

Analisa Penggunaan Energi Alternatif Pada Kapal *Bulk Carrier* Untuk Menekan Emisi Pada Pelayaran Pelabuhan Kwinana Australia Menuju Pelabuhan Tanjung Perak Indonesia

Achmad Bilal Mahesa Pradana ^{1*}, Arif Fadillah ²

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan, Universitas Darma Persada,

² Dosen Program Studi Teknik Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan, Universitas Darma Persada,
Jl. Taman Malaka Selatan No.22, Pondok Kelapa, Duren Sawit, DKI Jakarta, Indonesia 13450

*Email : arif_fadillah@yahoo.com

Abstrak

Penelitian ini menganalisis penggunaan amonia sebagai bahan bakar alternatif pada kapal bulk carrier rute pelabuhan Kwinana, Australia, menuju pelabuhan Tanjung Perak, Indonesia. Analisis dilakukan terhadap kebutuhan bahan bakar, kinerja pelayaran, perubahan karakteristik kapal, emisi gas buang, serta biaya operasional dibandingkan dengan Marine Diesel Oil (MDO). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kebutuhan bahan bakar Amonia mencapai 969,609 ton, lebih tinggi dibandingkan MDO sebesar 487,027 ton, dengan waktu pelayaran yang sedikit lebih lama. Penggunaan Amonia meningkatkan Light Weight Tonnage (LWT) dari 4571.6 ton menjadi 4621.44 ton dan Dead Weight Tonnage (DWT) dari 33,951 ton menjadi 34,433 ton akibat penambahan tangki bahan bakar. Dari aspek lingkungan, Amonia tidak menghasilkan emisi CO₂, SO_x, dan PM₁₀. Sedangkan emisi NO_x dapat ditekan secara signifikan melalui penggunaan scrubber. Namun, total biaya operasional dan investasi Amonia mencapai Rp 5,62 triliun per tahun, lebih rendah dibandingkan MDO sebesar Rp 5,68 triliun. Hasil penelitian menunjukkan bahwa amonia berpotensi mendukung dekarbonisasi sektor maritim, meskipun memerlukan investasi yang lebih besar untuk implementasinya.

Kata kunci: Amonia, bulk carrier, Marine Diesel Oil, emisi, LWT, DWT, dekarbonisasi maritim.

Abstract

This study analyzes the use of ammonia as an alternative fuel for a bulk carrier operating on the route from Kwinana Port, Australia, to Tanjung Perak Port, Indonesia. The analysis covers fuel consumption, voyage performance, ship characteristics, exhaust emissions, and operational costs compared with Marine Diesel Oil (MDO). The results show that ammonia consumption reaches 969,609 tons, higher than MDO at 487,027 tons, resulting in a slightly longer duration. The use of ammonia increases the vessel's Light Weight Tonnage (LWT) from 4571.6 tons to 4621.44 tons and Dead Weight Tonnage (DWT) from 33,951 tons to 34,433 tons due to the additional fuel storage tank. From an environmental perspective, ammonia produces no CO₂, SO_x, or PM₁₀ emissions, while NO_x emissions can be significantly reduced through the implementation of a scrubber. However, the total annual operational and investment cost of Ammonia reaches IDR 5,62 trillion, than MDO at IDR 5,68 trillion. The findings indicate that ammonia has strong potential to support maritime decarbonization, although its implementation requires substantially higher investment costs

Keywords: ammonia, bulk carrier, Marine Diesel Oil, emissions, LWT, DWT, maritime decarbonization.

1. Pendahuluan

Dalam satu dekade terakhir, dekarbonisasi sektor maritim menjadi fokus utama seiring meningkatnya tekanan global untuk menurunkan emisi gas rumah kaca (GRK), sehingga transisi menuju sistem energi yang lebih bersih menjadi agenda strategis dalam industri pelayaran. Pada penelitian ini, melakukan pendekatan untuk menekan emisi dengan menggunakan bahan bakar alternatif, bahan bakar alternatif yang dipilih adalah Amonia.

Permasalahan yang dikaji meliputi pengaruh penggunaan bahan bakar Amonia terhadap kebutuhan efektif pelayaran, Amonia pada kapal rancangan, hasil emisi yang dihasilkan dari pemakaian Amonia, serta biaya operasional yang timbul dibandingkan dengan penggunaan bahan bakar Marine Diesel Oil. Adapun tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui jumlah bahan bakar yang dibutuhkan selama untuk trip per tahun dari Pelabuhan Kwinana Australia menuju Pelabuhan Tanjung Perak

Indonesia dengan menggunakan bahan bakar Amonia, mengevaluasi kelayakan operasionalnya melalui pemodelan pelayaran terintegrasi, membandingkan emisi Amonia dengan *Marine Diesel Oil*, serta menilai aspek ekonomi berdasarkan perbandingan biaya operasional kedua bahan bakar tersebut.

Metode yang digunakan adalah deskriptif melalui perhitungan terhadap parameter operasional kapal, yang meliputi analisis kebutuhan bahan bakar, perhitungan perencanaan tangki, perbandingan emisi bahan bakar serta perbandingan biaya operasional dan investasi kapal

Data yang digunakan dalam mendukung penelitian ini adalah data kapal *Bulk Carrier* rancangan dengan ukuran 33951 Ton, data *Specific Fuel Consumption* Amonia & MDO, data rute pelayaran, data waktu operasional pelabuhan, data waktu *bunkering* bahan bakar serta data biaya operasional yang digunakan sebagai dasar analisis teknis dan ekonomi.

Penelitian ini dilakukan analisis terhadap jumlah kebutuhan bahan bakar yang dihasilkan dari penggunaan bahan bakar trip per tahun, evaluasi perhitungan perencanaan tangki, analisis perbandingan emisi yang dihasilkan oleh kedua jenis bahan bakar serta analisis perbandingan biaya operasional bahan bakar.

Penelitian mengenai penggunaan bahan bakar Amonia di sektor maritim masih belum secara komprehensif mengintegrasikan aspek efektif pelayaran konsumsi bahan bakar, desain penyimpanan, serta dampaknya terhadap kapasitas muatan dan biaya operasional kapal. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan data operasional aktual agar hasil lebih akurat dan aplikatif, disertai kajian ekonomi mendalam terkait kelayakan komersial. Selain itu, kolaborasi antara industri pelayaran, institusi penelitian, dan regulator diperlukan untuk mempercepat pengembangan infrastruktur serta standar teknis penggunaan amonia secara aman, efektif, dan berkelanjutan.

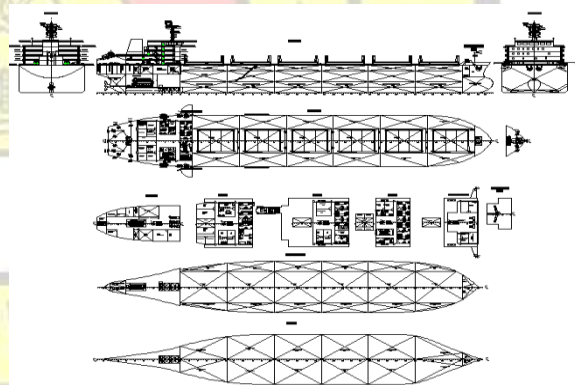
2. Studi Pustaka

2.1 Kapal *Bulk Carrier*

Kapal *Bulk Carrier* merupakan kapal yang khusus digunakan untuk mengangkut muatan curah gandum. [1].

Tabel 1. Karakteristik *Bulk Carrier* rancangan

Keterangan	Ukuran
Panjang Kapal (LBP)	178,65 (m)
Lebar kapal (B)	26,54 (m)
Sarat air kapal (T)	9,72 (m)
Daya mesin utama (ME)	5760 (Kw)
Daya mesin bantu (AE)	2340 (Kw)
<i>Gross Tonnage</i> (GT)	11803 (GT)
Jarak pelayaran (S)	2096 (nm)
Kecepatan (Vs)	14 (Knot)
Jumlah muatan	33.303 (Ton)



Gambar 1. *Bulk Carrier* rancangan

2.2 Amonia & *Marine Diesel Oil*

Amonia merupakan bahan bakar yang tidak memiliki unsur karbon dalam struktur kimianya. Senyawa ini diproduksi melalui proses Haber–Bosch, yaitu reaksi antara nitrogen (N_2) dan hidrogen (H_2) pada kondisi tekanan dan suhu tinggi dengan bantuan katalis besi. [2].

Marine Diesel Oil (MDO) adalah bahan bakar yang digunakan pada mesin diesel kapal, terutama pada mesin diesel kecepatan menengah hingga tinggi. [3] Berikut perbedaan karakteristik bahan bakar Amonia dan *Marine Diesel Oil* :

Tabel 2. Karakteristik Amonia & *Marine Diesel Oil* (MDO)

Keterangan	<i>Marine Diesel Oil</i>	Amonia	Sumber
Densitas	890 kg/m ³	696 kg/m ³	Densitas MDO [4] Densitas Amonia [5]

<i>Specific Fuel Consumption (SFC) M/E & A/E</i>	187 g/kWh	370 g/kWh	<i>Specific Fuel Consumption MDO [6] Specific Fuel Consumption Amonia [7]</i>
--	-----------	-----------	---

2.3 Emisi

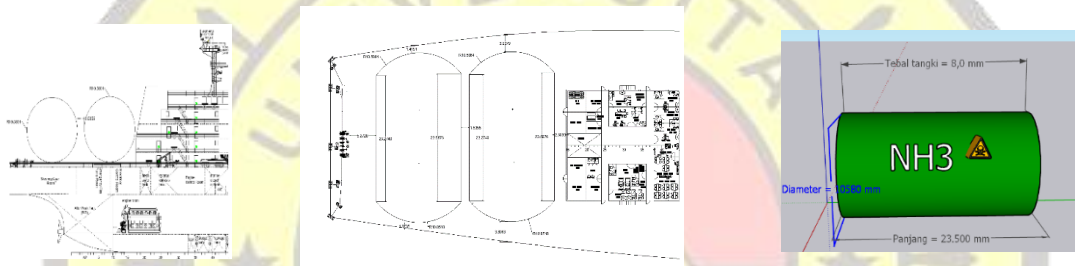
Penggunaan hasil emisi gas buang untuk setiap jenis Nitrogen Oksida (NO_x), Karbon Dioksida (CO₂), Sulfur Oksida (SO_x), dan Particulate Matter (PM 10) dalam (kg emission / ton fuel):

Tabel 3. Perbandingan emisi gas buang MDO dan Amonia

Keterangan	<i>Marine Diesel Oil</i>	Amonia	Sumber
NO _x	70	35	NO _x MDO [8], NO _x Amonia [9]
CO ₂	3200	0	CO ₂ MDO [8], CO ₂ Amonia [10]
SO _x	20	0	SO _x MDO [8], SO _x Amonia [11]
PM 10	1,5	0	PM 10 MDO [8], PM 10 Amonia [12]

2.4 Peletakan tangki Amonia di kapal rancangan

Lokasi penempatan tangki Amonia di kapal rancangan dibagian belakang dekat *superstructure*. Karena untuk mengoptimalkan ruang muatan, menurunkan risiko benturan pada bagian haluan serta mengurangi potensi paparan awak kapal terhadap kebocoran zat yang bersifat toksik. [13]



Gambar 2. Peletakan tangki amonia dibelakang kapal

2.5 Pelabuhan Kwinana Australia dan Pelabuhan Tanjung Perak Indonesia

➤ Pelabuhan Kwinana Australia

Pelabuhan Kwinana merupakan pelabuhan yang berada di kawasan industri berat utama di negara bagian tersebut dan menjadi bagian dari pelabuhan luar Fremantle Port.[14] Proses distribusi amonia dilakukan melalui jaringan pipa yang menghubungkan tangki penyimpanan dengan terminal dermaga kargo curah di Kwinana dengan waktu pengisian bahan bakar Amonia 230 Ton/Jam.[15]

➤ Pelabuhan Tanjung Perak Indonesia

Pelabuhan Tanjung Perak menjadi pelabuhan terbesar dan tersibuk nomor dua di Indonesia setelah pelabuhan Tanjung Priuk Jakarta.[16]. Untuk pengisian amonia di Pelabuhan Tanjung Perak tidak dilakukan secara langsung di area pelabuhan, melainkan melalui kerja sama dengan pihak mitra, yaitu PT Parna Maspion Sejahtera.[17]. Untuk penjelasan kegiatan di pelabuhan Kwinana Australia dan pelabuhan Tanjung Perak Indonesia ada di bagian tabel 8 & 9.



Gambar 3. Pelabuhan Kwinana Australia dan Pelabuhan Tanjung Perak Indonesia

Tabel 4. Karakteristik Pelabuhan Kwinana Australia dan Pelabuhan Tanjung Perak Indonesia

Keterangan	Pelabuhan Kwinana	Pelabuhan Tanjung Perak
Panjang <i>Jetty</i>	498,32 m	6200 m
Sarat Air	12,2 m	14 m
Kapabilitas kapal	60.000 Ton	100.000 Ton

2.6 Waktu *bunkering* & operasional pelabuhan

Waktu yang dibutuhkan dalam proses *bunkering* bahan bakar serta operasional pelabuhan yang terkait dengan kegiatan sandar dan bongkar muat kapal. Data tersebut meliputi laju pengisian bahan bakar MDO dan Amonia, kecepatan alat bongkar muat, serta durasi untuk persiapan kapal, manuver kapal masuk dan keluar, dan kegiatan pelepasan serta pemasangan tali di pelabuhan. Informasi ini digunakan sebagai dasar dalam menganalisis efisiensi operasional kapal di pelabuhan. Untuk waktu *maintenance* per tahun menurut BKI adalah 3 bulan (90 hari) [24]. Berdasarkan karakteristik monsoon di Samudera Hindia Selatan Indonesia, kondisi gelombang tinggi yang berpotensi mengganggu pelayaran pada musim timur dan berlangsung 3 bulan setiap tahun, terdampak 25% per tahun dan masuk waktu *maintenance* per tahun [25]

Tabel 5. Waktu *bunkering* & operasional pelabuhan ($T_{\text{Bunkering \& operasional pelabuhan}}$)

Item	Nilai	Sumber
$T_{\text{Bunkering Marine Diesel Oil}}$	300 Ton/Jam	[18]
$T_{\text{Bunkering Amonia}}$	230 Ton/Jam	[15]
$T_{\text{Ship Unloader}}$	2500 Ton/Jam	[19]
$T_{\text{Grab Hopper}}$	800 Ton/Jam	[20]
$T_{\text{Persiapan kapal}}$	120 Menit	[21]
$T_{\text{Manuver masuk dan keluar masing-masing}}$	120 Menit	[22]
$T_{\text{Pasang dan lepas tali}}$	15 Menit	[23]
$T_{\text{Maintenance dan cuaca kapal 1 tahun}}$	90 Hari	[24 & 25]

2.7 Standard Biaya Operasional

Investasi dan biaya operasional yang terdiri biaya jasa tambat dan jasa pandu di pelabuhan mengikuti harga dari Australia dan Indonesia untuk setiap masing-masing pelabuhan, biaya bahan bakar per ton, *bunkering* per pelayaran. Investasi per kapal terdiri dari alat *scrubber*, *converter* dan *Selective Catalytic Reduction (SCR)* untuk penurunan NOx dengan *life time* kapal adalah 20 tahun. biaya pembuatan tangki Amonia.

Tabel 6. Biaya operasional investasi

Biaya	Harga (Rp)	Sumber
Jasa tambat per pelayaran Australia	10,6 Juta	[26]
Jasa pandu per pelayaran Australia	16,0 Juta	[26]
Jasa tambat dan pandu Indonesia masing-masing per GT	630	[27]
Bahan bakar MDO per ton	15,3 Juta	[28]
<i>Bunkering</i> bahan bakar MDO per pelayaran	6,0 Juta	[29]
Bahan bakar Amonia per ton	6,6 Juta	[30]
<i>Bunkering</i> bahan bakar Amonia per pelayaran	6,0 Juta	[29]
<i>Scrubber</i> per kapal	32,4 Miliar	[31]
<i>Converter</i> bahan bakar Amonia per kapal	117,7 Juta	[32]
<i>Selective Catalytic Reduction (SCR)</i> penurunan NOx	450 Juta	[33]
Rata-rata gaji anak buah kapal (ABK) per bulan; ABK 24 orang	38,7 Juta	[34]
Bongkar / muat per ton	709,3 Juta	[35]
Air bersih kapasitas kapal per ton; kapasitas 7,50 ton	76 Ribu	[36]
Pembuatan tangki Amonia		
Material baja <i>stainless steel</i> per ton tipe 316 L	36,4 Juta	[37]
Kawat las per ton	159,9 ribu	[38]

Batu gerinda penghalus per 1 grinding tebal 6 mm kapasitas 10 m	32 ribu	[39]
Tabung oksigen 40 Liter	1,5 Juta	[40]
Alat penunjang per tangki Amonia	4,7 Juta	[41]
Pekerjaan fabrikasi per ton tangki Amonia		
Rata-rata upah pekerja Australia per 18 orang	62,7 Juta	[42]
sewa truck crane kapasitas 50 ton per hari	6 Juta	[43]
sewa mesin las per bulan	6,5 Juta	[44]
sewa mesin potong per bulan	7,7 Juta	[45]

3. Metodologi

Metode kuantitatif digunakan untuk perhitungan terhadap parameter operasional kapal, yang meliputi waktu efektif pelayaran, perencanaan tangki, perbandingan emisi bahan bakar serta perbandingan biaya operasional penggunaan bahan bakar Amonia dan *Marine Diesel Oil*.

3.1 Total trip dan BBM pelayaran

➤ Perhitungan waktu pelayaran antar pelabuhan ($T_{\text{Pelayaran}}$) [46]

$$T_{\text{Pelayaran}} = \frac{\text{Jarak}}{\text{Kecepatan}} \times 2 \quad (1)$$

➤ Perhitungan waktu efektif pelayaran ($T_{\text{Efektif pelayaran}}$)

$$T_{\text{Efektif pelayaran}} = T_{\text{per tahun}} - T_{\text{Maintenance per tahun}} - T_{\text{Cuaca per tahun}} \quad (2)$$

➤ Perhitungan BBM M/E & A/E pelayaran

$$\text{BBM}_{\text{M/E \& A/E Pelayaran}} = \text{Daya mesin} \times \text{SFC} \times T_{\text{Pelayaran}} \quad (3)$$

➤ Perhitungan waktu bongkar/muat

$$T_{\text{bongkar / muat}} = \frac{\text{Jumlah Muatan}}{\text{Kecepatan alat bongkar muat}} \quad (4)$$

➤ Perhitungan total waktu bongkar muat

$$T_{\text{total bongkar muat}} = T_{\text{Persiapan Kapal}} + T_{\text{Manuver masuk}} + T_{\text{Pasang Tali bongkar/muat}} + T_{\text{bongkar muat}} + T_{\text{lepas tali bongkar/muat}} + T_{\text{Manuver keluar}} \quad (5)$$

➤ Perhitungan waktu *bunkering* bahan bakar [47]

$$T_{\text{bunkering bahan bakar}} = \frac{\text{Jumlah bahan bakar}}{\text{Kecepatan aliran bunkering}} \quad (6)$$

➤ Perhitungan total waktu *bunkering* bahan bakar

$$T_{\text{total bunkering}} = T_{\text{Persiapan Kapal}} + T_{\text{Manuver masuk}} + T_{\text{Pasang Tali}} + T_{\text{bunkering}} + T_{\text{lepas tali}} + T_{\text{Manuver keluar}} \quad (7)$$

➤ Perhitungan total waktu pelabuhan ($T_{\text{Pelabuhan}}$)

$$T_{\text{Pelabuhan}} = T_{\text{total bongkar muat}} + T_{\text{total bunkering}} \quad (8)$$

➤ Perhitungan BBM A/E pelabuhan

$$\text{BBM}_{\text{A/E Pelabuhan}} = \text{Daya mesin} \times \text{SFC} \times T_{\text{Pelabuhan}} \quad (9)$$

➤ Perhitungan total BBM per trip

$$\text{Total}_{\text{BBM per trip}} = \text{BBM}_{\text{M/E \& A/E pelayaran}} + \text{BBM}_{\text{A/E pelabuhan}} \quad (10)$$

➤ Perhitungan waktu trip (T_{Trip})

$$T_{\text{trip}} = T_{\text{Pelayaran}} + T_{\text{pelabuhan}} \quad (11)$$

➤ Perhitungan waktu trip per tahun ($N_{\text{trip per tahun}}$)

$$N_{\text{trip per tahun}} = \frac{T_{\text{Efektif pelayaran}}}{T_{\text{Trip}}} \quad (12)$$

➤ Perhitungan berat LWT dan DWT

$$\text{LWT} = \text{LWT}_{\text{Rancangan}} + W_{\text{Tangki}} \quad (13)$$

$$\text{DWT} = \text{DWT}_{\text{Rancangan}} - (\text{BBM}_{\text{MDO}} + \text{BBM}_{\text{Amonia}}) \quad (14)$$

$$\text{Total berat displacement } (\Delta) = \text{LWT} + \text{DWT}$$

➤ Perhitungan kapasitas angkutan kapal per tahun (K_{AP})

$$K_{\text{AP}} = N_{\text{trip per tahun}} \times \text{jumlah muatan} \quad (15)$$

➤ Perhitungan total BBM per tahun (W_{BBM} per tahun)

$$W_{BBM} \text{ per tahun} = W_{BBM \text{ M/E \& A/E per trip}} \times N_{\text{trip per tahun}} \quad (16)$$

➤ Perhitungan air tawar per tahun ($W_{\text{Air tawar per tahun}}$)

$$W_{\text{Air tawar per tahun}} = W_{\text{air tawar per trip}} \times N_{\text{Trip per tahun}} \quad (17)$$

3.2 Perencanaan tangki Amonia

➤ Perhitungan tebal tangki Amonia (t)

$$t_{\text{Tangki}} = \frac{\text{Tekanan desain} \times \text{radius dalam}}{\text{Tegangan ijin Stainless steel 316 L} \times \text{efisiensi} - (0,6) \times \text{Tekanan desain}} \quad (18)$$

➤ Perhitungan V_{tangki} Amonia (V_{Tangki})

$$V_{\text{tangki}} = \text{Luas lingkaran} \times \text{panjang tangki} \quad (19)$$

➤ Perhitungan berat tangki Amonia (W_{Tangki})

$$W_{\text{Tangki}} = V_{\text{tangki}} \times \text{berat jenis stainless steel 316 L} \quad (20)$$

3.3 Emisi Gas Buang (E_{GB})

➤ Perhitungan hasil E tanpa scrubber per tahun

$$E_{\text{gb non scrubber}} = \text{Total BBM per tahun} \times \text{faktor emisi} \quad (21)$$

➤ Perhitungan hasil emisi per tahun scrubber

$$E_{\text{Scrubber}} = E_{\text{BBM Scrubber}} \times (1 - E_{\text{faktor scrubber}}) \quad (22)$$

➤ Perhitungan hasil emisi NO_x per tahun

$$E_{NO_x} = \text{Total BBM per tahun} \times \text{faktor emisi} \quad (23)$$

➤ Perhitungan hasil emisi CO_2 per tahun

$$E_{CO_2} = \text{Total BBM per tahun} \times \text{faktor emisi} \quad (24)$$

➤ Perhitungan $E_{NO_x \text{ SCR}} = E_{NO_x \text{ per tahun}} - (80\% \times E_{NO_x \text{ per tahun}})$ (25)

3.4 Biaya operasional & invetasi kapal (B_{Total})

➤ Perhitungan biaya jasa pelabuhan Kwinana ($B_{JP \text{ Kwinana}}$)

$$- B_{JP \text{ Kwinana}} = N_{\text{trip per tahun}} \times \text{biaya per pelayanan} \quad (26)$$

- $B_{JT \text{ Kwinana}} = N_{\text{trip per tahun}} \times \text{biaya per pelayanan}$ (27)

➤ Perhitungan biaya jasa pelabuhan Tanjung Perak ($B_{JP \text{ Tanjung Perak}}$)

$$- B_{JP \text{ Tanjung Perak}} = N_{\text{trip per tahun}} \times \text{biaya jasa pandu per GT} \quad (28)$$

- $B_{JT \text{ Tanjung Perak}} = N_{\text{trip per tahun}} \times \text{biaya jasa tambat per GT}$ (29)

➤ Perhitungan biaya bahan bakar (B_{BBM})

$$- B_{BBM \text{ MDO}} = \text{Harga MDO per ton} \times \text{Total}_{BBM} \text{ per tahun} \quad (30)$$

- $B_{BBM \text{ Amonia}} = \text{Harga Amonia per ton} \times \text{Total}_{BBM} \text{ per tahun}$ (31)

➤ Perhitungan biaya gaji anak buah kapal (B_{ABK})

$$B_{ABK} = B_{\text{Rata-rata gaji per tahun}} \times \text{total ABK} \quad (32)$$

➤ Perhitungan biaya air bersih ($B_{\text{Air bersih}}$)

$$B_{\text{Air bersih}} = W_{\text{Air tawar per tahun}} \times B_{\text{Air bersih per ton}} \quad (33)$$

➤ Perhitungan biaya bongkar/muat ($B_{\text{Bongkar Muat}}$)

$$B_{\text{Bongkar Muat}} = B_{\text{Bongkar Muat per ton}} \times \text{jumlah muatan} \times N_{\text{trip per tahun}} \quad (34)$$

➤ Perhitungan biaya total operasional per tahun ($B_{T \text{ operasional}}$)

$$B_{T \text{ operasional}} = B_{JP \text{ Kwinana}} + B_{JP \text{ Tanjung Perak}} + B_{BBM} + B_{ABK} + B_{\text{Air bersih}} + B_{\text{Bongkar Muat}} \quad (35)$$

➤ Biaya investasi ($B_{\text{Investasi}}$)

1. Biaya investasi tangki (B_{IT})

• Biaya material tangki (B_{mt}) = $B_{\text{stainless steel per ton}} \times W_{\text{Tangki}}$ (36)

• Biaya berat kawat las ($B_{W \text{ Kawat las}}$)

$$- \text{Keliling kawat las} = 3,14 \times D_{\text{Tangki}} \quad (37)$$

- Lapisan kawat las = $\frac{\text{Panjang tangki Amonia}}{2}$ (38)

- Jumlah las keliling = Keliling kawat las x (Lapisan kawat las -1) (39)
- Sambungan longitudinal = Lapisan kawat las x P_{Tangki} (40)
- $P_{kawat\ las} = \text{Sambungan jumlah las keliling} + \text{sambungan longitudinal}$ (41)
- $W_{kawat\ las} = W_{estimasi\ kawat\ las\ per\ ton} \times P_{kawat\ las}$ (42)
- $B_{W\ kawat\ las} = B_{kawat\ las} \times W_{kawat\ las}$ (43)
- $B_{Jumlah\ batu\ gerinda} = \left(\frac{\text{Panjang las}}{\text{Kapasitas 10 m}} \right) \times B_{gerinda\ per\ 1\ grinding}$ (44)
- Biaya jumlah tabung oksigen ($B_{JT\ O_2}$)
 - $P_{pemotongan} = 2 \times (K_{kawat\ las} + \frac{\text{Panjang tangki}}{\text{Jumlah course kawat las}})$ (45)
 - Kebutuhan O_2 pemotongan = $P_{potong} \times \text{standard konsumsi } O_2$ (46)
 - Kebutuhan O_2 pengelasan = $P_{kawat\ las} \times \text{standard konsumsi } O_2$ (47)
 - Total kebutuhan $O_2 = \text{Kebutuhan } O_2 \text{ pemotongan} + \text{kebutuhan } O_2 \text{ pengelasan}$ (48)
 - Jumlah tabung $O_2 = (\text{kebutuhan } O_2 / \text{jumlah lapisan kawat las})$ (49)
 - $B_{Total\ tabung\ O_2} = B_{harga\ tabung\ 40\ L} \times \text{Jumlah tabung dibutuhkan}$ (50)
- Biaya fabrikasi tangki (B_{FT})
 - Biaya gaji pekerja tangki (B_{GPT})
 $B_{GPT} = B_{Rata-rata\ gaji\ pekerja} \times \text{total pekerja} \times 4 \text{ bulan pembuatan}$ (51)
 - Biaya sewa crane (B_{SC})
 $B_{SC} = B_{SC\ per\ 50\ ton} \times 4 \text{ bulan pembuatan}$ (52)
 - Biaya sewa mesin potong (B_{SMP})
 $B_{SMP} = B_{SMP\ per\ bulan} \times 4 \text{ bulan pembuatan}$ (53)
 - Biaya sewa mesin las (B_{SML})
 $B_{SML} = B_{SML\ per\ bulan} \times 4 \text{ bulan pembuatan}$ (54)
- Biaya fabrikasi tangki (B_{FT})
 $B_{FT} = B_{GPT} + B_{SC} + B_{SMP} + B_{SML}$ (55)
- Biaya total pembuatan tangki (B_{TPT}) [50]
 $B_{TPT} = B_{mt} + W_{Kawat\ las} + B_{Jumlah\ batu\ gerinda} + B_{TO_2} + B_{FT} + \text{Alat penunjang}$ (56)
- Biaya *Capture Carbon Storage (CCS)*
 $B_{CCS} = B_{CCS\ per\ ton} \times \text{emisi CCS per ton } CO_2$
- Biaya total investasi (B_{TI})
 $B_{TI} = (B_{Scrubber} + B_{Converter} + B_{CCS} + B_{TPT} + B_{SCR}) / \text{life time}$ (57)
- Biaya total operasional dan investasi per tahun (B_{TOI} per tahun)
 $B_{TOI} = \text{Biaya total operasional } (B_{TO}) + \text{Biaya total investasi } (B_{TI})$ (58)

4. Hasil dan Pembahasan

Pembahasan tentang operasional bahan bakar Amonia yang meliputi jumlah total trip dan BBM pelayaran, perhitungan perencanaan tangki serta analisa perbandingan emisi, biaya operasional dan biaya investasi antara bahan bakar

4.1 Total trip dan BBM pelayaran

Total waktu pelayaran dengan menggunakan bahan bakar Amonia dan *Marine Diesel Oil*. Ada beberapa perhitungan didalam menghitung jumlah efektif pelayaran, berikut perhitungannya :

Tabel 8. Waktu efektif pelayaran ($T_{Efektif\ pelayaran}$)

waktu	Jumlah (Hari)
T_{Tahun}	365
$T_{Maintanance\ dan\ cuaca\ per\ tahun}$	90
$T_{efektif\ pelayaran}$	275
$T_{Pelayaran}$	12,46

Tabel 9. Waktu bongkar muat ($T_{\text{Bongkar muat}}$)

Waktu	Pelabuhan kegiatan bongkar/muat	
	Pel. Kwinana (Menit)	Pel. Tanjung Perak (Menit)
$T_{\text{Persiapan kapal (T1)}}$	120	120
$T_{\text{Manuver masuk (T2)}}$	120	120
$T_{\text{Pasang tali (T3)}}$	15	15
$T_{\text{Muat (T4)}}$	799.272	-
$T_{\text{Bongkar (T4)}}$	-	2497.725
$T_{\text{Lepas tali (T5)}}$	15	15
$T_{\text{Manuver keluar (T6)}}$	120	120
Total	1189.272	2887.725
$T_{\text{Bongkar muat}}$	4076.997	

Tabel 10. Waktu bunkering ($T_{\text{Bunkering}}$)

Waktu	Bunkering bahan bakar MDO (Menit)		Bunkering bahan bakar Amonia (Menit)	
	Pel. Kwinana	Pel. Tanjung Perak	Pel. Kwinana	Pel. Tanjung Perak
$T_{\text{Manuver masuk (T7)}}$	120	120	120	120
$T_{\text{Pasang tali (T8)}}$	15	15	15	15
$T_{\text{Bunkering (T9)}}$	60	60	240	240
$T_{\text{Lepas tali (T10)}}$	15	15	15	15
$T_{\text{Manuver keluar (T11)}}$	120	120	120	120
Total	330	330	510	510
$T_{\text{bunkering}}$	660		1020	

Tabel 11. Waktu total pelabuhan ($T_{\text{total BBM per trip}}$)

Waktu	Marine Diesel Oil (Menit)	Amonia (Menit)
$T_{\text{Bongkar muat}}$	4076.997	4076.997
$T_{\text{Bunkering}}$	660	1020
$T_{\text{Pelabuhan}}$	4736.997	5096.997

Tabel 12. Total BBM per trip ($\text{Total}_{\text{BBM per trip}}$)

Item	Marine Diesel Oil (Ton)	Amonia (Ton)
BBM M/E & A/E Pelayaran	452,895	896,103
BBM A/E Pelabuhan	34,13	73,51
Total BBM per trip	487,027	969,609

Berdasarkan hasil analisa, total waktu bongkar muat per trip 4.076,997 menit, proses muat di Pelabuhan Kwinana dan bongkar di Pelabuhan Tanjung Perak, waktu bunkering Amonia 1.020 menit lebih lama dibandingkan MDO 660 menit karena proses pengisian bahan bakar yang lebih panjang. total waktu pelabuhan sebesar 4.736,997 menit per trip MDO dan 5.096,997 menit per trip Amonia.

Tabel 13. Jumlah trip per tahun ($N_{\text{trip per tahun}}$)

Parameter	Marine Diesel Oil	Amonia
$T_{\text{Efektif pelayaran}}$	275 Hari	275 Hari
T_{Trip}	15.75 Hari per trip	16.00 Hari per trip
$N_{\text{trip per tahun}}$	17,46 Trip	17,19 Trip

Berdasarkan hasil analisa kapal berbahan bakar MDO memiliki waktu trip yang sedikit lebih singkat 15,75 hari/trip dibandingkan Amonia 16,00 hari/trip akibat waktu sandar di pelabuhan yang lebih lama. Dengan waktu efektif pelayaran 275 hari per tahun, kapal MDO mampu melakukan 17,46 trip per tahun, sedangkan kapal amonia 17,19 trip per tahun

Tabel 14. Perbandingan LWT & DWT bahan bakar

Berat	Marine Diesel Oil (Ton)	Amonia (Ton)
Light Weight Ton	4,571.60	4,621.44
Dead Weight Ton	33,951.00	34,433.58
Total	38,522.60	39,055.02

Tabel 15. Total kapasitas angkutan kapal per tahun (K_{AP})

Item	Marine Diesel Oil	Amonia
Kapasitas muat kapal ton	33,303	32,333.39
K_{AP} Ton per tahun	581,542,50	555,788.05

Berdasarkan hasil analisa perhitungan diatas menunjukkan bahwa penggunaan Amonia menambah berat LWT sebesar 49,84 ton, sedangkan DWT turun sebesar 482,58 ton. Kapasitas muat kapal per ton pada Amonia turun menjadi 32,333.39 ton dikarenakan ada penambahan tangki Amonia dan hasil kapasitas angkutan kapal per ton Amonia lebih turun 25,754.45 ton atau 4,43% dibandingkan MDO.

Tabel 16. Total BBM & Air bersih per tahun (W_{BBM} per tahun & W_{Air} bersih per tahun)

Item	Marine Diesel Oil (Ton/tahun)	Amonia (Ton/tahun)
W_{BBM} per tahun	8,504.538	16,666.898
W_{Air} bersih per tahun	130.97	128.92

Berdasarkan hasil analisa kapal berbahan bakar Amonia memiliki kapasitas angkut tahunan yang hampir sama dengan kapal berbahan bakar MDO 581,542.5 ton/tahun dan Amonia 572,454.9 ton/tahun. Penggunaan Amonia tahunan yang lebih besar 16,666.898 ton/tahun dibandingkan MDO 8,504.538 ton/tahun, serta kebutuhan air bersih yang sedikit lebih tinggi 130.97 ton/tahun dibandingkan 128.92 ton/tahun.

4.2 Perencanaan tangki Amonia

Tekanan desain yang digunakan berukuran 16 kpa [48]. Tegangan ijin digunakan 133000 kpa [49]. Efisiensi tangki yang digunakan diasumsikan sebesar 100% [50]. Berat baja *stainless steel 316 L* adalah 7,98 Ton/m³. [51]. Berdasarkan hasil analisa perhitungan diatas menunjukkan bahwa tangki Amonia memiliki tebal 8,23 mm tetapi sesuai katalog pelat adalah 9 mm [52] maka dipilih pelat dengan ketebalan 9 mm. Memiliki volume 780,70 m³ dan berat tangki 49,84 ton. Nilai tersebut menunjukkan bahwa tangki memiliki kapasitas penyimpanan yang direncanakan.

Tabel 17. Tebal tangki Amonia, volume tangki Amonia, berat tangki Amonia

Parameter	Hasil
T Tangki	8,23 mm
V Tangki	780,70 m ³
W Tangki	49.84 Ton

4.3. Emisi Gas Buang (E_{GB})

Hasil perbandingan emisi antara *Marine Diesel Oil* & Amonia dengan menggunakan *Scrubber* & non *Scrubber*. Bagian NO_x tidak menggunakan *scrubber* tapi menggunakan SCR. dan emisi NO_x dengan menggunakan SCR untuk penurunan NO_x sesuai peraturan IMO Tier III sebanyak 80%. [53]. Bagian CO₂ menggunakan *scrubber* tetapi sistemnya dengan *Onboard Carbon Capture (OCC)* dengan efisiensi sebesar 70% [54]. Penggunaan *scrubber* dimulai di emisi SO_x sebesar 98% [55] dan emisi PM₁₀ sebesar 95% [56]

Tabel 18. Perbandingan hasil emisi bahan bakar per tahun

Jenis emisi	Tanpa scrubber (Ton/tahun)		Scrubber (Ton/tahun)		SCR (Ton/tahun)	
	Marine Diesel Oil	Amonia	Marine Diesel Oil	Amonia	Marine Diesel Oil	Amonia

NO _x	59,531.78	583.34	59,531.78	-	11,906.36	116.67
CO ₂	2,721,452.80	-	816,435.84	-	816,435.84	-
SO _x	17,009.08	-	340.18	-	340.18	-
PM 10	1,275.68	-	63.78	-	63.78	-

Berdasarkan hasil analisa perhitungan diatas untuk hasil emisi pada NO_x MDO lebih besar dibandingkan Amonia dengan menggunakan tanpa *Scrubber*, *Scrubber & SCR* dan jenis emisi CO₂, SO_x dan PM₁₀ hasil emisinya sama dibagian SCR. Jadi penggunaan BBM Amonia bisa menjadi BBM alternatif yang mampu mengurangi emisi gas rumah kaca

4.4 Biaya operasional investasi (B_{TOI})

Dalam hasil biaya operasional dan investasi untuk bagian kebutuhan lapisan kawat las untuk tangki dengan tebal 8,23 mm berdasarkan modul pelatihan las SMAW (*Shield Metal Arc Welding*)[57]. Untuk bagian kebutuhan konsumsi O₂ berdasarkan modul ASM Internasional (*Handbook on Oxyfuel Gas Welding*) panjang las 136,9 m kebutuhannya adalah 4 liter per meter [58]

Tabel 19. Perbandingan biaya total operasional per tahun

Item	Marine Diesel Oil (Rp)	Amonia (Rp)
B _{JP Kwinana}	465,483,600.00	458,285,400.00
B _{JP Tanjung Perak}	260,321,266.80	256,295,680.20
B _{BBM}	170,070,876,000.00	110,006,132,940.00
B _{ABK}	5,501,100,000,000.00	5,501,100,000,000.00
B _{Air Bersih}	9,952,200.00	9,798,300.00
B _{Bongkar Muat}	12,385,319,094.00	11,838,773,960.70
B _{Total operasional}	5,684,291,952,160.80	5,623,669,286,280.90

Tabel 21. Perbandingan biaya total investasi

Item	Marine Diesel Oil (Rp)	Amonia (Rp)
B _{Scrubber}	32,400,000,000	32,400,000,000
B _{Converter}	-	117,700,000.00
B _{Pembuatan tangki}	-	6,778,150,707
B _{SCR}	450,000,000	450,000,000
B _{Total Investasi}	1,642,500,000	1,987,292,535

Tabel 22. Perbandingan biaya total operasional dan investasi (B_{TOI})

Item	Marine Diesel Oil (Rp)	Amonia (Rp)
B _{TO}	5,684,291,952,160.80	5,623,669,286,280.90
B _{TI}	1,642,500,000	1,987,292,535
B _{TOI}	5,685,934,452,160.80	5,625,656,578,816.24

Berdasarkan hasil analisa perhitungan diatas, total biaya operasional dan investasi (B_{TOI}) kapal berbahan bakar Amonia sebesar Rp5.625,656,578,816.24, lebih rendah dibandingkan kapal berbahan bakar marine diesel oil sebesar Rp5.685.934.452.160,80. Walaupun biaya investasi sistem amonia lebih tinggi, biaya operasionalnya yang lebih rendah mampu mengimbangi peningkatan investasi tersebut. Oleh karena itu, penggunaan amonia memberikan keuntungan ekonomi yang lebih baik dalam jangka panjang dibandingkan *Marine Diesel Oil*.

5. Kesimpulan

1. Analisa kebutuhan BBM per tahun Amonia lebih besar 8,162.36 ton atau 95,98% disbanding MDO dikarenakan perbedaan kebutuhan BBM per tahun. Pada kondisi DWT yang tetap maka kapasitas ruang muat berkurang sebesar 969.61 ton atau 2,91% karena penambahan BBM. Berat LWT Amonia naik 49,84

- ton atau 1,09% dibandingkan LWT rancangan karena ada penambahan tangki, sedangkan DWT Amonia untuk muatan turun sebesar 482,58 ton atau 1,42% dibandingkan DWT rancangan kapal.
2. Perbedaan emisi antara MDO dan Amonia pada penggunaan non *scrubber* pada jenis emisi NO_x adalah pada Amonia lebih rendah 58,948.44 ton atau 99,002% dibandingkan emisi NO_x MDO tetapi pada Amonia jenis emisi CO₂, SO_x, PM₁₀ pada penggunaan non *scrubber* dan *scrubber* tetap nol. Untuk emisi menggunakan *scrubber* hasil emisi NO_x sama dengan yang tanpa menggunakan *scrubber* yang berubah ada di CO₂ perbedaan nya 1,905,016.96 ton atau 70% dibandingkan CO₂ tanpa *scrubber*. Pada jenis emisi SO_x perbedaan nya 16,668.90 ton atau 98% dibandingkan SO_x tanpa *scrubber* dan PM₁₀ perbedaan nya 1,211.90 ton atau 95% dibandingkan PM₁₀ tanpa *scrubber*. Pada jenis emisi NO_x penggunaan SCR pada MDO dan Amonia pengurangannya sama 80% pada NO_x MDO memakai SCR perbedaannya 47,625.42 ton dibandingkan NO_x tanpa SCR, NO_x Amonia memakai SCR perbedaannya 466.67 ton dibandingkan NO_x tanpa SCR. Untuk jenis emisi CO₂, SO_x dan PM₁₀ sama hasilnya dengan emisi dengan *scrubber*.
 3. Perbedaan hasil biaya operasional per tahun antara MDO dan Amonia lebih mahal MDO perbedaannya Rp 60,62 miliar atau 1,07% dibandingkan Amonia. Hasil biaya investasi antara MDO dan Amonia, lebih mahal Amonia perbedaannya Rp 344,79 Juta atau 20,99% dibandingkan MDO dan total biaya keseluruhan MDO lebih mahal dibandingkan Amonia karena perbedaan biaya bahan bakar

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada Fakultas Teknologi Kelautan Universitas Darma Persada, dan pihak yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini..

Daftar Pustaka

- [1] Achmad Bilal Mahesa Pradana, "Tugas Desain Kapal," Fakultas Teknologi Kelautan, Universitas Darma Persada, Jakarta, Indonesia, 2025.
- [2] R. Meilinda, P. Amelia, D. Anggraini, and H. Pardi, "Environmentally Friendly Maritime Fuel Alternative: A Review," vol. 9, no. 1, pp. 12–26, 2024..
- [3] M. D. Oil, W. Emulsified, and M. D. Oil, "Marine Diesel Oil and Water-In-Oil Emulsified Marine Diesel Oil," *Energies*, vol. 11, no. 7, pp. 1–16, 2018, doi: 10.3390/en11071830.
- [4] ExxonMobil, "Marine Distillate Fuels ISO 8217:2017," [Online]. Available: <https://www.exxonmobil.com/en/marine/technicalresource/marine-resources/marine-distillate-fuels-iso-8217-2017>. [Accessed: May 18, 2026].
- [5] The Engineering ToolBox, "Ammonia Thermophysical Properties," [Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/ammonia-d_1413.html. [Accessed: May 18, 2026].
- [6] MAN Energy Solutions, "Marine Engine Programme Diesel Oil Catalogue," 2024.
- [7] J. Zhang, Z. Zhang, and D. Liu, "Optimization of Carbon Emission Reduction Investment for Replacement Fuel Ships Based on the Shipowners' Perspective," 2025.
- [8] H. Saputra, "Update Estimasi Emisi Gas Buang Kapal di Perairan Batam–Singapore Menggunakan Data AIS," 2018.
- [9] K. A. Pedersen, Lewandowski, and M. Pasternak, "Ammonia in Dual Fueled Internal Combustion Engines," *Energy & Fuels*, 2023.
- [10] Lloyd's Register, "A Close Look at the Benefits, Drawbacks and Current Status of Ammonia as a Potential Marine Fuel as the Shipping Industry Transitions to a Zero Carbon Future," [Online]. Available: <https://www.lr.org/en/knowledge/horizons/april-2021/decarbonising-shipping--could-ammonia-be-the-fuel-of-the-future>. [Accessed: May 18, 2026].
- [11] V. Georgia, "Ammonia as a Marine Fuel Towards Decarbonization Emission Control Changes," 2023.
- [12] Maersk Mc-Kinney Moller Center for Zero Carbon Shipping, "Managing Emissions from Ammonia Fueled Vessels," 2023.
- [13] Lloyd's Register, "Ammonia as Fuel: Quantitative Risk Assessment Ranks Safety Issues," [Online]. Available: <https://www.lr.org/en/knowledge/horizons/september-2023/ammonia-as-fuel-quantitative-risk-assessment-ranks-safety-issues>. [Accessed: May 19, 2026].
- [14] Westport, Government of Western Australia, "Why Kwinana is the Answer," [Online]. Available: <https://westport.wa.gov.au/info-hub/news/why-kwinana-is-the-answer>. [Accessed: May 19, 2026]
- [15] Environmental Protection Authority, "Kwinana Ammonia Project: Kwinana Industrial Area Change to Environmental Conditions to Allow Ammonia Export," Mar. 2003.
- [16] M. F. Syarifuddin, "Bagi Perekonomian Jawa Timur (Studi pada PT Pelindo III Tanjung Perak

- Surabaya)," vol. 35, no. 1, pp. 172–178, 2016.
- [17] Bisnis Surabaya, "Bangun Tangki Amonia 6.000 MT, Ini Rencana PT Parna Maspion Sejahtera," [Online]. Available: <https://surabaya.bisnis.com/read/20220930/532/1582939/bangun-tangki-amonia-6000-mt-ini-rencana-parna-maspion-sejahtera>. [Accessed: May 19, 2026].
- [18] *Marine Insight*, "The Ultimate Guide to Fuel Oil Bunkering Process on Ships," [Online]. Available: <https://www.marineinsight.com/the-ultimate-guide-to-fuel-oil-bunkering-process-on-ships/>. [Accessed: May 19, 2026].
- [19] K. Alat, "Dasar Coal Handling System," repository Universitas Diponegoro pp. 9–30, 2018.
- [20] Jafari, H. (2013). *Selecting Appropriate Quayside Equipment for Grain Unloading Using TOPSIS and Entropy Shannon Methods*. 3(4), 1072–1078
- [21] BBI Agency, "PT Bandar Berlayar Internasional: Info Pelabuhan Dumai," 2022.
- [22] S. Burhani, A. A. Humanerah, and S. M. Amin, "Tingkat Pencapaian Standar Waktu Pelayanan di Pelabuhan Parepare," 2023.
- [23] G. Rutkowski, "A Comparison Between Conventional Buoy Mooring (CBM), Single Point Mooring (SPM) and Single Anchor Loading (SAL) Systems Considering the Hydro-Meteorological Condition Limits for Safe Ship Operation Offshore," vol. 13, no. 1, pp. 187–195, 2019.
- [24] R. S. Aminata and M. Basuki, "Analisis Perbandingan Produktivitas Jam Kerja Pada Proyek Reparasi Kapal TB Ampenan 01 Dengan Metode Critical Path Method dan Critical Chain Project Management di Galangan Kapal Madura," *Institut Adhi Tama Surabaya*.
- [25] A. Aryono, "Di Pusaran Angin Musim Barat," *Historia*, Dec. 6, 2017. [Online]. Available: [Historia.id](https://historia.id). [Accessed: Jun. 26, 2026].
- [26] C. Charges, "Fremantle Ports Ship and Cargo Charges," pp. 1–7, Jul. 2024.
- [27] Pemerintah Republik Indonesia, *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 54 Tahun 2009 tentang Jenis dan Tarif atas Jenis Penerimaan Negara Bukan Pajak yang Berlaku pada Badan Pusat Statistik*, Jakarta, Indonesia, Sep. 2009.
- [28] *Ship & Bunker*, "Latest Prices," [Online]. Available: <https://shipandbunker.com/prices/apac/sea/sg-singapore#MDO>. [Accessed: May 11, 2026].
- [29] Financial Model Lab, "Marine Bunkering Service Running Cost," [Online]. Available: <https://financialmodelslab.com/blogs/operating-costs/bunkering-service>. [Accessed: May 11, 2026].
- [30] Argus Media, "Argus Ammonia Daily Market Prices and News in Asia Pacific and Europe," vol. 34, 2025
- [31] Kapal dan Logistik, "Fungsi Penggunaan Scrubber pada Kapal," [Online]. Available: <https://kapal.logistik>. [Accessed: May 11, 2026].
- [32] Alibaba, "Industrial Hydrogen Production Belt Purification Converter," [Online]. Available: <https://indonesian.alibaba.com/product-detail/Industrial-Hydrogen-Production-Belt-Purification-Converter>. [Accessed: May 11, 2026].
- [33] PT Representasi Mitra Mandiri, "Selective Catalytic Reduction (SCR) Genset dan Alat Mekanik Lainnya," [Online]. Available: <https://representasimitramandiri.web.indotrading.com/product/selective-catalytic-reduction-scr-genset->. [Accessed: Jun. 24, 2026].
- [34] Profesea, "Gaji Pelaut 2026 Indonesia: Dari AB hingga Captain," Profesea, May 18, 2026. [Online]. Available: [Profesea Article](https://profesea.com). [Accessed: Jun. 24, 2026].
- [35] World Ports Organization, "Port Disbursement Guides of Kwangyang Port," *worldports.org*, 2025. [Online]. Available: <https://www.worldports.org/port-disbursement-guides-of-kwangyang-port/>. [Accessed: Jun. 24, 2026].
- [36] BUP PT. Delta Artha Bahari Nusantara, "Lampiran Surat Keputusan Direksi tentang Tarif Pelayanan Jasa Kepelabuhanan dan Jasa Terkait dengan Kepelabuhanan pada Terminal Umum DABN Pelabuhan Probolinggo Tahun 2024," 2024.
- [37] Sutindo Store, "Pipa Stainless Steel 316L" Sutindo Store. [Online]. Available: [Sutindo Store Product Page](https://sutindo.com). [Accessed: 25-Jun-2026]
- [38] Wanzhi Steel, "Harga Gulungan/Lembaran Baja Tahan Karat – Pembaruan Mingguan," Wanzhi Steel, 2025. [Online]. Available: [Wanzhi Steel Stainless Steel Prices](https://wanzhi.com). [Accessed: Jun. 17, 2026]
- [39] MonotaRO Indonesia, "Batu Gerinda Potong Stainless Steel WA Cutting Wheel," MonotaRO Indonesia. [Online]. Available: [MonotaRO Indonesia Product Page](https://monota.com). [Accessed: Jun. 24, 2026].
- [40] Pandawa Teknik Gas, "Produk pada Shopee Indonesia." [Online]. Available: [: Halaman produk Shopee](https://shopee.com) [Accessed: Jun. 21, 2026].
- [41] E. F. Hasan, *Pembuatan Database Estimasi Harga Tangki dengan Perangkat Lunak*, , 2024.

- [42] Tourism Australia, "How Much Can You Earn in Australia?," *Australia.com*. [Online]. Available: Australia.com – How Much Can You Earn in Australia?. [Accessed: Jun. 21, 2026]
- [43] CV Mandiri Crane, "Daftar Harga Sewa Crane 5–200 Ton Terbaru 2026," *Mandiri Crane*. [Online]. Available: <https://mandiricrane.co.id/crane/harga-sewa-crane-terbaru/>. [Accessed: Jun. 21, 2026].
- [44] PaDi UMKM, "Jasa Sewa Mesin Las 600A," *PaDi UMKM*. [Online]. Available: <https://padiumkm.id/product/jasa-sewa-mesin-las-600a/632aaa0f8acaf63c2761512e>. [Accessed: Jun. 21, 2026].
- [45] PT. Agusta Mitra Sukses (AMS), "Sewa Mesin Barbender," *AMS Jakarta*. [Online]. Available: <https://www.ams-jkt.com/product/sewa-mesin-barbender-p365505.aspx>. [Accessed: Jun. 21, 2026].
- [46] Atanasius, Christofel, and Maria, "Perancangan Track Pelayaran Kapal Penangkapan Ikan," vol. 9, no. 3, pp. 333–339, 2025.
- [47] P. Perrier, I. Grair, and G. Meolans, "Mass Flow Rate Measurements in Gas Micro Flows," 2006.
- [48] H. Akhmad Firdaus, "Analisis HAZOP dan Penentuan Safety Integrity Level Menggunakan Metode Fault Tree Analysis pada Ammonia Refrigeration Pabrik Amoniak Unit I PT. Petrokimia Gresik," Undergraduate Thesis, Departemen Teknik Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya, Indonesia, 2018
- [49] Vibromera, "Allowable Stress Calculator | ASME VIII / EN 13445," Vibromera. [Online]. Available: <https://vibromera.eu/calculators/allowable-stress-by-material/?mat=S355&code=EN>. [Accessed: Jun. 30, 2026].
- [50] "ASME Section VIII Division 1 — Complete Overview," *Welding Fabrication World*. [Online]. Available: <https://www.weldfabworld.com/asme-section-viii-division-1/>. [Accessed: 30-Jun-2026].
- [51] Density of Stainless Steel 316L," *Seather Technology*, Apr. 12, 2025. [Online]. Available: <https://seathertechnology.com/id/density-of-stainless-steel-316l/>. [Accessed: Jun. 30, 2026]
- [52] Outokumpu, *Outokumpu Supra Range Datasheet*, Outokumpu Oyj. [Online]. Available: <https://www.outokumpu.com/-/media/files/products/supra/outokumpu-supra-range-datasheet.pdf>. [Accessed: 30-Jun-2026].
- [53] *International Maritime Organization, Second IMO GHG Study 2009*. London, U.K.: International Maritime Organization, 2009.
- [54] *Global Centre for Maritime Decarbonisation, "Life Cycle Study of Onboard Carbon Capture and Storage (OCCS)," 2025*. [Online]. Available: <https://www.gcformd.org/gcforms-life-cycle-study-quantifies-net-ghg-emissions-savings-for-pathways-with-onboard-carbon-capture-and-storage-occs/>. [Accessed: Jul. 1, 2026].
- [55] *International Maritime Organization (IMO), 2021 Guidelines for Exhaust Gas Cleaning Systems, Resolution MEPC.340(77), adopted Nov. 26, 2021*. London, U.K.: IMO, 2021.
- [56] B. Comer and D. Rutherford, *Marine Scrubber Systems: Economic, Environmental, and Operational Implications*. Washington, DC, USA: International Council on Clean Transportation (ICCT), 2016
- [57] K. A. Wardana, *Modul Nomor 11: Pembuatan Sambungan Butt Joint dengan Las SMAW Posisi 3G*. Semarang, Indonesia: Departemen S1 Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, 2020. [Online]. Available: Scribd. [Accessed: Jul. 2, 2026].
- [58] R. L. O'Brien, "Oxyfuel Gas Welding," in *ASM Handbook*, vol. 6, *Welding, Brazing, and Soldering*, Materials Park, OH, USA: ASM International, 1993. doi: 10.31399/asm.hb.v06.a0001372