi pertahanan laut, penerapan WAPS mulai dipertimbangkan untuk meningkatkan daya jelajah, mengurangi ketergantungan bahan bakar, dan menurunkan emisi karbon, terutama pada kapal-kapal yang melakukan operasi laut jarak jauh.

Penelitian sistematis yang dilakukan oleh Kolodziejski, M., & Sosnowski, M. (2025) terhadap lebih dari 40 studi implementasi WAPS, menyimpulkan bahwa teknologi ini memiliki potensi signifikan dalam mendukung keberlanjutan operasi kapal. Hasil review menunjukkan bahwa penghematan bahan bakar yang dihasilkan berkisar antara 8% hingga 30%, tergantung pada kondisi angin, desain sistem, serta rute dan durasi pelayaran. Peningkatan efisiensi ini relevan dengan temuan Tay, Z. Y., & Konovessis, D. (2023) yang menegaskan bahwa sistem propulsi berbasis energi alternatif, baik listrik maupun angin, memberikan dampak langsung dalam mengurangi biaya operasional serta memperluas otonomi energi kapal, terutama untuk misi jangka panjang.

Selain efisiensi bahan bakar, jangkauan pelayaran kapal yang dilengkapi dengan WAPS juga meningkat secara signifikan karena adanya kontribusi tenaga angin dalam sistem propulsi. Artinya, kapal dapat menempuh jarak lebih jauh tanpa harus sering mengisi ulang bahan bakar, yang dalam konteks operasi militer menjadi nilai strategis tersendiri. Dalam wilayah operasi terpencil atau di perairan yang minim dukungan logistik, sistem ini dapat memperkuat *endurance* kapal secara mandiri. Temuan ini sejalan dengan studi Maulana Harry Pratomo (2025) yang menyebutkan pentingnya optimalisasi energi alternatif dalam menunjang keberlanjutan operasi kapal tanpa bergantung pada rantai logistik bahan bakar yang panjang dan rentan gangguan.

Lebih jauh, emisi CO₂ rata-rata dapat dikurangi hingga 25% melalui implementasi WAPS. Pengurangan ini berkontribusi pada pencapaian target emisi IMO serta memperkuat inisiatif nasional menuju *Green Navy*. Tak hanya itu, sistem berbasis angin juga memiliki jejak

akustik dan termal yang sangat rendah, yang sangat penting dalam misi pengintaian atau patroli laut yang membutuhkan kapasitas *stealth* tinggi. Karakteristik ini menjadikan WAPS bukan hanya efisien secara energi, tetapi juga strategis dalam mendukung operasi militer yang membutuhkan kerahasiaan dan keheningan dalam manuvernya.

Meskipun sebagian besar studi implementasi WAPS sejauh ini lebih difokuskan pada kapal niaga dan komersial, karakteristik utama dari teknologi ini yaitu daya tahan operasional tinggi, efisiensi energi, dan kemampuan *stealth* menjadikannya sangat relevan untuk dikaji lebih lanjut dalam konteks militer, khususnya pada kapal patroli jarak jauh, kapal logistik TNI AL, atau kapal pengintai. Sistem seperti *Flettner rotor* dan *kite sail* juga memiliki keunggulan dalam hal fleksibilitas desain, karena dapat diintegrasikan ke kapal eksisting dengan modifikasi struktural minimal.

Dengan mempertimbangkan kondisi geografis Indonesia sebagai negara kepulauan dengan kebutuhan pengawasan laut yang luas, integrasi teknologi WAPS dalam desain kapal militer dapat menjadi salah satu langkah inovatif dan strategis. Dalam jangka panjang, pengembangan kapal berbasis WAPS berpotensi mengurangi beban anggaran bahan bakar, meningkatkan mobilitas kapal di laut lepas, serta mendukung kebijakan transisi energi sektor pertahanan nasional.

Efektivitas Propeller Optimization untuk Efisiensi dan Keheningan Operasi

Selain inovasi pada sumber energi dan sistem propulsi alternatif seperti tenaga surya, angin, dan hidrogen, pengoptimalan sistem mekanik propulsi, khususnya desain *propeller* (balok-balok kapal), menjadi faktor penting dalam mendukung efisiensi dan performa operasional kapal. Dalam konteks pertahanan laut modern, tidak hanya efisiensi energi yang menjadi fokus, tetapi juga kapasitas *stealth* kapal dalam operasi militer yang senyap. Hal ini ditegaskan dalam kajian Bacalja Bašić, B., Krčum, M., & Jurić, Z. (2024) yang mengangkat efektivitas propeller optimization melalui pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dan material *engineering*.

Studi tersebut menunjukkan bahwa pada kapal Ro-Ro (*Roll-on/Roll-off*), yang digunakan sebagai objek uji coba, modifikasi desain propeller mampu menurunkan konsumsi bahan bakar hingga 13,2%. Efisiensi ini diperoleh melalui pengubahan geometri balok-balok agar sesuai dengan profil kecepatan misi kapal, yang dianalisis melalui simulasi CFD. Hasil ini senada dengan temuan Tay, Z. Y., & Konovessis, D. (2023) yang menyatakan bahwa keberhasilan sistem propulsi modern sangat bergantung pada sinergi antara sistem energi dan optimalisasi desain mekanik kapal. Penghematan energi melalui modifikasi desain struktural

seperti *propeller* menjadi strategi tambahan yang dapat dikombinasikan dengan teknologi *hybrid* maupun *all-electric*.

Selain penghematan energi, studi tersebut menyoroti pentingnya material *propeller* terhadap keheningan kapal. Dengan menggunakan material komposit fleksibel (*flexible composite*), *propeller* dapat mengurangi getaran dan kebisingan akustik bawah laut hingga 15 dB. Penurunan tingkat kebisingan ini sangat signifikan dalam konteks kapal militer, terutama bagi kapal patroli dan pengintai yang beroperasi dalam mode *stealth*. Menurut Siregar, H., & Achnaf, M. (2022), strategi pertahanan laut Indonesia menekankan pentingnya modernisasi sistem yang adaptif terhadap ancaman kontemporer, termasuk operasi senyap untuk misi pengintaian dan penindakan pelanggaran wilayah. Keunggulan dalam pengurangan jejak suara juga memperkuat teknologi low-acoustic signature, sebagaimana dibahas dalam penerapan *Wind-Assisted Propulsion System* (WAPS) oleh Kolodziejski, M., & Sosnowski, M. (2025).

Tak hanya itu, desain *propeller* yang disesuaikan dengan kebutuhan operasi terbukti mampu meningkatkan efisiensi propulsi hingga 22% dalam kondisi pelayaran tertentu. Ini berarti bahwa kapal dapat menghasilkan gaya dorong yang lebih besar dengan energi yang sama atau lebih sedikit, sehingga memperpanjang daya jelajah dan mengurangi kebutuhan pengisian bahan bakar. Penggabungan strategi ini dengan sistem energi baru dan terbarukan seperti PLTS (Ariyanto, D., & Satoto, S. W, 2019) atau sistem *hybrid* (Maloberti, L., & Zaccone, R, 2025), memungkinkan pencapaian efisiensi total kapal yang jauh lebih tinggi baik dari sisi energi, operasional, maupun keberlanjutan lingkungan.

Implikasi dari penelitian ini memperluas cakupan bahwa transformasi sektor maritim menuju *Green Navy* tidak hanya mencakup penggantian sumber energi, melainkan juga menyentuh aspek desain mekanik dan material. Dalam konteks strategi pertahanan laut Indonesia, pengoptimalan *propeller* berbasis CFD dan material fleksibel menjadi salah satu pendekatan teknis yang dapat diterapkan pada kapal militer produksi dalam negeri. Integrasi ini sangat relevan untuk kapal taktis berkecepatan tinggi, kapal patroli jarak pendek, maupun kapal logistik dengan kebutuhan operasi yang efisien dan minim jejak suara.

Dengan demikian, pengembangan desain *propeller* yang presisi dan material canggih dapat menjadi tulang punggung teknologi propulsi senyap yang tidak hanya hemat energi, tetapi juga mendukung modernisasi alutsista laut Indonesia yang berorientasi pada efisiensi, adaptabilitas, dan keberlanjutan operasional.

Strategi Integratif untuk Dekarbonisasi dan Ketahanan Laut

Dalam upaya membangun sistem pertahanan laut yang tangguh dan berkelanjutan, tantangan utama yang dihadapi banyak negara saat ini adalah bagaimana melakukan dekarbonisasi sektor maritim tanpa mengorbankan kemampuan tempur dan mobilitas armada laut. Dalam konteks tersebut, Tay, Z. Y., & Konovessis, D. (2023) dalam ulasannya di *Renewable and Sustainable Energy Reviews* menyampaikan bahwa pendekatan parsial dalam mengatasi emisi karbon kapal tidak lagi memadai. Sebaliknya, dibutuhkan strategi integratif yang mencakup pemilihan bahan bakar alternatif, pengembangan teknologi penggerak baru, serta desain sistem kapal yang terintegrasi secara menyeluruh.

Aspek pertama dalam strategi ini adalah pemilihan bahan bakar alternatif, seperti *green hydrogen*, *biofuel*, dan ammonia, yang dapat secara signifikan mengurangi emisi CO₂ dan NO_x dari sistem propulsi kapal. Bahan bakar ini bukan hanya ramah lingkungan, tetapi juga memiliki potensi efisiensi tinggi jika digunakan dengan sistem mesin yang tepat. Sejalan dengan itu, Maloberti, L., & Zacccone, R. (2025) menunjukkan bahwa sistem propulsi berbasis *fuel cell hydrogen* dapat mengurangi emisi karbon hingga 73% pada kapal *ferry* jarak pendek, dengan efisiensi energi meningkat secara signifikan. Jika diterapkan dalam konteks militer, teknologi ini dapat memperkuat kemampuan operasi senyap serta memperluas daya jelajah kapal tanpa ketergantungan logistik bahan bakar konvensional.

Aspek kedua adalah pengembangan teknologi penggerak baru, seperti *hybrid propulsion*, *electric motors*, dan *fuel cells*, yang telah terbukti memberikan performa lebih bersih dan fleksibel. Teknologi ini bukan hanya cocok untuk kapal sipil, tetapi juga sangat relevan untuk kapal patroli militer, kapal logistik, atau kapal pengintai, karena kemampuannya untuk beroperasi dengan jejak suara dan emisi rendah. Temuan ini menguatkan studi Kolodziejcki, M., & Sosnowski, M. (2025) tentang *Wind-Assisted Propulsion Systems (WAPS)* yang juga menawarkan solusi pengurangan emisi serta peningkatan *stealth* kapal.

Aspek terakhir dan tidak kalah penting adalah desain sistem kapal yang terintegrasi, bentuk geometri lambung secara tidak langsung mempengaruhi performa dari kapal (Ariesta, et al., 2022). Penelitian oleh Bacalja Bašić, B., Krčum, M., & Jurić, Z. (2024) menunjukkan bahwa propeller yang dioptimalkan dengan pendekatan *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dapat meningkatkan efisiensi propulsi hingga 22% serta mengurangi kebisingan akustik kapal hingga 15 dB, yang krusial dalam misi militer bawah radar.

Tay, Z. Y., & Konovessis, D. (2023) juga menekankan bahwa keberhasilan dekarbonisasi di sektor pertahanan laut tidak hanya ditentukan oleh teknologi semata, tetapi

harus didukung oleh regulasi nasional, investasi pada infrastruktur pelabuhan (seperti stasiun pengisian bahan bakar alternatif dan energi), serta kesiapan industri pertahanan dalam mengadopsi inovasi ini secara terukur dan aman. Dalam konteks Indonesia, hal ini sejalan dengan kebutuhan untuk merumuskan *roadmap Green Navy*, sebagaimana telah disarankan dalam bagian saran sebelumnya, di mana TNI AL dapat memulai dengan kapal logistik dan kapal patroli sebagai model awal.

Tay, Z. Y., & Konovessis, D. (2023) juga mencatat bahwa penelitian pada kapal perang masih sangat terbatas secara publik, terutama karena faktor kerahasiaan militer dan minimnya keterbukaan data teknis. Oleh sebab itu, kolaborasi antara akademisi, industri, dan institusi militer menjadi penting agar pendekatan dekarbonisasi tidak hanya relevan secara teknologi, tetapi juga aplikatif dalam konteks pertahanan nasional. Secara keseluruhan, strategi integratif yang diusulkan oleh Tay, Z. Y., & Konovessis, D. (2023) menjadi kerangka penting dalam merancang sistem pertahanan laut berbasis energi bersih yang tidak hanya efisien dan berdaya tahan tinggi, tetapi juga sejalan dengan target nasional Indonesia dalam transisi energi dan penguatan kemandirian pertahanan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan kajian literatur dan analisis terhadap berbagai hasil penelitian terbaru mengenai penerapan teknologi energi terbarukan dan optimalisasi sistem propulsi kapal, dapat disimpulkan bahwa strategi penguatan pertahanan laut Indonesia melalui pendekatan keberlanjutan dan efisiensi energi sangat memungkinkan untuk direalisasikan secara bertahap dan terukur. Pertama, sistem propulsi hibrida yang menggabungkan generator diesel, *fuel-cell hidrogen*, dan baterai terbukti mampu menurunkan emisi karbon hingga 73% serta meningkatkan efisiensi energi kapal sebesar 30–35% (Maloberti & Zacccone, 2025). Hal ini menunjukkan bahwa pengembangan kapal militer berbasis hybrid merupakan solusi potensial dalam menciptakan armada laut yang efisien dan ramah lingkungan.

Kedua, teknologi *Wind-Assisted Propulsion Systems* (WAPS) seperti Flettner rotors dan kite sails memberikan penghematan konsumsi bahan bakar hingga 30% dan penurunan emisi CO₂ hingga 25% (Kolodziejewski, M., & Sosnowski, M, 2025). Selain efisiensi, WAPS juga menawarkan keunggulan stealth melalui pengurangan jejak akustik dan termal, menjadikannya relevan untuk kapal patroli dan pengintai yang beroperasi dalam misi taktis jarak jauh. Ketiga, hasil penelitian oleh Bacalja Bašić, B., Krčum, M., & Jurić, Z. (2024) membuktikan bahwa optimasi desain propeller menggunakan pendekatan CFD dan material

komposit fleksibel dapat menurunkan konsumsi bahan bakar sebesar 13,2% dan mengurangi kebisingan bawah laut hingga 15 dB. Desain propulsi yang disesuaikan dengan karakteristik misi menjadi faktor krusial dalam meningkatkan efisiensi dan performa *stealth* kapal. Keempat, strategi dekarbonisasi sistem pertahanan laut tidak cukup hanya dengan mengganti sumber energi, melainkan membutuhkan integrasi menyeluruh antara bahan bakar alternatif, teknologi penggerak baru, dan sistem desain terintegrasi (Tay, Z. Y., & Konovessis, D, 2023). Untuk menjamin keberhasilannya, strategi ini harus didukung oleh regulasi nasional, kesiapan infrastruktur pelabuhan, dan sinergi antara industri pertahanan, akademisi, dan pemerintah.

Dengan mempertimbangkan kondisi geografis Indonesia sebagai negara kepulauan dengan spektrum ancaman laut yang kompleks, maka integrasi teknologi energi terbarukan, optimasi sistem propulsi, serta pendekatan desain berbasis efisiensi menjadi fondasi penting dalam pembangunan *Green Navy* yang adaptif, efisien, dan mendukung visi pertahanan berkelanjutan. Inisiatif ini tidak hanya mendukung upaya pengurangan emisi nasional, tetapi juga memperkuat daya tempur dan daya jelajah armada laut Indonesia secara strategis dan jangka panjang.

DAFTAR REFERENSI

- Ariesta, R. C., Ariani, B., Purnamasari, D., Kusuma, I. R., Yuliadi, M. Z., Yuvenda, D., & Prasetyawati, D. (2022). *Teknologi hijau bidang perkapalan, upaya menuju zero carbon 2050 (Green technology for ship)*. UNISMA Press.
- Ariyanto, D., & Satoto, S. W. (2019). Pemanfaatan energi terbarukan sebagai sumber energi listrik pada desain kapal wisata di Kepulauan Riau. *Wave: Jurnal Ilmiah Teknologi Maritim*, 13(2), 61–68. <https://doi.org/10.29122/jurnalwave.v13i2.3866>
- Bacalja Bašić, B., Krčum, M., & Jurić, Z. (2024). Propeller optimization in marine power systems: Exploring its contribution and correlation with renewable energy solutions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(5), 843. <https://doi.org/10.3390/jmse12050843>
- Betty, A. (2022). *Teknologi hijau bidang perkapalan, upaya menuju zero carbon 2050 (Green technology for ship): Konsep teknologi bahan bakar alternatif dan energi terbarukan di kapal*. UNISMA Press.
- Carlton, J. S. (2019). *Marine propellers and propulsion* (4th ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01586-0>
- Det Norske Veritas. (2021). *Maritime forecast to 2050: Energy transition outlook*. <https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-forecast-to-2050>

- Gultom, T. T., & Suhelmi, S. (2024). Sistem pembumian pada kapal penangkap ikan menggunakan energi terbarukan. *RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi): Jurnal Teknik Elektro*, 6(2), 88–94.
- International Maritime Organization. (2020). *IMO 2020—Cutting sulphur oxide emissions*. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>
- International Maritime Organization. (2020). *Initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships*. <https://www.imo.org>
- Kolodziejewski, M., & Sosnowski, M. (2025). Review of wind-assisted propulsion systems in maritime transport. *Energies*, 18(4), 897. <https://doi.org/10.3390/en18040897>
- Mallouppas, G., & Yfantis, E. A. (2021). Decarbonization in shipping industry: A review of research, technology development, and innovation proposals. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(4), 415. <https://doi.org/10.3390/jmse9040415>
- Maloberti, L., & Zaccone, R. (2025). An environmentally sustainable energy management strategy for marine hybrid propulsion. *Energy*, 316, 134517. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134517>
- Pratomo, M. H. (2025). Implementasi energi baru terbarukan pada armada kapal PT XYZ. *Jurnal Teknik Mesin, Elektro dan Ilmu Komputer*, 5(1), 36–46. <https://doi.org/10.55606/teknik.v5i1.5750>
- Siregar, H., & Achraf, M. (2022). Strategi pertahanan laut Indonesia melalui modernisasi alutsista TNI AL. *Journal of Industrial Engineering & Management Research*, 3(5), 134–142.
- Tay, Z. Y., & Konovessis, D. (2023). Sustainable energy propulsion system for sea transport to achieve United Nations sustainable development goals: A review. *Discover Sustainability*, 4(1), 20. <https://doi.org/10.1007/s43621-023-00132-y>
- U.S. Navy. (2016). *The Great Green Fleet*. <https://www.navy.mil/Press-Office/News-Stories/Article/2259656/the-great-green-fleet-explained/>
- Wróbel, K., Montewka, J., & Kujala, P. (2017). Towards the assessment of potential impact of unmanned vessels on maritime transportation safety. *Reliability Engineering & System Safety*, 165, 155–169. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.03.029>