

Perbandingan Dampak Lingkungan Dan *Carbon Tax* Antara Proses Manufaktur Dan Proses Perbaikan *Propeller* Kapal Empat *Blade* (4B)

Dela Wahyu Nur Isroina¹, Maria Anityasari², Ahmad Rusdiansyah³

^{1,2,3}) Departemen Teknik Sistem dan Industri, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Jl. Raya ITS, Keputih, Kec. Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur 60111

Email: delawahyunurisroina@gmail.com, maria@ie.its.ac.id, arusdian@ie.its.ac.id.

ABSTRAK

Indonesia sebagai negara kepulauan sangat bergantung pada transportasi laut (kapal) dalam mendukung konektivitas dan distribusi logistik nasional. Dalam sistem penggerak kapal, *propeller* merupakan bagian inti karena berperan sebagai pendorong saat kapal beroperasi. Selain itu, *propeller* juga rentan mengalami kerusakan akibat kelelahan material, kavitasi, dan beban operasi jangka panjang. Kerusakan pada *propeller* dapat menurunkan performa kapal, meningkatkan konsumsi bahan bakar, dan berkontribusi terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca. Tanpa strategi pemeliharaan yang tepat, praktik penggantian *propeller* secara berulang berpotensi meningkatkan beban emisi dan biaya karbon, sehingga dapat menghambat pencapaian target dekarbonisasi sektor maritim. Kemudian, penggunaan *propeller* baru menimbulkan dampak lingkungan yang signifikan akibat proses manufaktur yang bersifat intensif energi dan material. Seiring dengan penerapan *carbon pricing* dan meningkatnya tuntutan keberlanjutan, diperlukan strategi pemeliharaan *propeller* yang lebih efisien dan berkelanjutan. Penelitian ini menerapkan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) untuk menilai dan membandingkan dampak lingkungan antara *propeller* baru dan strategi perbaikan (*repair*). Hasil analisis menunjukkan bahwa *propeller* baru menghasilkan dampak lingkungan sebesar 16.962 kg CO₂-eq, sedangkan strategi *repair* mampu memberikan penghematan emisi sebesar 10.000–12.000 kg CO₂-eq, bergantung pada tingkat kerusakan. Jika dikonversikan ke dalam skema *carbon tax* sebesar Rp30 per kg CO₂-eq, strategi *repair* menghasilkan *environmental saving cost* sebesar Rp305.400–Rp375.180 dibandingkan dengan *propeller* baru. Dengan demikian, penelitian ini menunjukkan bahwa *repair propeller* tidak hanya menurunkan emisi, tetapi juga memberikan manfaat ekonomi melalui penghematan biaya karbon, sehingga mendukung pengambilan keputusan yang lebih berkelanjutan di industri perkapalan dan galangan kapal terkait strategi pergantian *propeller* kapal.

Kata kunci: *Propeller* Kapal; *Repair*; *Life Cycle Assessment* (LCA); dan *Carbon tax*.

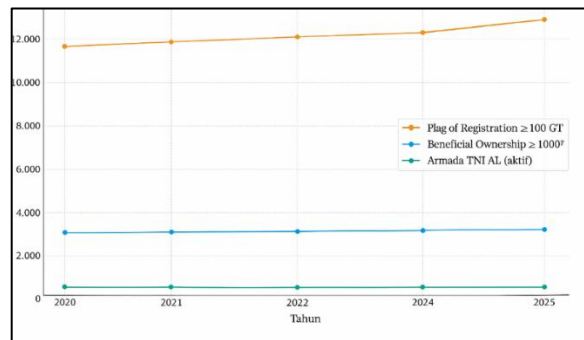
ABSTRACT

Indonesia, as an archipelagic country, relies heavily on maritime transportation (shipping) to support national connectivity and logistics distribution. In ship propulsion systems, the *propeller* is a core component, as it functions as the primary thrust generator during vessel operation. However, *propellers* are also susceptible to damage due to material fatigue, cavitation, and long-term operational loads. Damage to *propellers* can degrade vessel performance, increase fuel consumption, and contribute to higher greenhouse gas emissions. Without an appropriate maintenance strategy, repeated *propeller* replacement practices may lead to increased emission burdens and carbon costs, thereby hindering the achievement of decarbonization targets in the maritime sector. Furthermore, the use of new *propellers* generates significant environmental impacts due to energy- and material-intensive manufacturing processes. Along with the implementation of carbon pricing policies and the growing demand for sustainability, more efficient and environmentally sustainable *propeller* maintenance strategies are required. This study applies a *Life Cycle Assessment* (LCA) approach to evaluate and compare the environmental impacts of new *propellers* and repair strategies. The results indicate that a new *propeller* generates an environmental impact of 16,962 kg CO₂-eq, whereas the repair strategy can achieve emission savings of approximately 10,000–12,000 kg CO₂-eq, depending on the level of damage. When converted into Indonesia's carbon tax scheme of IDR 30 per kg CO₂-eq, the repair strategy provides an environmental saving cost ranging from IDR 305,400 to IDR 375,180 compared to the use of a new *propeller*. Therefore, this study demonstrates that *propeller* repair not only reduces environmental emissions but also delivers economic benefits through carbon cost savings, supporting more sustainable decision-making in the shipbuilding and ship repair industries regarding *propeller* replacement strategies.

Keywords: Ship *Propeller*; *Repair*; *Life Cycle Assessment* (LCA); and *Carbon tax*.

Pendahuluan

Indonesia sebagai negara kepulauan dengan lebih dari 17.504 pulau dan 5,9 juta km² wilayah laut sangat bergantung pada transportasi laut untuk distribusi dan konektivitas nasional [1] [2]. Lebih dari 90% perdagangan internasional juga dilakukan melalui jalur laut, sehingga armada kapal menjadi infrastruktur penting bagi ekonomi nasional dan global [3] [4]. Keberadaan kapal memungkinkan distribusi barang dan mobilitas manusia secara efisien, sehingga mendorong pertumbuhan ekonomi dan pemerataan pembangunan [5]. Dengan adanya arus perdagangan tersebut menjadikan kenaikan jumlah armada laut Indonesia, pada periode 2020 – 2025 berada pada tiga skala digit yang berbeda, yaitu armada berbendera Indonesia yang berada pada kisaran (11.500–13.218 unit) [6], armada dengan beneficial ownership pada kisaran (2.300–2.617 unit) [7], serta armada aktif TNI AL yang berada pada kisaran (310–326 unit) [8].



Gambar 1. Perkembangan Armada Laut Indonesia 2020-2025

Industri perkapalan memiliki peran strategis dalam perekonomian global karena lebih dari 90% perdagangan internasional bergantung pada transportasi laut [3]. Maka kondisi kapal harus berada dalam keadaan operasional yang prima, yang menjadi tanggung jawab penting bagi pemilik maupun pengguna kapal untuk memastikan keselamatan dan kelancaran aktivitas pelayaran [9] [10]. Dalam operasinya, kapal membutuhkan perawatan rutin melalui kegiatan *docking* pada galangan kapal dimana kapal membutuhkan perbaikan untuk menunjang operasionalnya. Adanya proses perbaikan (*repair*) yang dilakukan secara tepat dan berkala tidak hanya memastikan keselamatan pelayaran, tetapi juga memberikan keuntungan secara teknis dan ekonomis bagi pengoperasian kapal [11]. *Repair* berbeda dengan *maintenance*, *repair* adalah rangkaian proses perbaikan yang tidak terjadwal sedangkan *maintenance* adalah proses perbaikan terjadwal [12] [13]. Diantara berbagai komponen kapal, *propeller* merupakan salah satu elemen paling kritis dalam sistem propulsi dan paling sering mengalami kerusakan seperti kavitasi, retak, deformasi bilah, hingga patah akibat kelelahan material serta benturan benda asing [14]. Catatan *Marine Incident Annual Report* menunjukkan bahwa gangguan pada sistem *power-propulsion-steering* merupakan kerusakan teknis tertinggi dan terus meningkat dalam lima tahun terakhir, dimana mempengaruhi kerusakan kapal hingga kecelakaan [15]. Kondisi ini menegaskan bahwa perawatan dan perbaikan *propeller* secara tepat sangat penting untuk menjaga keselamatan dan efisiensi operasional kapal.

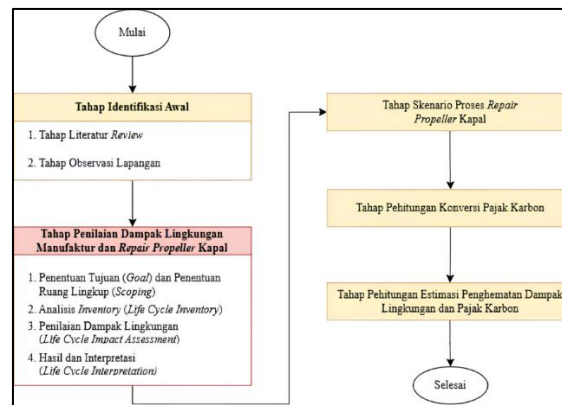
Perbaikan *propeller* sendiri umumnya lebih cepat (3–4 hari) dan lebih ekonomis dibandingkan penggantian *propeller* baru karena dapat memulihkan efisiensi sistem propulsi serta menurunkan konsumsi bahan bakar [16] [17]. Data hasil observasi disalah satu galangan kapal Indonesia, menunjukkan jika terdapat perbaikan *propeller* dengan rata-rata perbaikan 136-unit pertahun dengan kerusakan yang bervariasi, seperti kerusakan *minor*, *medium* ataupun *major*. Dengan banyaknya unit *propeller* yang masuk dan variasi kerusakan akan menimbulkan residual limbah hasil *repair* yang cukup banyak juga. Proses *repair* tetap menghasilkan limbah seperti fouling, oli bekas, residu penetrant test, dan emisi proses yang berpotensi menimbulkan dampak lingkungan [18]. Di sisi lain, regulasi internasional seperti IMO MARPOL Annex VI, EEDI, dan CII kini menuntut kapal untuk menurunkan intensitas emisi CO₂ [19]. Kondisi ini menuntut industri galangan kapal untuk menilai dampak lingkungan dari aktivitas perbaikan dan pergantian komponen kapal, termasuk *propeller*. Hingga saat ini, penelitian komprehensif yang menganalisis dampak lingkungan *propeller* kapal dari perspektif *Life Cycle Assessment* (LCA) masih terbatas sehingga diperlukan penelitian untuk mengevaluasi dampak lingkungan suatu produk atau aktivitas secara menyeluruh sepanjang siklus hidupnya melalui identifikasi input sumber daya dan output berupa emisi serta limbah [20] [21]. Khususnya dalam membandingkan skenario *propeller* baru dengan strategi *repair* pada berbagai tingkat kerusakan. Selain LCA, penelitian ini menerapkan skenario pajak karbon pada industri galangan kapal di Indonesia, yaitu biaya tambahan atas aktivitas penghasil emisi karbon yang bertujuan mendorong peralihan ke ekonomi rendah karbon serta mendukung pencapaian target *net zero emission* tahun 2050. [22] [23]. Oleh karena itu, penelitian ini menjadi urgensi strategis untuk membandingkan dampak lingkungan *propeller* baru dan *propeller* hasil *repair*, serta menilai potensi *environmental saving* dan *environmental saving cost* melalui pendekatan LCA. LCA dilakukan melalui tahapan pendefinisian tujuan dan ruang lingkup, analisis inventori, penilaian dampak, dan interpretasi [24], serta dikaitkan dengan kebijakan pajak karbon (*carbon tax*) sebagai dasar pengambilan keputusan yang lebih berkelanjutan dengan mempertimbangkan aspek lingkungan, ekonomi, dan sosial [25]. Sehingga dapat

memberikan rekomendasi secara berkelanjutan pada industri perkapalan dan galangan kapal dalam pengambilan keputusan pergantian *propeller* kapal.

Meskipun berbagai penelitian telah membahas kinerja *propeller*, strategi *repair*, serta penerapan LCA dalam konteks industri maritim, kajian yang secara eksplisit mengintegrasikan analisis LCA dengan skenario pajak karbon dalam pengambilan keputusan terkait pergantian *propeller* kapal masih sangat terbatas. Sebagian besar studi cenderung memisahkan evaluasi dampak lingkungan dari implikasi kebijakan ekonomi, sehingga belum mampu memberikan gambaran yang komprehensif mengenai keterkaitan antara aspek lingkungan dan ekonomi dalam keputusan penggantian *propeller*. Oleh karena itu, terdapat celah penelitian yang signifikan untuk mengkaji bagaimana integrasi LCA dan skenario pajak karbon dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan yang lebih berkelanjutan dalam pengelolaan *propeller* kapal. Dengan demikian, kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi LCA dan skema pajak karbon untuk mengevaluasi kelayakan lingkungan dan ekonomi antara penggunaan *propeller* baru dan penerapan strategi *repair* pada berbagai tingkat kerusakan.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan LCA untuk mengevaluasi dan membandingkan dampak lingkungan *propeller* kapal, baik *propeller* baru maupun *propeller* hasil perbaikan (*repair*). Alur metodologi penelitian ini disajikan pada Gambar 2. Penelitian diawali dengan pengumpulan data yang terdiri atas data sekunder yang diperoleh dari literatur, laporan teknis industri perkapalan, serta basis data inventori siklus hidup yang relevan. Data yang dikumpulkan mencakup konsumsi material, energi, dan emisi pada setiap tahapan siklus hidup *propeller*, mulai dari tahap ekstraksi bahan baku, proses manufaktur, proses perbaikan (*repair*). Tahap selanjutnya adalah pemrosesan data inventori *Life Cycle Inventory* (LCI) yang meliputi penyesuaian satuan, konsistensi batas sistem, serta normalisasi data agar sesuai dengan unit fungsional yang ditetapkan dalam penelitian. Data inventori yang telah tervalidasi kemudian digunakan sebagai dasar untuk penilaian dampak lingkungan *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) guna mengidentifikasi dan membandingkan kategori dampak lingkungan utama dari masing-masing skenario *propeller* yang dianalisis.



Gambar 2. Flowchart Metodologi Penelitian

Hasil Dan Pembahasan

LCA Repair Propeller Kapal

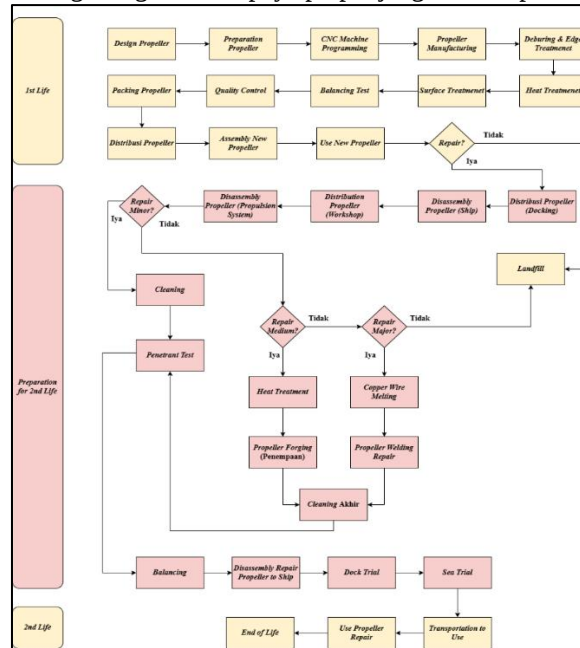
Tahap ini membahas penerapan LCA pada proses *repair propeller* kapal, meliputi penentuan tujuan dan ruang lingkup, inventori, penilaian dampak, serta interpretasi. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi dampak lingkungan sepanjang siklus hidup *repair propeller* dan membandingkannya dengan *propeller* baru, disertai uraian jenis kerusakan, tahapan *repair*, data inventori, dan hasil analisis LCA sebagai dasar penilaian keberlanjutan dalam industri perkapalan.

Penentuan Tujuan dan Ruang Lingkup (Goal and Scope Definition)

Tujuan (*goal*) dari LCA ini adalah menilai dampak lingkungan *propeller* baru dengan strategi *repair propeller* kapal. *Functional unit* yang digunakan adalah satu unit *propeller* kapal, dengan diameter 1,5 m dan berat 800kg. Ruang lingkup (*scope*) penelitian ini menggunakan pendekatan *gate-to-gate*, dengan fokus pada tahap produksi *propeller* baru dan proses *repair*. Perbandingan dilakukan antara satu skenario *propeller* baru dan tiga skenario *repair* yang merepresentasikan tingkat kerusakan berbeda. Tahap penggunaan, termasuk potensi penghematan bahan bakar akibat peningkatan efisiensi operasional, serta tahap akhir siklus hidup (*end-*

of-life), seperti daur ulang material, tidak dimasukkan dalam batasan sistem. Oleh karena itu, hasil analisis yang diperoleh bersifat konservatif, khususnya dalam menilai manfaat lingkungan dan ekonomi dari strategi *repair*, karena potensi pengurangan emisi dan biaya pada fase penggunaan dan akhir umur pakai belum sepenuhnya terakomodasi.

Pada Gambar 3 tersebut menunjukkan alur *Life Cycle Ship Propeller* yang mencakup siklus hidup *propeller* kapal dari *first life*, *preparation for second life*, hingga *second life/end of life*. Proses dimulai dari tahap desain, manufaktur, pengujian, dan penggunaan *propeller* baru, kemudian berlanjut ke evaluasi kondisi saat *propeller* dilepas dari kapal. Jika mengalami kerusakan, *propeller* dapat melalui berbagai skenario kerusakan ringan (*repair minor*), kerusakan sedang (*repair medium*), dan kerusakan berat (*repair major*) yang meliputi pembongkaran, pembersihan, pengujian, pengelasan, hingga penyeimbangan dan uji laut sebelum digunakan kembali. Apabila kerusakan tidak layak diperbaiki, *propeller* dialihkan ke *landfill*, sedangkan *propeller* hasil *repair* dapat kembali digunakan sebagai bagian dari upaya perpanjangan umur pakai dan keberlanjutan.



Gambar 3. Life Cycle Propeller Kapal

Inventory Analysis

Bagian ini menyajikan rangkaian data yang menggambarkan seluruh tahapan proses manufaktur *propeller* kapal, mulai dari persiapan material, pembuatan cetakan, proses pengecoran, pendinginan, hingga tahap *machining* dan *finishing*. Selain data primer yang bersumber dari hasil observasi lapangan, analisis LCA dalam penelitian ini mengandalkan data sekunder yang bersumber dari literatur, basis data LCA, serta asumsi inventori untuk mewakili proses produksi dan *repair propeller*. Sehingga hasil yang diperoleh merepresentasikan kondisi rata-rata dan memvalidasi dengan kondisi operasional data aktual di lapangan.

Data ini digunakan untuk memetakan kebutuhan energi, material, serta emisi yang dihasilkan pada setiap langkah produksi. Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data hasil observasi lapangan dengan *output* satuan yang berbedabeda sesuai dengan permintaan data *input* dari *Software Simapo*. Pada Tabel 1 menjelaskan terkait data manufaktur *propeller* kapal meliputi tahap awal yaitu desain hingga ke proses uji kelayakan atau *balancing test*, dimana *output* yang diamati adalah jumlah kWh yang digunakan perproses.

Tabel 1. Manufaktur *Propeller* Kapal

Proses	Detail Aktivitas	Jumlah	Satuan	Sumber Data
Manufaktur <i>Propeller</i>	Proses Manufaktur	12000	kWh	Industri Manufaktur <i>Propeller</i>
	<i>Deburring & Edge Treatment</i>	25.4		
	<i>Heat Treatment</i>	1504		
	<i>Surface Treatment</i>	25		
	<i>Balancing Test</i>	320.4		
	<i>Quality Control</i>	68		
	<i>Packing Propeller</i>	30		

Tabel 2 menjelaskan terkait data pra-*repair* dimana terdapat *disassembly propeller* dari kapal, distribusi kapal ke bengkel, hingga tahap *disassembly propeller* kapal dari sistem propulsinya. Dalam hal ini satuan yang digunakan berbeda karena pengukuran tidak selalu ber-*output* kWh.

Tabel 2. Pra-*Repair Propeller* Kapal

Proses	Mesin yang Terlibat	Jumlah	Satuan	Sumber Data
<i>Disassembly Propeller</i> dari kapal	Genset 320 kVa	210	Menit	Industri Galangan Kapal
	Crawler Crane	55	Menit	
Distribusi ke bengkel	Forklift 8 ton	15	Menit	
<i>Disassembly</i> dengan <i>shaft</i>	Hoist Crane Manufacture	44	kWh	
	Impact Wrench Elektrik	12		
	Las Gas Asetilin	100	kg	

Tabel 3 menjelaskan terkait data proses perbaikan (*repair*) pada *propeller* kapal, rangkaian proses ini meliputi tiga scenario yait kerusakan ringan (*repair minor*), kerusakan sedang (*repair medium*), dan kerusakan besar (*repair major*). Pada Tabel 3 ini, menyajikan data yang memiliki output berbeda seperti jumlah kWh yang digunakan per-sekali proses, (kg) berupa gas LPG yang digunakan dan, (cm) untuk *welding area*.

Tabel 3. Skenario *Repair Propeller* Kapal

Tabel 3. Rencana Repair Propeller Kapal				
Proses	Detail Aktivitas	Jumlah	Satuan	Sumber Data
Repair Minor	Cleaning	3120	kWh	Industri Galangan Kapal
	Balancing	675		
	Penetrant Test	45		
Repair Medium	Cleaning	3744	kWh	
	Heating Treatment	150	kg	
	Penempaan			
	Cleaning Akhir	312	kWh	
	Balancing	675		
	Penetrant Test	30		
	Cleaning	3744		
	Repair Major	Kawat Tembaga	60	
Heating Treatment		150	kg	
Peleburan Kawat Tembaga				
Penambalan Propeller (Popok)		120	cm	
Welding Area				
Cleaning Akhir				
Balancing		1050	kWh	
Penetrant Test		90		

Tabel 4 menjelaskan terkait data proses pasca *repair* meliputi distribusi ke gaangan kapal, *assembly propeller* pada kapal, hingga serangkaian standar uji (*dock trial and sea trial*). Tabel 4 ini juga memiliki *output* yang berbeda-beda, seperti jumlah menit yang digunakan persekali proses dan ton-kilometer (tkm) dalam tahap pengujian kapal.

Tabel 4. Pasca *Repair Propeller* Kapal

Proses	Detail Aktivitas	Jumlah	Satuan	Sumber Data
Distribusi & <i>Assembly</i>	Perjalanan ke <i>dock</i>	15	Menit	Industri Galangan Kapal
	<i>Assembly Propeller</i> di kapal	55	Menit	
	<i>Assembly Propeller</i> di kapal	3.5	Jam	
<i>Dock Trial</i>	Uji kapal pasca <i>repair</i> di <i>dock</i>	12	tkm	
<i>Sea Trial</i>	Uji kapal pasca <i>dock trial</i>	24	tkm	

Impact Assesmenet

Tahap ini membahas tahapan *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) yang bertujuan untuk mengonversi hasil inventori menjadi indikator dampak lingkungan yang terukur. Melalui proses klasifikasi dan karakterisasi, setiap aliran bahan dan energi yang dihasilkan pada siklus hidup dianalisis kontribusinya terhadap berbagai kategori dampak. Tahap ini memungkinkan identifikasi potensi beban lingkungan secara lebih komprehensif sebagai dasar untuk penilaian dan pengambilan keputusan dalam konteks keberlanjutan.

Meskipun hasil LCIA dalam penelitian ini mencakup 18 kategori dampak lingkungan, analisis difokuskan pada kategori *global warming potential*. Pemilihan kategori ini didasarkan pada relevansinya yang langsung

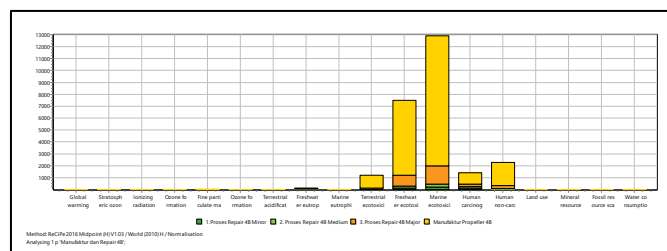
dengan skema pajak karbon, di mana emisi gas rumah kaca dapat dikonversi menjadi nilai ekonomi melalui satuan biaya per ton CO₂-eq, yang dapat dilihat pada Tabel 5. Kategori dampak lainnya, seperti *human toxicity* dan *ecotoxicity*, tidak dijadikan dasar pengambilan keputusan ekonomi karena hingga saat ini belum memiliki mekanisme harga langsung dalam kebijakan pajak karbon, sehingga sulit untuk dibandingkan secara kuantitatif dalam kerangka ekonomi yang sama.

Tabel 5. Hasil Dampak Lingkungan Antara *Propeller* Baru dan Hasil *Repair* 4 Blade (4B)

<i>Impact category</i>	<i>Unit</i>	<i>Total</i>	<i>Repair 4B Minor</i>	<i>Repair 4B Medium</i>	<i>Repair 4B Major</i>	<i>Propeller 4B</i>
<i>Global warming</i>	kg CO ₂ -eq	33795	4456	5595	6782	16962
<i>Stratospheric ozone depletion</i>	kg CFC11 eq	0	0	0	0	0
<i>Ionizing radiation</i>	kBq Co-60 eq	1377	19	28	166	1163
<i>Ozone formation, Human health</i>	kg NO _x eq	109	12	15	20	62
<i>Fine particulate matter formation</i>	kg PM2.5 eq	572	80	99	118	275
<i>Ozone formation, Terrestrial ecosystems</i>	kg NO _x eq	110	12	15	20	63
<i>Terrestrial acidification</i>	kg SO ₂ eq	317	17	21	43	235
<i>Freshwater eutrophication</i>	kg P eq	84	6	8	14	57
<i>Marine eutrophication</i>	kg N eq	5	0	0	1	3
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	kg 1,4-DCB	1255403	3970	5074	129933	1116427
<i>Freshwater ecotoxicity</i>	kg 1,4-DCB	9177	154	191	1105	7728
<i>Marine ecotoxicity</i>	kg 1,4-DCB	13328	214	267	1590	11257
<i>Human carcinogenic toxicity</i>	kg 1,4-DCB	3919	300	373	643	2604
<i>Human non-carcinogenic toxicity</i>	kg 1,4-DCB	337822	4416	5487	39037	288882
<i>Land use</i>	m ² a crop eq	532	8	11	62	452
<i>Mineral resource scarcity</i>	kg Cu eq	816	1	1	73	740
<i>Fossil resource scarcity</i>	kg oil eq	9557	1261	1687	2022	4588
<i>Water consumption</i>	m ³	199	17	21	33	128

Interpretation

Hasil interpretasi menampilkan visualisasi dampak lingkungan *propeller*, membandingkan *propeller* baru dengan tiga skenario *repair* (*minor*, *medium*, *major*). Visualisasi ini memudahkan pemahaman pola kontribusi tiap kategori dampak dan memperkuat analisis kuantitatif sebelumnya, serta memberikan gambaran intuitif mengenai perbedaan performa lingkungan antar *skenario*, dimana dapat dilihat pada Gambar 4.

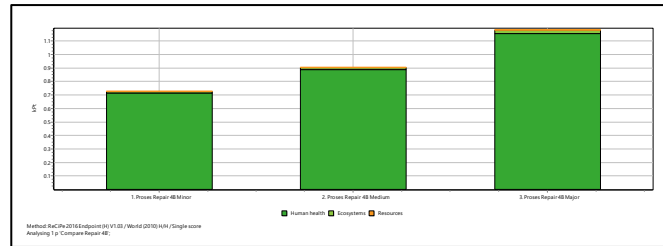


Gambar 4. Normalization Siklus Hidup Perbandingan Propeller Baru dan Repair Propeller

Gambar 4 menunjukkan bahwa manufaktur *propeller* menghasilkan dampak lingkungan tertinggi, terutama pada *marine ecotoxicity*, *freshwater ecotoxicity*, dan *human carcinogenic toxicity*. Semua skenario *repair* (*minor*, *medium*, *major*) memiliki dampak jauh lebih rendah, dengan *repair minor* paling minimal. Hal ini menegaskan bahwa *repair propeller* lebih ramah lingkungan dan efisien dibanding produksi baru. Kemudian hasil *repair* tersebut dianalisis mana yang memberikan kontribusi dampak lingkungan tertinggi.

Gambar 5 menunjukkan bahwa peningkatan tingkat *repair propeller* dari *repair minor* memiliki dampak terendah, kemudian disusul oleh *repair medium*, dan yang terbesar adalah *repair major*. Kontribusi dampak terbesar berasal dari kategori *Human Health*, sedangkan dampak terhadap *Ecosystem* dan *Resources* relatif kecil namun tetap meningkat seiring bertambahnya kompleksitas *repair*. Temuan ini mengindikasikan bahwa

semakin besar tingkat kerusakan *propeller* yang diperbaiki, semakin tinggi pula beban lingkungan yang dihasilkan, meskipun secara keseluruhan dampaknya masih lebih rendah dibandingkan dengan *propeller* baru.



Gambar 5. Normalization Siklus Hidup Comparisons Proses Repair 4B

Berdasarkan hasil normalisasi pada Gambar 4 dan 5, dapat disintesis bahwa strategi *repair minor* merupakan opsi paling optimal dari perspektif lingkungan, karena menunjukkan nilai dampak terendah secara konsisten pada sebagian besar kategori LCIA. Hal ini menegaskan bahwa perbaikan pada tingkat kerusakan rendah mampu mempertahankan fungsi *propeller* dengan tambahan beban lingkungan yang minimal. Sebaliknya, pada skenario *repair major*, nilai dampak lingkungan meningkat secara signifikan dan dalam beberapa kategori mendekati atau melampaui *propeller* baru, yang menunjukkan bahwa strategi *repair* pada tingkat kerusakan tinggi menjadi batas kompromi keberlanjutan antara perpanjangan umur pakai dan peningkatan beban lingkungan.

Carbon tax

Bagian ini membahas perbandingan potensi penghematan dampak lingkungan (*Environmental Saving*) antara penggunaan *propeller* baru dan berbagai skenario *repair* pada *propeller*. Analisis dilakukan untuk melihat sejauh mana proses perbaikan dapat menurunkan konsumsi material, energi, serta emisi dibandingkan dengan penggantian *propeller* baru. Hasil evaluasi memberikan gambaran mengenai manfaat lingkungan yang dapat dicapai melalui penerapan strategi *repair* pada konfigurasi dalam operasional perkapalan. Persamaan 1 adalah perhitungan *enviromental saving* didapatkan dari hasil luaran *global warming* produk manufaktur dikurangi dengan hasil *repair*.

$$\text{Repair Environmental Impact Saving} = M - R \quad (1)$$

Tabel 6. Hasil *Enviromental Saving* Antara *Propeller* Baru dengan Skenario *Repair*

No	Propeller Baru	Skenario Repair	Enviromental Saving
		Minor (kg CO ₂ eq)	
1.	16962	4456	12506
		Medium (kg CO ₂ eq)	
2.	16962	5595	11367
		Major (kg CO ₂ eq)	
3.	16962	6782	10180

Tabel 6 menunjukkan penghematan dampak lingkungan (*Environmental Saving*) pada *propeller* melalui berbagai skenario *repair* dibandingkan *propeller* baru. *Repair minor* menghasilkan penghematan terbesar, yaitu 4456 kg CO₂-eq, diikuti *repair medium* 5595 kg CO₂-eq, dan *repair major* 6782 kg CO₂-eq dibandingkan dengan hasil produk manufaktur *propeller* yaitu 16962 kg CO₂-eq. Hasil ini menegaskan bahwa strategi *repair* lebih unggul daripada *propeller* baru. Selain itu semakin ringan skala perbaikan, semakin besar penghematan dampak lingkungan, sehingga *repair* menjadi strategi yang lebih ramah lingkungan dibandingkan produksi *propeller* baru.

Selanjutnya, setelah dampak lingkungan diketahui, dilakukan perhitungan estimasi penghematan dampak lingkungan dan pajak karbon untuk *propeller* baru dan strategi *repair* tersebut. Persamaan 2 menunjukkan perhitungan penghematan dampak lingkungan dari setiap strategi. Perhitungan pajak karbon ini disesuaikan dengan skema pajak karbon di Indonesia. Berdasarkan Undang-Undang Nomor 7 Tahun 2021 tentang Harmonisasi Peraturan Perpajakan (UU HPP) pajak karbon ditetapkan sebesar Rp30,00 (tiga puluh rupiah) per kilogram karbon dioksida ekuivalen (kg CO₂-eq) [26]. Persamaan 3.1 menunjukkan perhitungan konversi emisi karbon (kg CO₂-eq) ke pajak karbon. Dimana Rp30/kg CO₂-eq adalah skenario awal implementasi kebijakan, nilai ini bersifat konservatif dan mencerminkan tahap awal penerapan kebijakan, di mana tarif pajak karbon masih relatif rendah. Dengan demikian, hasil analisis biaya karbon yang diperoleh dalam penelitian ini cenderung memberikan estimasi minimum, dan potensi penghematan ekonomi dari strategi *repair propeller* berpeluang menjadi lebih signifikan seiring dengan peningkatan tarif pajak karbon di masa mendatang.

$$\text{Carbon Tax} = \text{Rp } 30,00 \times \text{Global warming} \quad (2)$$

Tabel 7. Hasil Estimasi Pajak Karbon Antara *Propeller* Baru dengan Skenario *Repair*

No	Emisi	Pajak Karbon	Enviromental Cost
Propeller Baru 4B (kg CO₂ eq)			
1	16962	Rp30.00	Rp 508.860
Repair Minor 4B (kg CO₂ eq)			
2	4456	Rp30.00	Rp 133.680
Repair Medium 4B (kg CO₂ eq)			
3	5595	Rp30.00	Rp 167.850
Repair Major 4B (kg CO₂ eq)			
4	6782	Rp30.00	Rp 203.460

Tabel 7 memberikan hasil luaran *global warming* (kg CO₂-eq) atau emisi tersebut dikonversikan ke dalam pajak karbon Indonesia (Rp 30/kg CO₂-eq), untuk biaya emisi atau pajak karbon dari *propeller* baru adalah Rp 508.860. Kemudian untuk skenario *repair* ditemukan penghematan *enviromental saving cost* yang cukup signifikan yaitu untuk skenario *repair minor* yaitu Rp 133.680, untuk *repair medium* yaitu Rp 167.850, dan untuk *repair major* yaitu Rp 203.460. Dari hasil tersebut jika dikonversikan kedalam umur penggunaan *propeller* atau *lifespan* dengan 15 tahun untuk *propeller* baru pada persamaan 4 dan 5 tahun untuk *propeller* hasil *repair* pada persamaan 5, maka pembagian pajak karbon per-sekali penggunaan dapat dilihat pada Tabel 8.

$$\text{Lifespan Propeller Baru} = \text{Hasil Pajak Karbon Propeller Baru} : 15 \quad (4)$$

$$\text{Lifespan Propeller Hasil Repair} = \text{Hasil Pajak Karbon Repair Propeller} : 5 \quad (5)$$

Tabel 8. Perbandingan Biaya Pajak Karbon Sesuai Umur *Lifespan Propeller*

Skenario	Propeller Baru	Repair Minor	Repair Medium	Repair Major
4B	Rp 33.924	Rp 26.736	Rp 33.570	Rp 40.692

Hasil pada Tabel 8 menunjukkan bahwa *repair propeller* tidak hanya menurunkan emisi, tetapi juga memberikan manfaat ekonomi melalui penghematan biaya karbon, sehingga mendukung pengambilan keputusan yang lebih berkelanjutan di industri perkapalan dan galangan kapal terkait strategi pergantian *propeller* kapal. Secara praktis, integrasi LCA dan skema pajak karbon dalam penelitian ini dapat berfungsi sebagai *decision support tool* bagi berbagai pemangku kepentingan. Bagi industri galangan kapal, pendekatan ini memberikan dasar kuantitatif untuk menentukan batas optimal strategi *repair* yang masih layak secara lingkungan, serta mendukung pengembangan layanan *green ship repair*. Bagi pemilik kapal, hasil analisis memungkinkan perbandingan *propeller* baru dan strategi *repair* dengan mempertimbangkan tidak hanya biaya teknis, tetapi juga implikasi biaya karbon, sehingga keputusan yang diambil lebih adaptif terhadap kebijakan dekarbonisasi. Sementara itu, bagi regulator maritim dan lingkungan, temuan ini dapat menjadi dasar perumusan kebijakan pajak karbon dan insentif perbaikan kapal yang mendorong praktik berkelanjutan dan ekonomi sirkular di sektor perkapalan. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan pendekatan *cradle-to-grave* atau *cradle-to-cradle* dengan mengintegrasikan potensi penghematan bahan bakar operasional, skenario pajak karbon yang dinamis, serta penerapan *dynamic LCA* guna menangkap perubahan teknologi dan kebijakan dalam jangka panjang.

Daftar Pustaka

- [1] T. F. Hasanah, "Karakteristik Wilayah Daratan Dan Perairan Di Indonesia," *Jurnal Geografi*, vol. XX, no. 13, 2020.
- [2] B. Trikuncoro and A. Ridho, "The utilization of natural resources in high seas for the advancing Indonesian," *Jurnal Maritim Indonesia*, vol. 12, no. 4, 2024.
- [3] S. Saettone, B. Taskar, P. B. Regener, S. Steen and P. Andersen, "A comparison between fully-unsteady and quasi-steady approach for the prediction of the *propeller* performance in waves," *Applied Ocean Research*, vol. 99, 2020.
- [4] S. Anwar, "Developing Formidable Indonesian Maritime Security In The Analysis Of Interest, Threat, And Sea Power," *Jurnal Pertahanan*, vol. 6, no. 3, pp. 69-89, 2016.
- [5] L. K. Padaga, I. Rochani and Y. Mulyadi, "Penjadwalan Berdasarkan Analisis Faktor Faktor Penyebab Keterlambatan Proyek Reparasi Kapal: Studi Kasus MV. Blossom," *JURNAL TEKNIK ITS*, vol. 7, no. 1, pp. G1-G6, 2018.

- [6] Untrade Development, "Main UN Trade and Development (UNCTAD) website," 2025. [Online]. Available: <https://unctadstat.unctad.org/CountryProfile/MaritimeProfile/en-GB/360/index.html>. [Accessed 02 12 2025].
- [7] Statbase, "Number of ships by country of beneficial ownership | Indonesia," 2025. [Online]. Available: <https://statbase.org/data/idn-number-of-ships-by-country-of-beneficial-ownership/>. [Accessed 2025].
- [8] GlobalMilitary, "Tracking world military forces through open-source intelligence," 2025. [Online]. Available: https://www.globalmilitary.net/navies/idn/?utm_source=chatgpt.com. [Accessed 2025].
- [9] A. Syaban and E. A. Mokodompit, "Strategi Pengembangan Industri Kapal Dalam Menghadapi Persaingan Global: Studi Kasus Pelabuhan Nusantara Kendari," *Ijma (Indonesian Journal Of Management And Accounting)*, vol. 5, no. 2, pp. 236-242, 2024.
- [10] A. Muhtadi, T. W. Pribadi and I. Baihaqi, "Studi Implementasi Reparasi Kapal Berbasis Keandalan untuk Galangan Kapal," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 5, no. 1, pp. G1-G7, 2016.
- [11] A. Zulfakhri, "Challenges and Opportunities in Shipyard Industry Financing in Indonesia: A SWOT Analysis Comparing Batam and Non-Batam Clusters," *JUTIN : Jurnal Teknik Industri Terintegrasi*, vol. 8, pp. 1772 - 1787, 2025.
- [12] E. Supriyadi and R. P. Ayuni, "Systematic Literature Review: Pemeliharaan Mesin Dengan Metode Reliability Centered Maintenance (Rcm) Di Perseroan Terbatas," *Sistemik : Jurnal Ilmiah Nasional Bidang Ilmu Teknik*, vol. 11, no. 1, pp. 1-7, 2023.
- [13] A. Muhidin, "Perancangan Sistem Informasi Produk Hasil *Repair* Pada Pt. Jvc Kenwood Elektronik Indonesia," *Jurnal Teknologi Pelita Bangsa - Sigma*, Vol. 6, No. 2, Pp. 148-158, 2017.
- [14] Salim, W. Wibowo And P. S. Santosa, "Aktifitas Perawatan Dan Perbaikan Daun Baling- Baling Pada Kapal," *Majalah Ilmiah Bahari Jogja*, Vol. 22, No. 2, Pp. 213-221, 2024.
- [15] Australian Government, "Marine Incident Annual Report," Australian Maritime Safety Authority, Australian, 2024.
- [16] A. Abdullah, "Development Of A Mathematical Model For Ship *Repair* Time Estimation," Bangladesh University Of Engineering And Technology (Buet), Dhaka, 2021.
- [17] Na'maikalatif, "Identifikasi Kegagalan Monitoring Dan Pengontrolan Controllable Pitch *Propeller* Pada Saat Manouvering Di Kapal Mt. Transko Aquila," Program Studi Teknika Diploma Iv Politeknik Ilmu Pelayaran Semarang, Semarang, 2022.
- [18] E. E. Saragih, D. R. Jati And S. Pramadita, "Analisis Polutan Udara (Co, No2, So2, Pm10, Pm2,5 Dan Tsp) Di Industri Galangan Kapal Serta Pengaruhnya Terhadap Lingkungan Kerja," *Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, Vol. 10, No. 2, Pp. 129-138, 2022.
- [19] Dnv, "Dnv," 2025. [Online]. Available: <https://www.dnv.com/Maritime/Hub/Decarbonize-Shipping/Key-Drivers/Regulations/Imo-Regulations/Eexi/>. [Accessed 2025].
- [20] M. I. Rafi And S. Q. Nisa, "Potensi Dampak Lingkungan Pengelolaan Sampah Domestik Di Industri Galangan Kapal Dengan Metode Life Cycle Assessment," *Envirous*, Vols. 39-45, No. 1, P. 4, 2023.
- [21] M. F. Mahmud, A. Ismayana And M. Yani, "Life Cycle Assessment Proses Pengadaan Bahan Baku Batubara Pembangkit Listrik Tenaga Uap Tidore," *Jurnal Teknologi Mineral Dan Batubara*, Vol. 18, No. 1, Pp. 49-58, 2022.
- [22] E. B. Barus And S. Wijaya, "Penerapan Pajak Karbon Di Swedia Dan Finlandia Serta Perbandingannya Dengan Indonesia," *Jurnal Pajak Indonesia*, Vol. 5, No. 2, Pp. 256-279, 2021.
- [23] B. A. Pratama, M. A. Ramadhani, P. M. Lubis And A. Firmansyah, "Implementasi Pajak Karbon Di Indonesia: Potensi Penerimaan Negara Dan Penurunan Jumlah Emisi Karbon," *Jurnal Pajak Indonesia*, Vol. 6, No. 2, Pp. 368-374, 2022.
- [24] M. Anityasari, M. H. Meilala and T. T. Suhariyanto, "Life cycle assessment of heavy equipment engine remanufacturing in Indonesia," in *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, Calgary, 2025.
- [25] M. Anityasari, S. Hartini and U. Ciptomulyono, "Life Cycle – Value Stream Mapping: Evaluating Sustainability Using Lean Manufacturing Tools in The Life Cycle Perspective," *AIP Conference Proceedings*, pp. 1-9, June 2019.
- [26] R. Sulistyowati, T. Winarsih, M. Ani and R. B. Kurniawan, "Urgensi Penerapan Carbon Tax Sebagai Upaya Mitigasi Perubahan Iklim Untuk Meningkatkan Sustainable Economic Growth," *Riset & Jurnal Akuntansi*, vol. 9, no. 2, pp. 789-799, 2025.