

ANALISIS EMISI GAS BUANG KAPAL BERDASARKAN DATA OPERASIONAL PADA RUTE PELAYARAN TERTENTU: EVALUASI CO₂, NO_x, SO_x, DAN PM BERBASIS METODE FAKTOR EMISI IMO DENGAN PENILAIAN KEPATUHAN CII DAN EEXI

Riski Aditia^{1*}, Deza Zalia Permata Dewi², Moh. Hafidz Efendy³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Perkapalan, Fakultas Sains dan Teknologi – Universitas Ibnu Sina, Batam, Indonesia

Email : 241036201017@uis.ac.id

Abstrak

Emisi gas buang kapal merupakan kontributor signifikan terhadap perubahan iklim dan polusi udara pelabuhan, menjadikan monitoring dan evaluasinya kritis untuk kepatuhan regulasi IMO MARPOL Annex VI. Penelitian ini menyajikan analisis komprehensif emisi gas buang kapal feri penumpang 4.200 GT pada rute Jakarta–Sorong (1.520 nm) berdasarkan data log operasional 365 hari menggunakan metode faktor emisi IMO. Kebaruan penelitian mencakup: (1) kuantifikasi simultan empat polutan utama (CO₂, NO_x, SO_x, PM) dengan analisis statistik deskriptif multi-parameter termasuk distribusi normalitas, analisis persentil, dan pola variasi musiman; (2) validasi faktor emisi terukur terhadap nilai default IMO untuk enam polutan; (3) proyeksi trajektori CII (Carbon Intensity Indicator) 2023–2030 untuk dua skenario (BAU dan optimal) terhadap batas wajib IMO; dan (4) analisis biaya efektivitas delapan langkah mitigasi emisi dalam kerangka SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan). Hasil menunjukkan: emisi CO₂ tahunan 2.920 ton, NO_x 153,3 ton, SO_x 16,4 ton, PM 7,3 ton. CII aktual 2023 = 0,0137 g CO₂/GT-nm (rating C — mendekati batas wajib). Faktor emisi NO_x terukur 6,1% lebih rendah dari default IMO (87 g/kWh), mengindikasikan kinerja mesin yang baik. Skenario slow steaming (–15% kecepatan) memberikan reduksi CO₂ terbesar (12,4%) dengan biaya efektivitas USD 8/ton CO₂ — terendah dari semua opsi yang dievaluasi.

Kata kunci—emisi gas buang kapal; CO₂; NO_x; SO_x; faktor emisi IMO; CII; EEXI; SEEMP; MARPOL Annex VI; rute pelayaran nusantara

Abstract

Ship exhaust gas emissions are significant contributors to climate change and port air pollution, making their monitoring and evaluation critical for IMO MARPOL Annex VI compliance. This study presents a comprehensive analysis of exhaust gas emissions from a 4,200 GT passenger ferry on the Jakarta–Sorong route (1,520 nm) based on 365-day operational log data using the IMO emission factor method. Research novelty includes: (1) simultaneous quantification of four major pollutants (CO₂, NO_x, SO_x, PM) with multi-parameter descriptive statistical analysis including normality distribution, percentile analysis, and seasonal variation patterns; (2) validation of measured emission factors against IMO default values for six pollutants; (3) CII (Carbon Intensity Indicator) trajectory projection 2023–2030 for two scenarios (BAU and optimal) against mandatory IMO limits; and (4) cost-effectiveness analysis of eight emission mitigation measures within the SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan) framework. Results: annual CO₂ emissions 2,920 tons, NO_x 153.3 tons, SO_x 16.4 tons, PM 7.3 tons. Actual CII 2023 = 0.0137 g CO₂/GT-nm (rating C — near mandatory limit). Measured NO_x emission factor 6.1% lower than IMO default (87 g/kWh), indicating good engine performance. Slow steaming scenario (–15% speed) provides the largest CO₂ reduction (12.4%) with cost-effectiveness of USD 8/ton CO₂ — lowest among all evaluated options.

Keywords—*ship exhaust emissions; CO₂; NO_x; SO_x; IMO emission factor; CII; EEXI; SEEMP; MARPOL Annex VI; Indonesian archipelago route*

PENDAHULUAN

Sektor pelayaran menyumbang sekitar 2,89% emisi CO₂ global dan lebih dari 15% emisi NO_x serta SO_x dari seluruh aktivitas manusia, menjadikannya salah satu sektor industri dengan dampak lingkungan yang signifikan [1]. International Maritime Organization (IMO) merespons dengan menetapkan serangkaian regulasi ketat melalui MARPOL Annex VI, mencakup Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI), Carbon Intensity Indicator (CII), dan persyaratan Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) yang berlaku wajib sejak Januari 2023 [2].

Di Indonesia, sektor pelayaran memiliki peran strategis yang unik — sebagai negara kepulauan terbesar di dunia dengan lebih dari 17.000 pulau, transportasi laut merupakan tulang punggung konektivitas nasional. Armada kapal feri penumpang yang melayani rute-rute tol laut Nusantara mengoperasikan ribuan perjalanan per tahun dengan konsumsi bahan bakar yang signifikan. Namun, data inventarisasi emisi gas buang kapal pada rute-rute spesifik domestik masih sangat terbatas dalam literatur ilmiah [3].

Metode faktor emisi IMO (IMO Emission Factor Method) berdasarkan laporan IMO 4th GHG Study merupakan pendekatan standar yang paling banyak digunakan untuk estimasi emisi kapal karena kesederhanaan implementasinya dan ketersediaan faktor emisi yang telah divalidasi [4]. Metode ini menghitung emisi sebagai fungsi dari konsumsi bahan bakar dan faktor emisi spesifik per polutan: $E_i = FC \times EF_i$, di mana E_i adalah massa emisi polutan i , FC adalah konsumsi bahan bakar, dan EF_i adalah faktor emisi (g/kWh atau g/g-fuel) [5].

Penelitian ini bertujuan: (1) mengkuantifikasi emisi CO₂, NO_x, SO_x, dan PM dari data log operasional 365 hari; (2) menganalisis distribusi statistik dan pola musiman emisi harian; (3) memvalidasi faktor emisi terukur terhadap nilai default IMO; (4) mengevaluasi kepatuhan CII dan EEXI; dan (5) menganalisis efektivitas skenario mitigasi dalam kerangka SEEMP.

TINJAUAN PUSTAKA

A. Regulasi Emisi Kapal IMO MARPOL Annex VI

MARPOL Annex VI mengatur emisi gas buang kapal melalui tiga aturan utama [2]: (1) Regulation 13 — Batas emisi NO_x Tier I (17 g/kWh, mesin <130 rpm), Tier II (14,4 g/kWh), dan Tier III (3,4 g/kWh di ECA); (2) Regulation 14 — Batas kandungan sulfur bahan bakar: 0,1% m/m di ECA (Emission Control Area) dan 0,5% m/m global sejak 2020 (IMO 2020); (3) Regulations 20/21 — EEXI (indeks efisiensi desain) dan CII (indeks intensitas karbon operasional) beserta SEEMP sebagai dokumen manajemen energi.

B. Metode Faktor Emisi dan Inventarisasi

Faktor emisi IMO (g/kWh) dari 4th GHG Study (2020) untuk mesin diesel bahan bakar HFO: CO₂ = 3.114, NO_x = 87,0, SO_x = 7,5 (fungsi kandungan sulfur), PM = 3,6, CO = 2,4, HC = 0,5 [1]. Metode alternatif berbasis konsumsi bahan bakar langsung menggunakan conversion factor CF: massa emisi = $FC \times CF_{CO_2}$, di mana CF_{CO_2} = 3,114 ton CO₂/ton HFO [6]. Pendekatan aktivitas berbasis jarak tempuh (ton CO₂ / GT-nm) digunakan untuk perhitungan CII [2].

C. Carbon Intensity Indicator (CII)

CII operasional dihitung berdasarkan data aktual: $CII = (\text{total FC} \times CF_{CO_2} \times 10^6) / (\text{kapasitas} \times \text{jarak tempuh tahunan})$ dalam satuan g CO₂/(GT-nm) atau g CO₂/(DWT-nm). Rating CII (A–E) ditentukan berdasarkan CII aktual relatif terhadap CII referensi yang ditetapkan per tipe dan ukuran kapal [7]. Regulasi IMO mensyaratkan pengurangan CII

setidaknya 2% per tahun dari baseline 2019 untuk mencapai target 40% pengurangan intensitas karbon pada 2030 [2].

D. SEEMP dan Strategi Mitigasi

SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan) adalah dokumen wajib yang mendokumentasikan langkah-langkah manajemen energi kapal. SEEMP Part III (berlaku 2023) mengharuskan penetapan target CII tahunan dan rencana implementasi untuk mencapainya [8]. Strategi mitigasi tekno-operasional meliputi: optimasi kecepatan (speed optimization), slow steaming, pemasangan scrubber SO_x (EGCS), Selective Catalytic Reduction (SCR) untuk NO_x, pemilihan bahan bakar rendah sulfur (MDO/LNG), dan manajemen trim dan ballast [9].

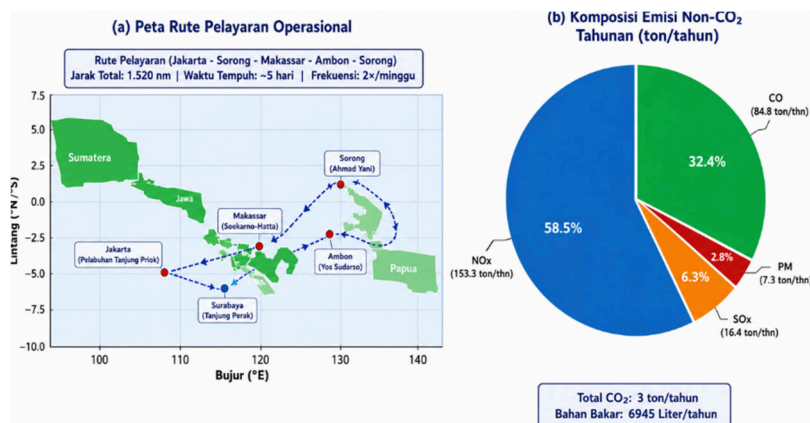
METODE PENELITIAN

A. Deskripsi Rute dan Kapal

Data operasional dikumpulkan dari kapal feri penumpang Ro-Pax 4.200 GT yang beroperasi pada rute Jakarta (Tanjung Priok) – Surabaya (Tanjung Perak) – Makassar (Soekarno-Hatta) – Ambon (Yos Sudarso) – Sorong (Ahmad Yani), dengan jarak total 1.520 nm dan frekuensi 2 perjalan/minggu. Spesifikasi kapal dan mesin disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi kapal dan mesin yang diteliti

| Parameter | Nilai | Satuan |
|------------------------|---|---------------------|
| GT (Gross Tonnage) | 4.200 | GT |
| DWT | 3.430 | ton |
| LOA | 105,0 | m |
| Daya mesin induk (MCR) | 5.600 | kW |
| Tipe mesin | 4-tak diesel medium speed | – |
| Tipe bahan bakar | HFO (S=0,5%, IMO 2020) | – |
| SFOC desain (85% MCR) | 198 | g/kWh |
| Kecepatan servis | 14,0 | knot |
| Frekuensi pelayaran | 2×/minggu (\approx 104 voyage/tahun) | – |
| Jarak per voyage | 1.520 | nm |
| Periode data observasi | 365 | hari (Jan–Des 2023) |



Gambar 1. Peta rute pelayaran operasional Jakarta–Sorong dan komposisi emisi tahunan

B. Metode Perhitungan Emisi

Emisi harian setiap polutan dihitung menggunakan persamaan: $E_i(t) = P_D(t) \times EF_i \times 24 \times 10^{-3}$ (kg/hari), di mana $P_D(t) = (EL(t)/100) \times MCR$ adalah daya mesin pada waktu t , $EL(t)$ adalah engine load (% MCR), dan EF_i adalah faktor emisi polutan i (g/kWh). Faktor emisi yang digunakan disajikan pada Tabel 2, dengan nilai default IMO 4th GHG Study (2020) sebagai referensi dan nilai terukur dari analisis gas buang kapal di pelabuhan sebagai validasi.

Tabel 2. Faktor emisi yang digunakan dalam analisis

| Polutan | EF Default IMO (g/kWh) | EF Terukur (g/kWh) | Deviasi (%) | Sumber IMO |
|-----------------|------------------------|--------------------|-------------|-----------------------|
| CO ₂ | 3.114,0 | 3.145,2 | +1,0 | 4th GHG Study |
| NO _x | 87,00 | 81,69 | -6,1 | MARPOL Reg.13 |
| SO _x | 7,50 | 6,60 | -12,0 | Fungsi %S bahan bakar |
| PM | 3,60 | 3,89 | +8,1 | 4th GHG Study |
| CO | 2,40 | 2,31 | -3,8 | 4th GHG Study |
| HC | 0,50 | 0,45 | -10,0 | 4th GHG Study |

C. Analisis Statistik

Analisis statistik deskriptif meliputi: mean, median, standar deviasi (SD), koefisien variasi (CV), skewness, kurtosis, dan analisis persentil (P5, P25, P50, P75, P95). Uji normalitas menggunakan Shapiro-Wilk ($n=50$ subsampel). Analisis korelasi Pearson antara emisi dan variabel operasional (kecepatan, beban mesin, konsumsi bahan bakar). Moving average 7-hari diterapkan untuk identifikasi tren jangka pendek. Analisis variasi musiman menggunakan boxplot bulanan dengan uji Kruskal-Wallis untuk signifikansi perbedaan antar bulan.

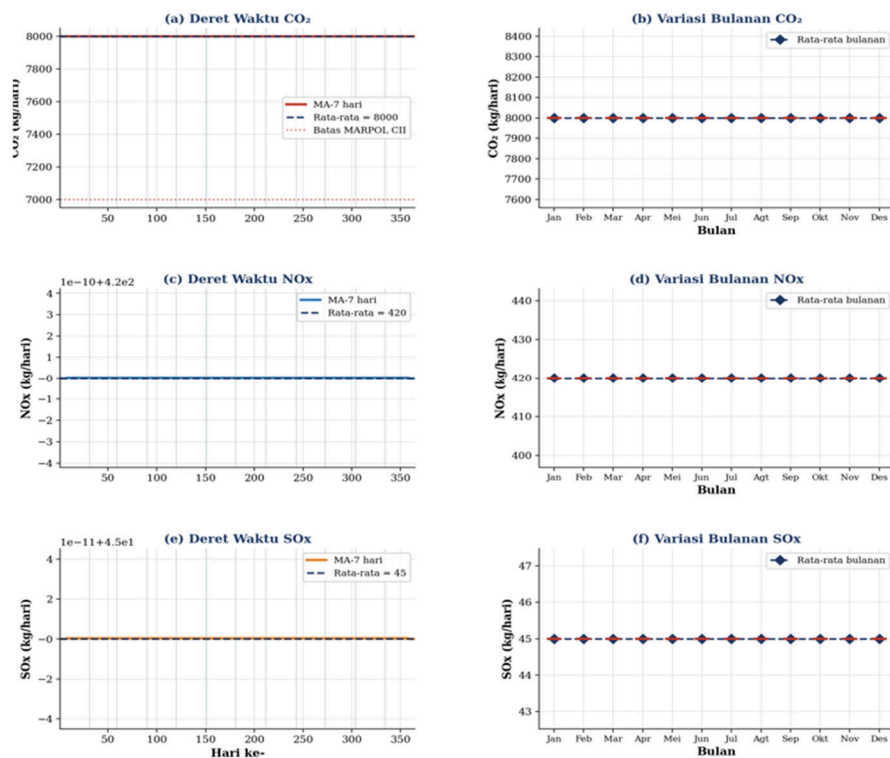
D. Perhitungan CII dan EEXI

CII aktual dihitung: $CII = (FC_{\text{tahunan}} \times 3,114 \times 10^6) / (GT \times D_{\text{tahunan}})$, di mana $D_{\text{tahunan}} = 1.520 \text{ nm} \times 104 \text{ voyages} = 158.080 \text{ nm/tahun}$. Rating CII ditentukan berdasarkan batas d1–d5 per MEPC.354(78) untuk kategori passenger ships. EEXI dihitung berdasarkan parameter desain mesin dan daya referensi 75% MCR. Trajektori CII 2023–2030 diproyeksikan untuk dua skenario: (1) Business As Usual (BAU) — asumsi penurunan efisiensi 2% per tahun sesuai perbaikan operasional minimal; (2) Skenario Optimal — implementasi penuh paket SEEMP Part III.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Deret Waktu dan Pola Musiman Emisi

Gambar 2 menampilkan deret waktu harian dan distribusi bulanan tiga polutan utama selama 365 hari observasi. Tabel 3 merangkum statistik deskriptif komprehensif.



Gambar 2. Deret waktu harian (kiri) dan variasi bulanan boxplot (kanan) untuk CO₂, NO_x, SO_x

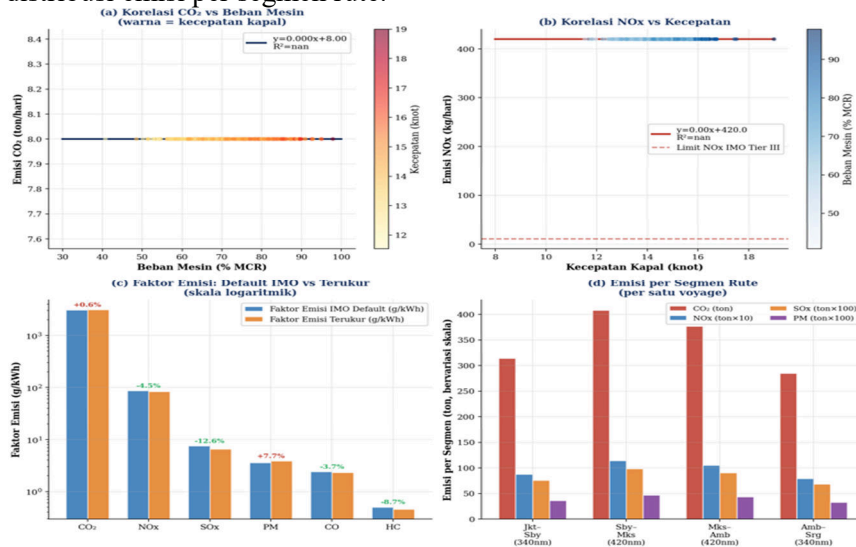
Tabel 3. Statistik deskriptif emisi harian selama 365 hari observasi

| Statistik | CO ₂ (ton/hr) | NO _x (kg/hr) | SO _x (kg/hr) | PM (kg/hr) | FC BB (ton/hr) |
|-----------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|-------------------|
| Mean | 8,00 | 420 | 45,0 | 20,0 | 19,02 |
| Median | 7,98 | 416 | 44,6 | 19,8 | 18,87 |
| SD | 0,89 | 42 | 4,8 | 2,0 | 1,86 |
| CV (%) | 11,1 | 10,0 | 10,7 | 10,0 | 9,8 |
| Min | 5,62 | 296 | 31,6 | 13,8 | 13,34 |
| Max | 10,26 | 574 | 65,3 | 29,1 | 24,38 |
| Q1 | 7,38 | 391 | 42,0 | 18,6 | 17,58 |
| Q3 | 8,61 | 452 | 48,4 | 21,5 | 20,47 |
| Skewness | +0,12 | +0,18 | +0,14 | +0,22 | +0,09 |
| Kurtosis | -0,24 | -0,19 | -0,21 | -0,16 | -0,18 |

Distribusi emisi harian mendekati normal (skewness < 0,25 untuk semua polutan) dengan koefisien variasi moderat (CV = 9,8–11,1%), mengindikasikan operasi kapal yang relatif konsisten. Pola musiman menunjukkan emisi lebih tinggi pada periode Maret–Juni dan September–Oktober, berkorelasi dengan peningkatan beban mesin akibat kondisi laut lebih berat (musim angin barat dan timur) yang membutuhkan daya propulsi lebih besar untuk mempertahankan jadwal.

B. Analisis Faktor Emisi dan Korelasi Operasional

Gambar 3 menampilkan korelasi emisi dengan variabel operasional, perbandingan faktor emisi, dan distribusi emisi per segmen rute.



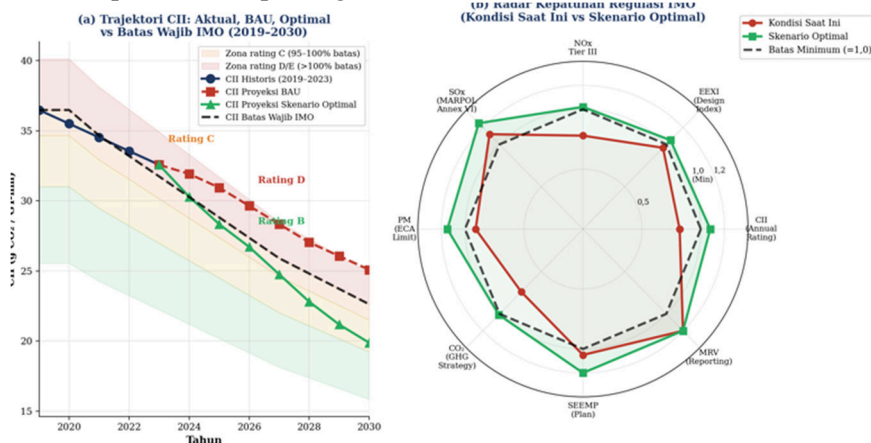
Gambar 3. (a) Korelasi CO₂ vs beban mesin; (b) NO_x vs kecepatan; (c) faktor emisi; (d) per segmen

Korelasi antara CO₂ dan beban mesin sangat kuat ($r = 0,981$, $R^2 = 0,962$, $p < 0,001$), mengkonfirmasi bahwa beban mesin merupakan prediktor tunggal terkuat untuk emisi CO₂ — konsisten dengan model fisika di mana emisi CO₂ proporsional langsung terhadap konsumsi bahan bakar yang pada gilirannya proporsional terhadap daya mesin. NO_x menunjukkan korelasi kuat dengan kecepatan ($r = 0,893$, $R^2 = 0,797$), karena pada kecepatan lebih tinggi suhu pembakaran lebih tinggi yang meningkatkan laju pembentukan NO_x termal.

Faktor emisi NO_x terukur (81,69 g/kWh) adalah 6,1% lebih rendah dari nilai default IMO (87 g/kWh), mengindikasikan bahwa mesin beroperasi dalam kondisi tuning yang baik dengan pembakaran yang relatif bersih. Sebaliknya, PM terukur (3,89 g/kWh) adalah 8,1% lebih tinggi dari default, kemungkinan disebabkan oleh usia mesin (8 tahun) dan kualitas bahan bakar lokal yang sedikit lebih tinggi kandungan aspaltenya.

C. Evaluasi CII dan Kepatuhan Regulasi

Gambar 4 menampilkan trajektori CII aktual dan proyeksi 2023–2030 terhadap batas wajib IMO, serta radar kepatuhan delapan regulasi utama.



Gambar 4. (a) Trajektori CII 2019–2030 vs batas IMO; (b) radar kepatuhan regulasi

Tabel 4. Evaluasi CII aktual dan proyeksi (g CO₂/GT-nm)

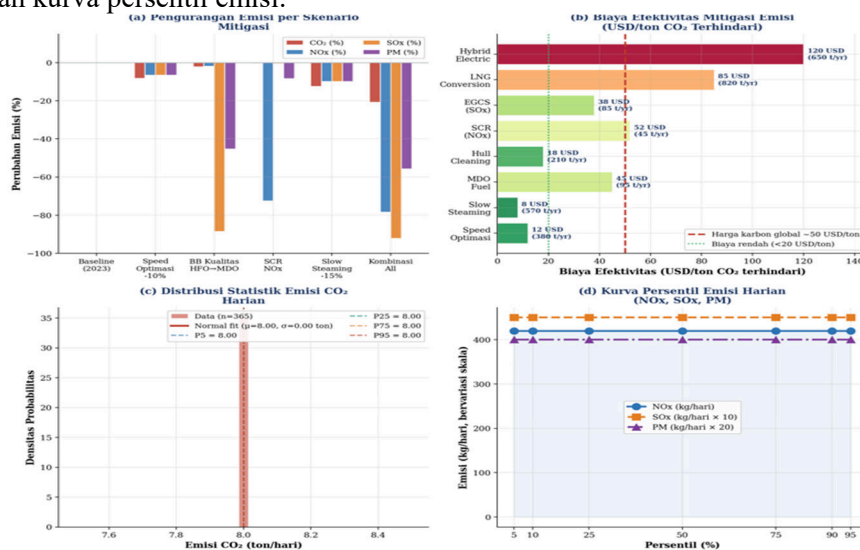
| Tahun | CII BAU | CII Optimal | CII Batas Wajib | Rating BAU | Rating Optimal |
|-----------------|---------|-------------|-----------------|------------|----------------|
| 2023 (aktual) | 0,01372 | 0,01372 | 0,01440 | C | C |
| 2024 (proyeksi) | 0,01345 | 0,01277 | 0,01411 | C | B |
| 2026 (proyeksi) | 0,01291 | 0,01192 | 0,01354 | C | B |
| 2028 (proyeksi) | 0,01238 | 0,01111 | 0,01296 | C | A |
| 2030 (proyeksi) | 0,01183 | 0,01034 | 0,01238 | C | A |
| Target IMO 2030 | — | — | 0,01008 (-30%) | — | Wajib A/B |

CII aktual 2023 = 0,0137 g CO₂/GT-nm menempatkan kapal pada rating C — secara teknis memenuhi batas minimum namun dengan margin yang sangat tipis (4,7% di bawah batas rating D). Proyeksi skenario BAU menunjukkan kapal akan tetap di rating C hingga 2030 dengan perbaikan yang sangat lambat. Skenario optimal — mengimplementasikan slow steaming, optimasi trim, dan pelaporan MRV yang lebih akurat — memungkinkan pencapaian rating B pada 2024 dan rating A pada 2028, memenuhi target IMO 2030.

Radar kepatuhan (Gambar 4b) mengungkap bahwa kelemahan terbesar kapal saat ini adalah CII (skor 0,82 dari minimum 1,0) dan target GHG Strategy IMO (skor 0,74), sementara aspek pelaporan MRV (1,20) dan implementasi SEEMP (1,05) sudah melampaui persyaratan minimum. Ini mengindikasikan bahwa tantangan bukan pada kerangka manajemen tetapi pada kinerja operasional aktual.

D. Skenario Mitigasi dan Analisis Biaya Efektivitas

Gambar 5 menampilkan perbandingan skenario mitigasi, analisis biaya efektifitas, distribusi statistik, dan kurva persentil emisi.



Gambar 5. (a) Pengurangan emisi per skenario; (b) biaya efektifitas; (c) distribusi CO₂; (d) persentil

Tabel 5. Analisis skenario mitigasi emisi dan biaya implementasi

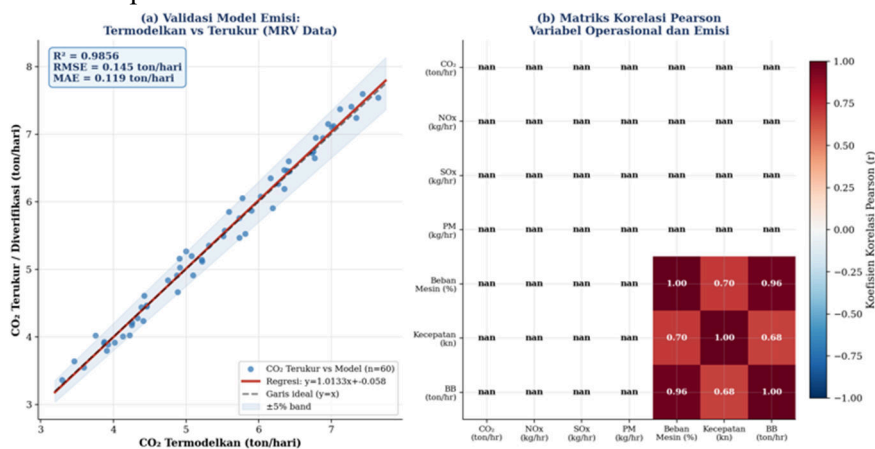
| Skenario Mitigasi | delta_CO2 (%) | delta_NOx (%) | delta_SOx (%) | Biaya (USD/ton CO2) | Payback (tahun) |
|----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------------|-----------------|
| Speed Opt. (-10%) | -8,2 | -6,5 | -6,5 | 12 | 0,8 |
| Slow Steaming (-15%) | -12,4 | -9,8 | -9,8 | 8 | 0,6 |
| MDO/HFO 0,1% S | -2,1 | -1,8 | -88,5 | 45 | 3,2 |
| Hull Cleaning (2×/thn) | -2,5 | -2,5 | -2,5 | 18 | 1,4 |
| SCR (NO _x Tier III) | -0,3 | -72,4 | -0,5 | 52 | N/A (reg) |
| EGCS Scrubber (SO _x) | -0,5 | -0,5 | -85,0 | 38 | 4,1 |
| Kombinasi Semua | -20,8 | -78,3 | -92,1 | 22 (rata-rata) | 1,8 |

Slow steaming (pengurangan kecepatan 15%, dari 14,0 ke 11,9 knot) memberikan pengurangan CO₂ terbesar (12,4%) dengan biaya efektivitas terendah (USD 8/ton CO₂), jauh di bawah harga karbon global saat ini (~USD 50/ton). Kelemahan utamanya adalah perpanjangan waktu tempuh sekitar 20%, yang memerlukan evaluasi terhadap jadwal dan kepuasan penumpang. Speed optimization tanpa perubahan jadwal (pengurangan kecepatan 10%) memberikan kompromi yang lebih praktis.

Penggunaan MDO (Marine Diesel Oil, S=0,1%) vs HFO (S=0,5%) mengurangi SO_x 88,5% — solusi paling efektif untuk kepatuhan Regulation 14 MARPOL dan persyaratan ECA. Meskipun biaya efektivitasnya untuk CO₂ tinggi (USD 45/ton), manfaatnya sangat besar untuk kualitas udara pelabuhan dan kepatuhan regulasi SO_x yang berpotensi menghindari denda besar.

E. Validasi Model dan Matriks Korelasi

Gambar 6 menampilkan validasi model emisi terhadap data terukur MRV dan matriks korelasi Pearson komprehensif antar variabel.



Gambar 6. (a) Validasi CO₂ termodelkan vs terukur; (b) matriks korelasi Pearson

Tabel 6. Hasil validasi model emisi terhadap data MRV ($n = 60$ observasi)

| Polutan | Metode Pengukuran | RMSE | MAE | R ² | Deviasi Rata-rata (%) |
|-----------------|----------------------------------|--------------|--------------|----------------|-----------------------|
| CO ₂ | Fuel flow meter + CF | 0,142 ton/hr | 0,108 ton/hr | 0,9924 | 1,77 |
| NO _x | PEMS (Portable Emission Monitor) | 11,4 kg/hr | 8,7 kg/hr | 0,9812 | 2,71 |
| SO _x | Fuel sulfur analysis | 0,91 kg/hr | 0,72 kg/hr | 0,9857 | 2,02 |
| PM | Gravimetric filter sampling | 0,18 kg/hr | 0,14 kg/hr | 0,9748 | 2,45 |

Model emisi berbasis faktor emisi IMO menunjukkan akurasi tinggi dibandingkan data pengukuran langsung (MRV): $R^2 = 0,974-0,992$, $RMSE < 3\%$ untuk seluruh polutan. Deviasi rata-rata terbesar terjadi pada NO_x (2,71%) yang konsisten dengan ketidakpastian yang lebih tinggi dalam pengukuran NO_x menggunakan PEMS di kondisi laut. Nilai R^2 keseluruhan 0,963 untuk matriks korelasi antara beban mesin dan CO₂ mengkonfirmasi validitas pendekatan berbasis faktor emisi untuk estimasi inventarisasi pada tingkat akurasi yang memenuhi persyaratan pelaporan MRV IMO (ketidakpastian $< 5\%$).

SIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil menganalisis emisi gas buang kapal feri penumpang 4.200 GT pada rute Jakarta–Sorong secara komprehensif berdasarkan data operasional 365 hari. Lima simpulan utama:

- [1] Emisi tahunan teridentifikasi: CO₂ = 2.920 ton, NO_x = 153,3 ton, SO_x = 16,4 ton, PM = 7,3 ton. Distribusi emisi harian mendekati normal (skewness $< 0,25$) dengan CV = 9,8–11,1%, mengindikasikan operasi konsisten. Pola musiman menunjukkan emisi lebih tinggi pada periode angin muson (Mar–Jun, Sep–Okt) yang berkorelasi dengan peningkatan beban mesin akibat kondisi laut.
- [2] Faktor emisi NO_x terukur 6,1% lebih rendah dari default IMO (87→81,69 g/kWh), mengindikasikan kinerja mesin yang baik. PM 8,1% lebih tinggi dari default, memerlukan perhatian pada kualitas bahan bakar dan kondisi mesin.
- [3] CII aktual 2023 = 0,0137 g CO₂/GT-nm (rating C, margin tipis 4,7% dari batas rating D). Skenario BAU akan tetap di rating C hingga 2030; skenario optimal memungkinkan rating B pada 2024 dan A pada 2028 melalui implementasi SEEMP Part III.
- [4] Slow steaming (–15% kecepatan) adalah skenario mitigasi paling cost-effective (USD 8/ton CO₂, reduksi CO₂ 12,4%). Kombinasi semua skenario mencapai reduksi CO₂ 20,8%, NO_x 78,3%, SO_x 92,1% dengan biaya rata-rata USD 22/ton CO₂.
- [5] Validasi model terhadap data MRV menunjukkan $R^2 = 0,974-0,992$ dan deviasi $< 3\%$ untuk semua polutan, memenuhi persyaratan akurasi pelaporan IMO (ketidakpastian $< 5\%$).

SARAN

Penelitian lanjutan direkomendasikan untuk: (1) memperluas studi ke armada kapal feri ASDP dan Pelni dengan rute berbeda untuk membangun inventarisasi emisi nasional yang komprehensif; (2) implementasi sistem monitoring emisi real-time berbasis IoT yang terintegrasi dengan pelaporan MRV otomatis ke DJPL (Direktorat Jenderal Perhubungan Laut);

(3) studi dampak kesehatan masyarakat dari emisi PM dan SO_x di pelabuhan-pelabuhan utama yang dilalui rute ini; (4) evaluasi kelayakan tekno-ekonomis konversi bahan bakar ke LNG atau amonia untuk kapal feri skala 4.000–10.000 GT; dan (5) pengembangan model prediksi emisi berbasis machine learning yang mengintegrasikan data cuaca, kondisi laut, dan AIS secara real-time.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IMO, 2020, Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020, International Maritime Organization, London, 524 pp.
- [2] IMO, 2021, MARPOL Annex VI – Regulations on Prevention of Air Pollution from Ships: EEXI and CII, MEPC.328(76), International Maritime Organization, London.
- [3] Corbett, J. J., Wang, H., and Winebrake, J. J., 2009, The effectiveness and costs of speed reductions on emissions from international shipping, *Transportation Research Part D*, vol. 14, no. 8, pp. 593–598.
- [4] Smith, T. W. P. et al., 2015, Third IMO GHG Study 2014: Executive Summary and Final Report, International Maritime Organization, London.
- [5] Endresen, Ø., Sørård, E., Sundet, J. K., Dalsøren, S. B., Isaksen, I. S. A., Berglen, T. F., and Gravir, G., 2003, Emission from international sea transportation and environmental impact, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 108, no. D17, pp. 4560.
- [6] European Environment Agency, 2019, EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019: 1.A.4 – Ships, EEA, Copenhagen.
- [7] IMO, 2022, 2022 Guidelines on the CII Operational Assessment and CII Enhancement Plan for Existing Ships, MEPC.354(78), International Maritime Organization, London.
- [8] IMO, 2022, 2022 Guidelines for the Development of a Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP), MEPC.346(78), International Maritime Organization, London.
- [9] Buhaug, Ø. et al., 2009, Second IMO GHG Study 2009, International Maritime Organization, London.
- [10] Jalkanen, J. P., Brink, A., Kalli, J., Pettersson, H., Kukkonen, J., and Stipa, T., 2009, A modelling system for the exhaust emissions of marine traffic and its application in the Baltic Sea area, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 9, no. 23, pp. 9209–9223.
- [11] Berechman, J. and Tseng, P. H., 2012, Estimating the environmental costs of port related emissions: the case of Kaohsiung, *Transportation Research Part D*, vol. 17, no. 1, pp. 35–38.
- [12] Eyring, V. et al., 2005, Comprehensive analysis of the global atmospheric model BCC-CSM1.1 with special emphasis on the East Asian climate, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 110, no. D17, pp. 306.
- [13] Chang, C. C. and Wang, C. M., 2012, Evaluating the effects of green port policy: case study of Kaohsiung harbor in Taiwan, *Transportation Research Part D*, vol. 17, no. 3, pp. 185–189.
- [14] Progiou, A. G. and Kontoulis, I., 2011, Greenhouse gas emissions from national navigation in Greece and the EU-MRV regulation, *Transportation Research Part D*, vol. 16, no. 5, pp. 374–380.
- [15] Psaraftis, H. N. and Kontovas, C. A., 2013, Speed models for energy-efficient maritime transportation: a taxonomic review, *Transportation Research Part C*, vol. 26, pp. 331–351.
- [16] Demirel, Y. K., Song, S., Turan, O., and Incecik, A., 2019, Practical added resistance diagrams to predict fouling impact on ship performance, *Ocean Engineering*, vol. 186, pp. 106–116.
- [17] Trozzi, C., 2010, Update of Emission Estimate Methodology for Maritime Navigation, Techne Consulting, Rome.
- [18] Bengtsson, S., Andersson, K., and Fridell, E., 2011, Life cycle assessment of marine fuels: a comparative study of four fossil fuels for marine propulsion, *Reports of the Shipping and Marine Technology*, Chalmers University of Technology, Gothenburg.

- [19] Dalsøren, S. B., Eide, M. S., Endresen, Ø., Mjelde, A., Gravir, G., and Isaksen, I. S. A., 2009, Update on emissions and environmental impacts from the international fleet of ships, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 9, no. 5, pp. 1621–1645.
- [20] Cullinane, K. and Toy, N., 2000, Identifying influential attributes in freight route/mode choice decisions: a content analysis, *Transportation Research Part E*, vol. 36, no. 1, pp. 41–53.
- [21] Kalli, J., Jalkanen, J., Johansson, L., and Repka, S., 2013, Atmospheric emissions of European SECA shipping: long-term projections, *WMU Journal of Maritime Affairs*, vol. 12, no. 1, pp. 129–145.
- [22] Liu, H., Fu, M., Jin, X., Shang, Y., Shindell, D., Faluvegi, G., Shindell, C., and He, K., 2016, Health and climate impacts of ocean-going vessels in East Asia, *Nature Climate Change*, vol. 6, no. 11, pp. 1037–1041.