

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

Dela Wahyu Nur Isroin, Maria Anityasari, Ahmad Rusdiansyah

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 , ausdian@ie.its.ac.id .

ABSTRAK

Indonesia sebagai negara kepulauan sangat bergantung pada transportasi laut, di mana *propeller* merupakan komponen utama sistem penggerak kapal namun rentan mengalami kerusakan akibat kavitasi dan beban operasi jangka panjang. Kerusakan *propeller* dapat menurunkan performa kapal, meningkatkan konsumsi bahan bakar serta emisi gas rumah kaca, sehingga diperlukan strategi pemeliharaan yang lebih efisien dan berkelanjutan mengingat manufaktur *propeller* juga menimbulkan dampak lingkungan. Penelitian ini mengevaluasi dan membandingkan dampak lingkungan antara proses manufaktur *propeller* baru dan strategi (*repair*) dalam tiga kategori, perbaikan kerusakan ringan (*minor*), sedang (*medium*), dan berat (*major*), menggunakan *Life Cycle Assessment* (LCA) yang terintegrasi dengan kebijakan *carbon tax*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *repair major* menimbulkan 34% total dampak lingkungan dibandingkan dengan manufaktur *propeller* baru. Pada *global warming*, strategi *repair* memberikan penghematan emisi sebesar 74% untuk perbaikan *minor*, 67% untuk perbaikan *medium*, dan 60% untuk perbaikan *major*. Integrasi dengan skema *carbon tax* Indonesia menunjukkan bahwa *repair* menghasilkan *environmental cost* lebih rendah, yaitu Rp.133.680, Rp.167.850, dan Rp.203.460 untuk perbaikan *minor*, *medium*, dan *major* dibandingkan *propeller* baru sebesar Rp.508.860. Dengan mempertimbangkan estimasi *lifespan propeller repaired* selama 5 tahun berdasarkan hasil uji kelayakan operasional BKI dibandingkan estimasi *lifespan* yang mencapai 15 tahun untuk *propeller* baru, penggunaan *repair minor* dan *medium* selama 15 tahun menghasilkan dampak lingkungan sebesar 63%–79% dari *propeller* baru, sedangkan *repair major* sedikit lebih tinggi (3%) dari *propeller* baru. Temuan ini menegaskan strategi *repair* tidak hanya menurunkan emisi, tetapi juga memberikan manfaat ekonomi melalui penghematan biaya karbon dengan potensi *saving* yang diperkirakan meningkat seiring perkembangan kebijakan *carbon tax* di masa depan.

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

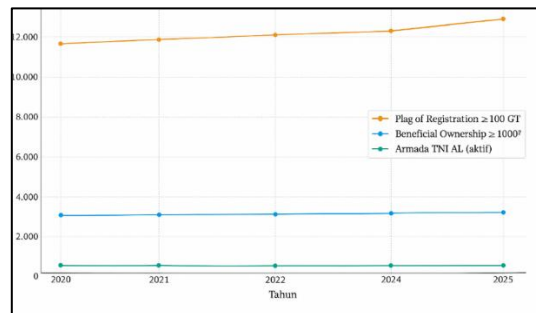
ABSTRACT

Indonesia, as an archipelagic country, relies heavily on maritime transportation, where ship propellers serve as a key component of the propulsion system but are highly susceptible to damage due to cavitation and long-term operational loads. Propeller damage can reduce vessel performance, increase fuel consumption, and contribute to higher greenhouse gas emissions, highlighting the need for more efficient and sustainable maintenance strategies, particularly since propeller manufacturing also generates significant environmental impacts. This study evaluates and compares the environmental impacts of new propeller manufacturing and repair strategies across three damage categories: minor, medium, and major repairs, using *Life Cycle Assessment* (LCA) integrated with carbon tax policy considerations. The results indicate that major repair accounts for only 34% of the total environmental impact of manufacturing a new propeller. In the global warming category, repair strategies achieve emission reductions of 74% for minor repair, 67% for medium repair, and 60% for major repair. Integration with Indonesia's carbon tax scheme further demonstrates that repair options generate lower environmental costs, amounting to IDR 133,680, IDR 167,850, and IDR 203,460 for minor, medium, and major repairs, respectively, compared to IDR 508,860 for a new propeller. Considering an estimated lifespan of five years for repaired propellers, based on operational feasibility tests by BKI, compared to fifteen years for new propellers, the use of minor and medium repairs over a fifteen-year period results in environmental impacts ranging from 63% to 79% of those associated with new propeller manufacturing, while major repair is slightly higher by 3%. These findings confirm that repair strategies not only reduce emissions but also provide economic benefits through carbon cost savings, with the potential for greater savings as carbon tax policies continue to evolve in the future.

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

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 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 (Sumber: [6][7][8])

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 di mana 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]. Di antara 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, di mana 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.

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 penggantian *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. Hal tersebut merupakan kebaruan penelitian ini.

Perbaikan *propeller* umumnya lebih cepat dan menghabiskan waktu 3–4 hari dan berpotensi menurunkan biaya dibandingkan dengan penggantian *propeller* baru [16] [17]. Namun demikian belum ada bukti empiris kuantitatif yang menghitung dan membandingkan dampak lingkungan perbaikan (*repair*) *propeller* dengan proses manufaktur *propeller* baru. Data hasil observasi di salah satu galangan kapal Indonesia menunjukkan rata-rata perbaikan 136 unit per tahun 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].

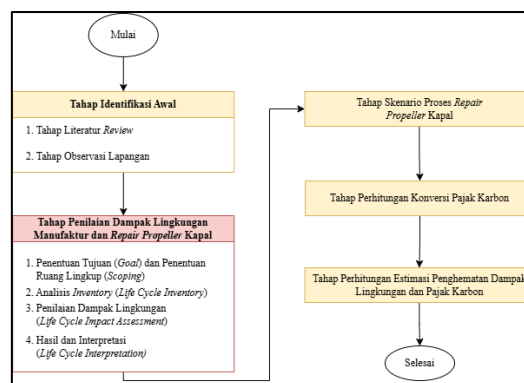
Selain itu, *Report One Ocean Foundation* menyebutkan bahwa sektor pembangunan dan perbaikan kapal merupakan salah satu penyumbang polusi udara, dengan kontribusi sekitar 2,89% terhadap emisi gas rumah kaca global pada tahun 2023 dan diproyeksikan meningkat hingga 50% pada tahun 2050 dibandingkan tingkat emisi tahun 2018, yang terutama berasal dari penggunaan cat dan pelarut (VOC), pembakaran bahan bakar fosil pada peralatan dan mesin kerja (NO_x, CO, dan PM), serta konsumsi listrik berbasis energi fosil di galangan kapal [20]. Kondisi ini menuntut industri galangan kapal untuk menaiki dampak lingkungan dari aktivitas perbaikan dan penggantian 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 [21][22]. Khususnya dalam membandingkan *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 [23][24]. 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 [25]. Pendekatan tersebut didukung oleh pemanfaatan *Software SimaPro 9.5.0.2*© yang berfungsi sebagai alat analisis LCA untuk mengidentifikasi, karakterisasi, dan menginterpretasikan potensi dampak lingkungan yang dihasilkan dari suatu proses [26]. Serta dikaitkan dengan kebijakan pajak karbon (*carbon tax*) sebagai dasar pengambilan keputusan yang lebih berkelanjutan dengan mempertimbangkan aspek lingkungan, ekonomi, dan sosial [27].

Meskipun kajian mengenai *propeller* dan LCA telah berkembang, penelitian yang mengintegrasikan hasil LCA dengan skenario pajak karbon dalam konteks pengambilan keputusan pergantian *propeller* kapal masih jarang ditemukan. Integrasi ini menjadi kebaruan penelitian karena mampu menjembatani analisis dampak lingkungan dan implikasi ekonomi kebijakan karbon secara kuantitatif. Sehingga dapat memberikan rekomendasi secara berkelanjutan pada industri perkapalan dan galangan kapal dalam pengambilan keputusan pergantian *propeller* kapal.

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

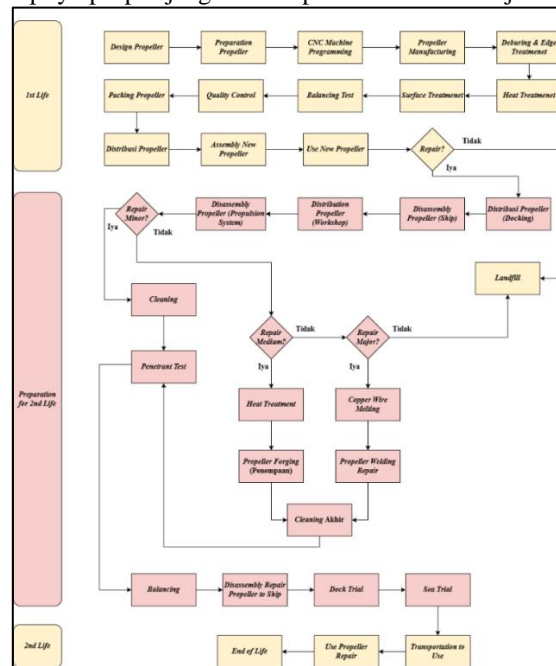
LCA Repair Propeller Kapal

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, terbuat dari material *bronze* atau tembaga. Ruang lingkup (*scope*) penelitian ini menggunakan pendekatan *gate-to-gate*, dengan fokus pada tahap produksi *propeller* baru dan proses *repair*. Perbandingan dilakukan antara skenario *propeller* baru dengan tiga skenario *repair* yang merepresentasikan tingkat kerusakan berbeda yaitu kerusakan ringan (*minor*), sedang (*medium*), berat (*major*). Tahap penggunaan, termasuk potensi penghematan bahan bakar akibat peningkatan efisiensi operasional, tahap akhir siklus hidup (*end-of-life*), seperti daur ulang material, *supply* bahan baku material, dan tahap proses distribusi tidak dihitung dalam penelitian ini. Analisis dilakukan pada satu perusahaan manufaktur *propeller* kapal dan satu galangan kapal saja. Oleh karena itu, hasil perhitungan yang diperoleh bersifat general, khususnya dalam menilai manfaat lingkungan dan ekonomi, karena potensi pengurangan emisi dan biaya pada fase penggunaan ataupun 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 *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 berbeda-beda sesuai dengan permintaan data *input* dari *Software Simapro*. Pada Tabel 1 dikompilasi data penggunaan energi dalam proses manufaktur *propeller* kapal. Selain data manufaktur diberikan data *design* hingga ke proses uji kelayakan atau *balancing test*, di mana *output* yang diamati adalah jumlah kWh yang digunakan per proses. Data ini diambil dari salah satu industri manufaktur *propeller* kapal. Industri manufaktur tersebut berada di Jawa Barat dengan kapasitas pengecoran hingga berdiameter 3,5 m. Dengan adanya kerahasiaan data perusahaan, maka nama perusahaan diasumsikan dengan PT X.

Tabel 1. Penggunaan Energi dalam Proses *Propeller* Kapal (Sumber: PT X)

Detail Aktivitas	Energi yang Digunakan (kWh)
Proses Manufaktur	12.000
<i>Deburring & Edge Treatment</i>	25,4
<i>Heat Treatment</i>	1.504
<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* di mana terdapat *disassembly propeller* dari kapal, distribusi kapal ke bengkel, hingga tahap *disassembly propeller* kapal dari sistem propulsinya. Data tersebut diambil dari salah satu galangan kapal di Jawa Timur yang memiliki kapasitas sandar kapal sampai dengan 10.000 GT. Dengan adanya kerahasiaan data perusahaan, maka nama Perusahaan diasumsikan dengan PT Y.

Tabel 2. Tahapan Pra-*Repair Propeller* Kapal (Sumber: PT Y)

Proses	Mesin yang Terlibat	Jumlah yang Digunakan	Satuan
<i>Disassembly propeller</i> dari kapal	Genset 320kVa	3,5	Jam
	CrawlerCRane	1,08	Jam
<i>Distribusi propeller</i> ke bengkel	Fork lift 8 ton	0,25	Jam
<i>Disassembly propeller</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 skenario yaitu kerusakan ringan (*repair minor*), kerusakan sedang (*repair medium*), dan kerusakan berat (*repair major*).

Tabel 3. Skenario *Repair Propeller* Kapal (Sumber: PT Y)

Proses	Detail Aktivitas	Jumlah yang Digunakan	Satuan
<i>Repair Minor</i>	<i>Cleaning</i>	3.120	
	<i>Balancing</i>	675	kWh
	<i>Penetrant Test</i>	45	
<i>Repair Medium</i>	<i>Cleaning</i>	3.744	kWh
	<i>Heating Treatment</i>	150	kg
	Penempaan	312	
	<i>Cleaning Akhir</i>	675	kWh
	<i>Balancing</i>	30	
	<i>Penetrant Test</i>	3.744	
	<i>Cleaning</i>	60	kg
<i>Repair Major</i>	Kawat Tembaga	150	kg
	<i>Heating Treatment</i>	120	cm
	Peleburan Kawat Tembaga	442	
	Penambalan <i>Propeller</i> (Popok)	1.050	kWh
	<i>Welding Area</i>	90	
	<i>Cleaning Akhir</i>		
	<i>Balancing</i>		
	<i>Penetrant Test</i>		

Tabel 4 menjelaskan terkait data proses pasca *repair* meliputi distribusi ke galangan kapal, *assembly propeller* pada kapal, hingga serangkaian standar uji (*dock trial and sea trial*).

Tabel 4. Tahapan *Pasca Repair Propeller* Kapal (Sumber: PT Y)

Proses	Detail Aktivitas	Jumlah yang Digunakan	Satuan
Distribusi & <i>Assembly</i>	Perjalanan ke <i>dock</i>	0,25	Jam
	<i>Assembly Propeller</i> di kapal	0,91	Jam
	<i>Assembly Propeller</i> di kapal	3,5	Jam
<i>Dock Trial</i>	Uji kapal <i>pasca repair</i> di <i>dock</i>	12	tkm

Proses	Detail Aktivitas	Jumlah yang Digunakan	Satuan
<i>Sea Trial</i>	Uji kapal <i>pasca dock trial</i>	24	tkm

Impact Assessment

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.

Tabel 5 merupakan rangkuman 18 kategori dampak lingkungan pada *Software SimaPro* yang telah dinormalisasi. Normalisasi dalam LCA adalah proses membandingkan besarnya dampak lingkungan dari sistem yang dikaji dengan nilai acuan tertentu. Dengan cara ini, dampak yang dihasilkan dapat dilihat secara relatif sehingga lebih mudah dipahami [28]. Dari hasil analisis didapatkan bahwa terdapat tiga kategori dampak lingkungan tertinggi. Ditemukan bahwa dampak lingkungan tertinggi adalah *global warming* untuk proses *repair* khususnya untuk *repair minor* dan *medium*, sedangkan untuk proses *repair major* dan proses manufaktur *propeller* baru adalah *global warming* terdapat pada urutan ketiga. Mengingat penelitian ini akan berfokus pada *carbon tax*, maka kategori dampak lingkungan yang akan dibahas selanjutnya adalah *global warming*.

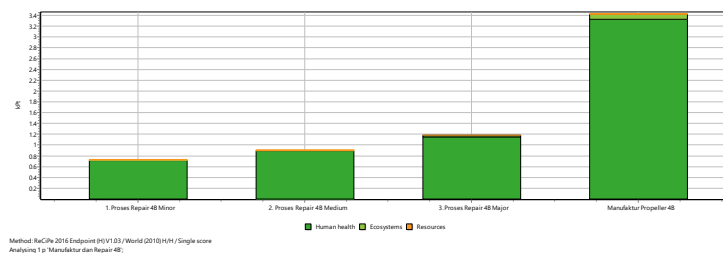
Tabel 5. Normalization Dampak Lingkungan antara *Propeller* Baru dan Hasil *Repair 4 Blade* (4B)

<i>Impact category</i>	Proses Repair 4B Minor	Proses Repair 4B Medium	<i>Impact category</i>	Proses Repair 4B Major	<i>Impact category</i>	Manufaktur Propeller 4B
<i>Global warming</i>	4.456	5.595	<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	129.933	<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	1.116.427
<i>Human non-carcinogenic toxicity</i>	4.416	5.487	<i>Human non-carcinogenic toxicity</i>	39.037	<i>Human non-carcinogenic toxicity</i>	288.882
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	3.970	5.074	<i>Global warming</i>	6.782	<i>Global warming</i>	16.962
<i>Fossil resource scarcity</i>	1.261	1.687	<i>Fossil resource scarcity</i>	2.022	<i>Marine ecotoxicity</i>	11.257
<i>Human carcinogenic toxicity</i>	300	373	<i>Human carcinogenic toxicity</i>	1.590	<i>Freshwater ecotoxicity</i>	7.728
<i>Marine ecotoxicity</i>	214	267	<i>Marine ecotoxicity</i>	1.105	<i>Fossil resource scarcity</i>	4.588
<i>Freshwater ecotoxicity</i>	154	191	<i>Freshwater ecotoxicity</i>	643	<i>Human carcinogenic toxicity</i>	2.604
<i>Fine particulate matter formation</i>	80	99	<i>Fine particulate matter formation</i>	166	<i>Ionizing radiation</i>	1.163
<i>Ionizing radiation</i>	19	28	<i>Ionizing radiation</i>	118	<i>Mineral resource scarcity</i>	740
<i>Water consumption</i>	17	21	<i>Water consumption</i>	73	<i>Land use</i>	452
<i>Terrestrial acidification</i>	17	21	<i>Terrestrial acidification</i>	62	<i>Fine particulate matter formation</i>	275
<i>Ozone formation, Terrestrial ecosystems</i>	12	15	<i>Ozone formation, Terrestrial ecosystems</i>	43	<i>Terrestrial acidification</i>	235
<i>Ozone formation, Human health</i>	12	15	<i>Ozone formation, Human health</i>	33	<i>Water consumption</i>	128
<i>Land use</i>	8	11	<i>Land use</i>	20	<i>Ozone formation, Terrestrial</i>	63

<i>Impact category</i>	Proses Repair 4B Minor	Proses Repair 4B Medium	<i>Impact category</i>	Proses Repair 4B Major	<i>Impact category</i>	Manufaktur Propeller 4B
<i>Freshwater eutrophication</i>	6	8	<i>Freshwater eutrophication</i>	20	<i>ecosystems</i>	
<i>Mineral resource scarcity</i>	1	1	<i>Mineral resource scarcity</i>	14	<i>Ozone formation, Human health</i>	62
<i>Stratospheric ozone depletion</i>	0	0	<i>Stratospheric ozone depletion</i>	1	<i>Freshwater eutrophication</i>	57
<i>Marine eutrophication</i>	0	0	<i>Marine eutrophication</i>	0	<i>Marine eutrophication</i>	3
					<i>Stratospheric ozone depletion</i>	0

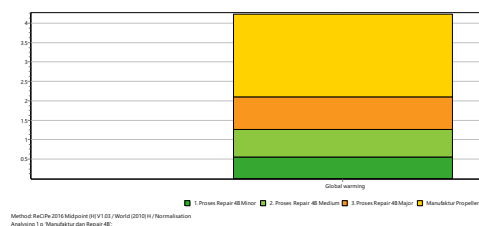
Interpretation

Dari hasil endpoint *single score* yang ditampilkan dalam Gambar 4 terlihat perbandingan dampak lingkungan total dampak lingkungan dari manufaktur *propeller* baru dibandingkan dengan perbaikan *minor* hingga *major*. Dampak terbesar proses manufaktur dan *repair* didominasi oleh dampak pada *human health*. *Repair major* menghasilkan dampak kurang dari 35% dibandingkan dengan proses manufaktur *propeller* baru. Sementara *repair minor* memiliki dampak lingkungan kurang dari 21% dari manufaktur *propeller* baru. Hal ini mengindikasikan bahwa strategi *repair propeller* merupakan opsi yang lebih ramah lingkungan dalam menekan kerusakan terhadap kesehatan manusia, ekosistem, dan sumber daya.



Gambar 4. Endpoint Single Score Propeller Baru dengan Skenario Repair

Selanjutnya, Gambar 5 menunjukkan dampak lingkungan yang menjadi fokus dalam penelitian ini yaitu *global warming*. Strategi *repair propeller* menghasilkan penghematan sebesar 74% untuk *repair minor*, 67% untuk *repair medium*, dan 60% untuk *repair major* dibandingkan dengan manufaktur *propeller* baru. Hal ini menegaskan bahwa *repair propeller* lebih ramah lingkungan dan efisien dibanding produksi baru.



Gambar 5. Hasil Global Warming dari Perbandingan Propeller Baru dan Repair Propeller

Walaupun penelitian ini baru didasarkan dari praktik *repair* disatu galangan kapal, namun hasil penelitian ini dapat dijadikan indikasi penghematan proses *repair* dibandingkan dengan manufaktur *propeller* baru. Strategi *repair minor* merupakan opsi paling optimal dari perspektif lingkungan, karena menunjukkan nilai dampak terendah secara konsisten pada sebagian besar kategori LCIA. Sebaliknya, pada strategi *repair major*, nilai dampak lingkungan meningkat secara signifikan dibandingkan strategi *repair minor* dan menjadi batas kompromi keberlanjutan antara perpanjangan umur pakai dan peningkatan beban lingkungan.

Mengingat bahwa semua *propeller* yang mengalami proses perbaikan *minor*, *medium*, *major* akan diuji kelayakan operasionalnya oleh BKI (Biro Klasifikasi Indonesia) sebelum dioperasikan, maka pengurangan dampak lingkungan yang diukur dalam kajian ini merupakan aspek penting yang menjadi pertimbangan dalam pengambilan keputusan pembelian atau perbaikan *propeller*. Dari hasil wawancara dengan pihak galangan kapal dan BKI diperkirakan *propeller* hasil *repair* akan memiliki estimasi *lifespan* 5 tahun, di mana *lifespan* tersebut adalah 33,3% dari *lifespan propeller* baru yang ditaksir akan digunakan selama 15 tahun. Dengan demikian penggunaan *propeller* dengan *repair minor* dan *medium* selama 15

tahun akan memiliki dampak lingkungan dalam rentang antara 63%–79% dari dampak lingkungan manufaktur *propeller* baru. Di sisi lain penggunaan *propeller repair major* selama 15 tahun akan memiliki dampak lingkungan 3% di atas dampak lingkungan manufaktur *propeller* baru. Hal ini menegaskan bahwa perbaikan pada semua tingkat kerusakan layak untuk diupayakan karena dapat mempertahankan fungsi *propeller* dengan beban lingkungan yang lebih rendah.

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 *environmental 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*

<i>Propeller Baru</i> (kg CO ₂ -eq)	<i>Repair Minor</i> (kg CO ₂ -eq)	<i>Enviromental Saving</i> (kg CO ₂ -eq)	<i>Repair Medium</i> (kg CO ₂ -eq)	<i>Enviromental Saving</i> (kg CO ₂ -eq)	<i>Repair Major</i> (kg CO ₂ -eq)	<i>Enviromental Saving</i> (kg CO ₂ -eq)
16.962	4.456	12.506	5.595	11.367	6.782	10.180

Tabel 6 menunjukkan penghematan dampak lingkungan (*Environmental Saving*) pada *propeller* melalui berbagai skenario *repair* dibandingkan *propeller* baru. *Repair minor* menghasilkan penghematan terbesar, yaitu 12.506 kg CO₂-eq, diikuti *repair medium* 11.367 kg CO₂-eq, dan *repair major* 10.180 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 Rp.30,00 (tiga puluh rupiah) per kilogram karbon dioksida ekuivalen (kg CO₂-eq) [29]. Di kawasan Asia, Singapura memberlakukan pajak karbon sekitar SGD25 per ton CO₂-eq yang direncanakan meningkat secara bertahap. Jepang menerapkan pajak karbon dengan tarif sekitar JPY289 per ton CO₂-eq, sedangkan Korea Selatan menetapkan harga karbon melalui skema perdagangan emisi dengan kisaran harga sekitar KRW20.000–40.000 per ton CO₂-eq [30]. Dibandingkan dengan negara-negara tersebut, tarif pajak karbon Indonesia masih tergolong relatif rendah. Namun sejalan dengan arah kebijakan ke depan, nilainya diperkirakan akan meningkat secara bertahap dari waktu ke waktu. Jika di kemudian hari terjadi kenaikan besaran pajak karbon per kg CO₂-eq strategi *repair* akan menjadi menguntungkan.

Pada Persamaan (2) menunjukkan perhitungan konversi emisi karbon (kg CO₂-eq) ke pajak karbon Indonesia. Di Indonesia Rp.30/kg CO₂-eq adalah skenario tarif 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 *environmental saving* 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*

<i>Propeller Baru</i> (kg CO ₂ -eq)	<i>Carbon Tax</i>	<i>Enviromental Cost</i>	<i>Repair Minor</i> (kg CO ₂ -eq)	<i>Enviromental Cost</i>	<i>Repair Medium</i> (kg CO ₂ -eq)	<i>Enviromental Cost</i>	<i>Repair Major</i> (kg CO ₂ -eq)	<i>Enviromental Cost</i>
16.962	Rp.30,00	Rp.508.860	4.456	Rp.133.680	6.782	Rp.167.850	6.782	Rp.203.460

Tabel 7 memberikan hasil luaran *global warming* (kg CO₂-eq) atau emisi tersebut dikonversikan ke dalam pajak karbon Indonesia (Rp30.00/kg CO₂-eq), untuk biaya emisi atau pajak karbon dari *propeller* baru adalah Rp.508.860. Kemudian untuk skenario *repair* ditemukan biaya *carbon tax* yang lebih rendah dari *propeller* baru yaitu untuk skenario *repair minor* adalah Rp.133.680, untuk *repair medium* adalah Rp.167.850,

dan untuk *repair major* adalah Rp.203.460. Berdasarkan hasil perhitungan tersebut ditemukan bahwa biaya *carbon tax* antara *propeller* baru dengan *propeller* hasil *repair* lebih murah *propeller* dengan hasil *repair*. Tahap selanjutnya analisis sensitivitas yang dilakukan untuk mempertimbangkan umur penggunaan *propeller* atau *lifespan* dengan 15 tahun untuk *propeller* baru pada Persamaan (4), dan masa penggunaan 5 tahun untuk *propeller* hasil *repair* pada Persamaan (5), maka pembagian pajak karbon per sekali penggunaan dapat dilihat pada Tabel 8.

$$\begin{aligned} \text{Lifespan Propeller Baru} &= \text{Hasil Pajak Karbon Propeller Baru} : 15 & (4) \\ \text{Lifespan Propeller Hasil Repair} &= \text{Hasil Pajak Karbon Repair Propeller} : 5 & (5) \end{aligned}$$

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

Skenario	<i>Propeller Baru</i>	<i>Repair Minor</i>	<i>Repair Medium</i>	<i>Repair Major</i>
4 Blade	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, penerapan strategi *repair propeller* memberikan *environmental saving* melalui penurunan emisi karbon, yang secara langsung berkontribusi pada pengurangan beban pajak karbon. Penurunan emisi ini sekaligus menghasilkan *cost saving*, karena total biaya pajak karbon yang harus ditanggung galangan menjadi lebih rendah. Bagi pemilik kapal, hasil analisis perbandingan antara *propeller* baru dan strategi *repair* dengan mempertimbangkan tidak hanya aspek biaya teknis, tetapi juga implikasi biaya karbon, sehingga pemilik kapal berpotensi memperoleh *green incentive* dan mengambil keputusan yang lebih adaptif terhadap kebijakan dekarbonisasi. Sementara itu, bagi regulator maritim dan lingkungan, temuan ini dapat menjadi dasar perumusan kebijakan pajak karbon serta skema insentif perbaikan *propeller* kapal yang mendorong praktik berkelanjutan dan penerapan ekonomi sirkular di sektor perkapalan, sekaligus memberikan gambaran mengenai penerapan skema tarif pajak karbon di industri pelayaran dan galangan kapal.

Simpulan

Penelitian yang dipaparkan dalam *paper* ini telah berhasil mengimplementasikan LCA yang berintegrasi dengan skenario *carbon tax* pada proses manufaktur dan *repair propeller* kapal. Perancangan siklus hidup dilakukan menggunakan *Software SimaPro* dengan batasan *gate-to-gate*, yang mencakup proses manufaktur dan *repair*. Hasil analisis menunjukkan bahwa proses manufaktur *propeller* baru memiliki *hotspot* atau dampak lingkungan lebih tinggi dibandingkan strategi *repair*. Dengan mempertimbangkan umur penggunaan (*lifespan*) *propeller* hasil *repair* akan memiliki estimasi *lifespan* 5 tahun, di mana *lifespan* tersebut adalah 33,3% dari *lifespan propeller* baru yang ditaksir akan digunakan selama 15 tahun. Dengan demikian penggunaan *propeller* dengan *repair minor* dan *medium* selama 15 tahun akan memiliki dampak lingkungan dalam rentang antara 63%–79% dari dampak lingkungan manufaktur *propeller* baru. Di sisi lain penggunaan *propeller repair major* selama 15 tahun akan memiliki dampak lingkungan 3% di atas dampak lingkungan manufaktur *propeller* baru. Hal ini menegaskan bahwa perbaikan pada semua tingkat kerusakan layak untuk diupayakan karena dapat mempertahankan fungsi *propeller* dengan beban lingkungan yang lebih rendah. Kemudian, berfokus pada *impact assessment* kategori *global warming*, strategi *repair propeller* menghasilkan penghematan sebesar 74% untuk *repair minor*, 67% untuk *repair medium*, dan 60% untuk *repair major* dibandingkan dengan *propeller* baru. Hasil dari *global warming* tersebut kemudian diintegrasikan dengan skema *carbon tax* Indonesia, di mana menunjukkan bahwa strategi *repair* memberikan *environmental cost* yang lebih rendah. Untuk *propeller* baru adalah Rp.508.860, kemudian *repair minor* adalah Rp.133.680, untuk *repair medium* adalah Rp.167.850, dan untuk *repair major* adalah Rp.203.460. Mengingat kebijakan ini masih berada pada tahap awal penerapan awal, potensi *saving* yang dihasilkan diperkirakan akan terus meningkat secara signifikan seiring perkembangan kebijakan *carbon tax* ke depan. Temuan ini menegaskan bahwa strategi *repair* tidak hanya efektif dalam menurunkan emisi, tetapi juga bisa digunakan sebagai dasar menuju kebijakan dekarbonisasi, serta dapat dijadikan pengambilan keputusan bagi galangan kapal, pemilik kapal, dan regulator dalam mendorong praktik pergantian *propeller* yang berkelanjutan.

Penelitian ini bertujuan mendukung kesiapan sektor pelayaran dan industri galangan kapal dalam menghadapi implementasi kebijakan *carbon tax* di masa mendatang. Saran penelitian ini adalah mengembangkan pendekatan *cradle-to-grave*. Maksud dari *cradle-to-grave* adalah proses *raw material*, *manufacturing*, operasional dan *end-of-life*. Sangat dimungkinkan untuk melakukan *remanufacturing propeller*

agar memiliki kualitas *as good as new*, dengan demikian *life cycle*-nya bisa berulang dan memenuhi *cradle-to-cradle* dan dapat digunakan dalam jangka panjang. Pengumpulan data di galangan kapal yang lebih banyak akan dapat memperkuat analisis yang telah dipaparkan dalam kajian ini.

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>. [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 Teknik 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] *One Ocean Foundation*, "Ocean Disclosure Initiative Shipbuilding And Repairs Industry Review," *One Ocean Foundation*, 2024.

- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] I. L. D. Budiono and N. Ratni, "*Life Cycle Assessment (LCA) Pengolahan Sampah Proses Termal Pada Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Supit Urang Kota Malang*," *Jurnal Envirous*, Vol. 1, no. 2, 2021.
- [27] 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.
- [28] A. Hélias and R. Servien, "*Normalization In LCA: How To Ensure Consistency?*," *The International Journal of Life Cycle Assessment* , vol. 26, pp. 1117-1122, 2021.
- [29] 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.
- [30] N. Armylia, "Pajak Karbon, Sebuah Solusi yang Adaptif?," Kementrian Keuangan RI, 27 Desember 2023. [Online]. Available: https://pajak.go.id/id/artikel/pajak-karbon-sebuah-solusi-yang-adaptif?utm_source. [Accessed 04 Februari 2026].