

# Estimasi Beban Emisi Gas Buang Akibat Aktivitas Kapal Penyeberangan Dan Bongkar Muat Kendaraan Bermotor Pada Pelabuhan Kolaka

Haerul Purnama\*<sup>1</sup>, Mursalim Ninoy La Ola<sup>2</sup>, Arya Dirgantara<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Universitas Sembilanbelas November, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains & Teknologi, Jalan Pemuda No. 339, Kelurahan Tahoa, Kecamatan Kolaka, Kabupaten Kolaka, Sulawesi Tenggara.

e-mail: \*[haerulpurnama@gmail.com](mailto:haerulpurnama@gmail.com), [mursalimlaola@gmail.com](mailto:mursalimlaola@gmail.com), [aryapolo@gmail.com](mailto:aryapolo@gmail.com)

## Abstract

*The increasing operational activities of ferries and motor vehicles at Kolaka Port, a vital transportation link in Southeast Sulawesi, significantly contribute to exhaust gas emissions, affecting air quality and public health. This study aims to estimate the emission load from ferry activities and vehicle loading and unloading at Kolaka Port in 2023. The ferry emission load estimation follows the Emission Factor Approach based on the EMEP/EEA (European Monitoring and Evaluation Programme/European Environment Agency) guidelines, while motor vehicle emissions are estimated using the 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Guidelines. The key pollutants observed include nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), carbon monoxide (CO), fine particulate matter (PM<sub>10</sub>), sulfur oxides (SO<sub>x</sub>), and non-methane volatile organic compounds (NMVOC). The results indicate that ferry activities dominate emissions, with NO<sub>x</sub> as the highest contributor at 224.78 tons/year, followed by CO (39.91 tons/year) and PM<sub>10</sub> (21.56 tons/year). NMVOC and SO<sub>x</sub> emissions were recorded at 14.03 tons/year and 5.38 tons/year, respectively. Meanwhile, motor vehicle activities during the loading and unloading process contributed smaller emission amounts, primarily CO (509.88 kg/year) and primarily CO (509.88 kg/year) and NO<sub>x</sub> (183.72 kg/year).*

**Keywords:** Emission Load, Kolaka Port, Ferry, Vehicle.

## Abstrak

*Peningkatan aktivitas operasional kapal penyeberangan dan kendaraan bermotor di Pelabuhan Kolaka, yang merupakan jalur penghubung transportasi penting di Sulawesi Tenggara, berkontribusi secara signifikan terhadap emisi gas buang, yang berdampak pada kualitas udara dan kesehatan masyarakat. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi beban emisi dari aktivitas kapal penyeberangan serta bongkar muat kendaraan bermotor di pelabuhan Kolaka pada tahun 2023. Estimasi beban emisi kapal dilakukan menggunakan Pendekatan Faktor Emisi berdasarkan panduan EMEP/EEA (European Monitoring and Evaluation Programme/ European Environment Agency) sedangkan untuk beban emisi kendaraan bermotor menggunakan panduan Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Guidelines 2006. Polutan utama yang diamati meliputi nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), karbon monoksida (CO), partikel halus (PM<sub>10</sub>), sulfur oksida (SO<sub>x</sub>), dan senyawa organik volatil non-metana (NMVOC). Hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivitas kapal mendominasi emisi, dengan NO<sub>x</sub> sebagai kontributor tertinggi sebesar 224.78 ton/tahun, diikuti oleh CO (39.91 ton/tahun) dan PM<sub>10</sub> (21.56 ton/tahun). Emisi NMVOC dan SO<sub>x</sub> masing-masing tercatat sebesar 14.03 ton/tahun dan 5.38 ton/tahun. Sementara itu, aktivitas kendaraan bermotor selama proses bongkar muat menambah emisi dalam jumlah yang lebih kecil, terutama CO (509.88 kg/tahun) dan NO<sub>x</sub> (183.72 kg/tahun).*

**Kata kunci:** Beban Emisi, Aktivitas Kapal Penyeberangan, Aktivitas Kendaraan, Pelabuhan Kolaka.

## 1. Pendahuluan

Transportasi barang dan jasa melalui kapal laut Internasional terus meningkat seiring dengan perkembangan perdagangan lintas negara. Aktivitas ini memberikan kontribusi positif terhadap ekonomi global, disamping itu memberi dampak negatif pada lingkungan, khususnya melalui emisi Gas Rumah Kaca (GRK) yang memperburuk perubahan iklim global. Sektor maritim menghadapi tantangan besar dalam mengurangi emisi polutan, berbeda dengan sektor transportasi lain yang telah berhasil menekan emisi secara signifikan (Grigoriadis et al., 2021). Pada tahun 2018, sektor transportasi laut tercatat menyumbang 2.89% dari total Gas Rumah Kaca (GRK) yang dihasilkan oleh aktivitas manusia, dan proyeksi menunjukkan angka ini akan terus meningkat hingga tahun 2050 (Perčić et al., 2022). Emisi yang dihasilkan oleh sektor transportasi laut berasal dari pembakaran bahan bakar pada mesin utama dan mesin bantu kapal. Bahan bakar berat seperti *heavy fuel oil* (HFO) dan marine gas oil (MGO) menghasilkan berbagai polutan, termasuk partikulat (PM), sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>), nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), dan senyawa organik volatil (VOC) (Agrawal et al., 2008). Dibandingkan dengan kendaraan bermotor, yang menghasilkan polutan seperti partikulat halus (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>), NO<sub>x</sub>, hidrokarbon (HC), karbon monoksida (CO), dan CO<sub>2</sub> (Yusrianti, 2015), kapal laut berkontribusi lebih besar terhadap emisi global dan lokal, terutama di kawasan pelabuhan dan perairan sekitarnya (Sherbaz & Duan, 2014).

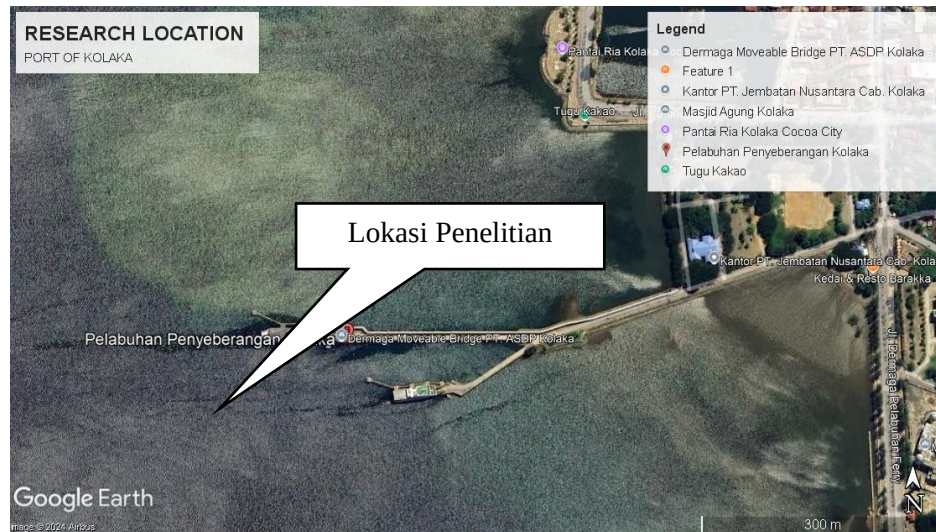
Pelabuhan Kolaka di Sulawesi Tenggara merupakan salah satu pusat aktivitas transportasi laut yang penting, khususnya untuk rute penyeberangan antara Sulawesi Tenggara dan Sulawesi Selatan melalui Pelabuhan Bajoe. Seiring dengan pertumbuhan aktivitas ekonomi dan meningkatnya mobilitas masyarakat, frekuensi kedatangan dan keberangkatan kapal penyeberangan di pelabuhan ini mengalami peningkatan yang berkelanjutan. Survei awal menunjukkan bahwa terdapat enam aktivitas bongkar muat harian dari tiga jadwal keberangkatan dan kedatangan per hari. Total aktivitas ini mencapai 1053 jumlah kunjungan kapal pertahun dan 447866 Kendaraan/tahun (BPS Kolaka, 2023).

Rangkaian penelitian tersebut kemudian memberikan gambaran bahwa perkembangan metode estimasi emisi telah cukup memadai untuk mengestimasi jenis dan besaran nilai beban emisi pada Pelabuhan Kolaka. Namun, hingga saat ini, studi yang secara khusus mengkaji jenis dan nilai beban emisi gas buang akibat aktivitas kapal penyeberangan dan kendaraan bermotor di Pelabuhan Kolaka masih sangat terbatas. Hal ini menjadi tantangan, mengingat peningkatan aktivitas di pelabuhan dapat berkontribusi signifikan terhadap pencemaran udara lokal. Sehingga berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan identifikasi dan estimasi beban emisi gas buang dari aktivitas kapal penyeberangan serta kendaraan bermotor yang menggunakan layanan pelabuhan.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di pelabuhan Kolaka, yang terletak di Kabupaten Kolaka, Sulawesi Tenggara (342928.61 E ; 9551313.01 S). Pelabuhan ini berfungsi sebagai salah satu jalur penyeberangan utama di kawasan tersebut, menghubungkan Sulawesi Tenggara dengan Sulawesi Selatan, terutama melalui rute menuju Pelabuhan Bajoe. Sebagai jalur transportasi laut yang strategis, Pelabuhan Kolaka berperan penting dalam mendukung pergerakan penduduk, distribusi barang, serta aktivitas ekonomi di Kabupaten Kolaka.



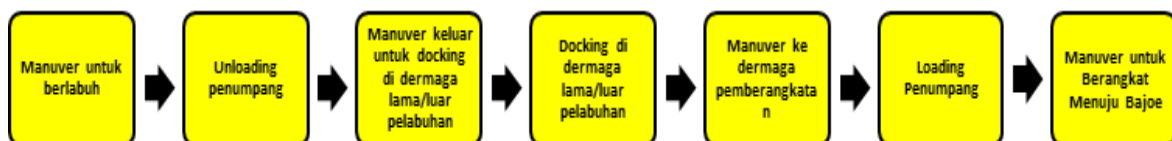
Gambar 1. Lokasi Penelitian

(Sumber googleearth, diakses pada 1 Desember 2024)

## 2.2 Metode Pengambilan Data

Pengumpulan data dilakukan dalam dua tahap, yaitu pengumpulan data sekunder dan data primer. Data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini mencakup jumlah kendaraan serta jadwal kedatangan dan keberangkatan kapal selama tahun 2023, yang diperoleh dari instansi terkait. Data tersebut kemudian diorganisasi dan diklasifikasikan berdasarkan bulan dan jenis kendaraan untuk dianalisis lebih lanjut dalam menghitung beban emisi. Mengingat data produksi di pelabuhan Kolaka hanya mencatat jumlah kendaraan penumpang dan jumlah perjalanan kapal yang berangkat dari pelabuhan tersebut, diasumsikan bahwa jumlah kendaraan yang tiba sama dengan jumlah yang berangkat, begitu pula ritase kapal pada hari yang sama, untuk mewakili keseluruhan siklus aktivitas kapal perbulannya (Tsanakas, 2019).

Data primer diperoleh melalui pengamatan langsung terhadap aktivitas operasional kapal di Pelabuhan, dengan fokus utama pada waktu yang diperlukan untuk melakukan *manoeuvre* dan *docking*. Proses *manoeuvre* mencakup pergerakan kapal dari area perairan pelabuhan hingga menunggu untuk perjalanan berikutnya. Sementara itu, *docking* mencakup penyesuaian posisi kapal hingga siap sepenuhnya untuk kegiatan bongkar muat atau aktivitas lainnya. Durasi satuan waktu kedua proses tersebut dicatat secara sistematis yang digunakan sebagai parameter kunci dalam analisis efisiensi pelabuhan serta potensi emisi yang dihasilkan selama proses tersebut. Setiap proses tersebut berperan penting dalam efisiensi operasional dan berpotensi mempengaruhi emisi gas buang, terutama dari mesin kapal selama berlabuh dan bergerak. Penelitian ini memfokuskan pengamatan pada aktivitas berlabuh (*berthing Time*) untuk menyeragamkan pengamatan juga karena periode ini mencerminkan aktivitas kapal yang berdampak signifikan terhadap emisi di Pelabuhan (Budiyanto et al., 2022). Adapun ilustrasi tahapan aktivitas kapal pada pelabuhan ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Tahapan aktivitas kapal pada Pelabuhan kolaka

## 2.3 Metode Pengolahan Data

### 2.3.1 Estimasi Beban Emisi Akibat Aktivitas Kapal

Perhitungan emisi gas buang dari aktivitas kapal di pelabuhan harus mencakup seluruh emisi yang dihasilkan oleh mesin utama (*Main Engine*) dan mesin bantu (*Auxiliary Engine*) selama setiap tahapan operasional di pelabuhan. Keseluruhan tahapan tersebut, mencakup manuver kapal dari kolam pelabuhan, kegiatan bongkar muat kapal, dan saat kapal meninggalkan pelabuhan penelitian ini tidak memperhitungkan emisi dari tug boat dan kapal bantu lainnya. Jenis kapal yang dimaksud termasuk kapal barang, tanker, bulk carrier, dan sejenisnya. (Trozi, 2010)

Berdasarkan panduan EMEP/EEA (*European Monitoring and Evaluation Programme/ European Environment Agency*), perhitungan emisi untuk perjalanan tunggal kapal komersial dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$E_{\text{trip}} = E_{\text{Hotelling}} + E_{\text{manouvering}} \quad (1)$$

jika konsumsi bahan bakar setiap fase diketahui, maka perhitungan emisi polusi dapat dihitung sebagai berikut :

$$E_{\text{trip},i,j,m} = 10^{-3} \sum_p (FC_{j,m,p} \times EF_{i,j,m,p}) \quad (2)$$

Di mana

- $E_{\text{trip}}$  = nilai emisi berdasarkan trip (tonnes)
- $FC$  = konsumsi bahan bakar (tonnes)
- $EF$  = faktor emisi (kg/tonne)
- $i$  = Jenis polutnant
- $e$  = Kategori mesin (*main engine, Auxiliary*)
- $j$  = Tipe Mesin (*slow-, medium-, dan high-speed diesel*, turbin bensin dan mesin uap)
- $m$  = tipe bahan bakar (*bunker fuel oil, marine diesel oil/marine gas oil*, bensin)
- $p$  = fase perjalanan ( *cruise, hotelling, manouvering*)

untuk menghitung konsumsi bahan bakar dilakukan dengan menggunakan perkiraan konsumsi bahan bakar spesifik pada tabel 1 & 2 yang kemudian dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$FC = P \times LF \times T \times \frac{SFC}{1000} \quad (3)$$

Di mana :

- $FC$  = Konsumsi bahan bakar (ton)
- $P$  = Kapasitas nominal mesin (kW)
- $LF$  = Faktor beban
- $T$  = Waktu operasi (jam)
- $SFC$  = Konsumsi bahan bakar spesifik (g/kWh)

**Tabel 1. Nilai faktor emisi dan konsumsi bahan bakar spesifik kapal berdasarkan phase, jenis mesin dan spesifikasi bahan bakar**

| Mesin     | Fase                             | Tipe Mesin          | Faktor Emisi     |                    |                   |                 |                  | Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (g/kWh) |
|-----------|----------------------------------|---------------------|------------------|--------------------|-------------------|-----------------|------------------|---------------------------------------|
|           |                                  |                     | Nox (Kg/ton BBM) | NMVOC (Kg/ton BBM) | PM10 (Kg/ton BBM) | CO (Kg/ton BBM) | Sox (Kg/ton BBM) |                                       |
| Utama     | Cruise                           | High Speed Diesel   | 57.1             | 1                  | 1.5               |                 |                  | 203                                   |
|           | Manouvering / Hotelling          |                     | 41.7             | 2.6                | 4                 |                 |                  | 223                                   |
| Auxiliary | Cruise / Manouvering / Hotelling | Medium Speed Diesel |                  |                    |                   | 7.4             | 20*S             |                                       |
|           |                                  |                     | 62               | 1.8                | 1.4               |                 |                  | 217                                   |

Sumber : (Trozi, 2010)

**Tabel 2. Estimasi Persentase Beban MCR (Maximum Continuous Rating) Mesin Utama dan Mesin Bantu untuk Berbagai Aktivitas Kapal**

| Fase                     | % Load of MCR | % Load of MCR    |
|--------------------------|---------------|------------------|
|                          | Main Engine   | Auxiliary Engine |
| Cruise                   | 80            | 30               |
| Manoeuvring              | 20            | 50               |
| Hotelling (Bukan Tanker) | 20            | 40               |
| Hotelling (Tanker)       | 20            | 60               |

Sumber : (Trozi, 2010)

### 2.3.2 Estimasi Beban Emisi Akibat Aktivitas beban angkutan kendaraan bermotor

Metode yang digunakan dalam perhitungan beban emisi akibat beban kendaraan bermotor di pelabuhan kolaka, mengacu pada pedoman *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Guidelines* 2006. Penerapan metode tersebut telah diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.73/MenLHK/Setjen/Kum.1/12/2017, yang dikeluarkan pada 29 Desember 2017, terkait Pedoman Penyelenggaraan dan Pelaporan Inventarisasi Gas Rumah Kaca (Wibowo et al., 2023). Pendekatan ini memanfaatkan persamaan yang lebih rinci, mengumpulkan data aktivitas dari sumber nasional dan regional, serta menerapkan faktor emisi lokal yang diperoleh melalui pengukuran langsung.

$$E = Ni \times VKT \times EF \times 10^{-6} \quad (4)$$

Di mana :

E = Beban emisi (ton/tahun)

Ni = Jumlah jenis kendaraan (kendaraan/tahun)

VKT = Total Panjang ruas jalan (km)  
 FE = Faktor emisi (g/Km)

**Tabel 3. Faktor emisi jenis bahan bakar kendaraan bermotor**

| Pencemar | Sepeda Motor<br>(g/Km) | Mobil bensin<br>(g/Km) | Mobil Solar<br>(g/Km) | Bus<br>(g/Km) | Truk<br>(g/Km) |
|----------|------------------------|------------------------|-----------------------|---------------|----------------|
| Nox      | 0.290                  | 2.00                   | 3.5                   | 11.9          | 17.700         |
| PM10     | 0.240                  | 0.010                  | 0.530                 | 1.400         | 1.4            |
| SO2      | 0.008                  | 0.026                  | 0.440                 | 0.930         | 0.820          |
| CO       | 14.0                   | 40.0                   | 2.8                   | 11.0          | 8.4            |

Sumber : Wibowo dkk (2023)

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Data trip dan Jumlah Kendaraan Terangkut

Berdasarkan data dari pihak terkait, diketahui jumlah kendaraan berdasarkan golongan kendaraan (gol 1-gol IX). Data tersebut kemudian dikategorikan berdasarkan jenis kendaraan dan jenis bahan bakarnya, seperti ditunjukkan pada Tabel 4.

**Tabel 4. Jumlah *trip* kapal dan Jumlah kendaraan pada Pelabuhan kolaka**

| Bulan     | Jumlah<br><i>Trip</i><br>Kapal | Sepeda<br>Motor | Mobil<br>(bensin) | Mobil<br>(Solar) | Bis | Truk |
|-----------|--------------------------------|-----------------|-------------------|------------------|-----|------|
| Januari   | 156                            | 1636            | 474               | 144              | 328 | 966  |
| Februari  | 162                            | 1644            | 474               | 172              | 324 | 928  |
| Maret     | 160                            | 1574            | 400               | 180              | 316 | 704  |
| April     | 176                            | 4402            | 1664              | 174              | 310 | 610  |
| Mei       | 186                            | 1392            | 536               | 236              | 352 | 1156 |
| Juni      | 170                            | 2760            | 1004              | 234              | 358 | 872  |
| Juli      | 186                            | 2100            | 670               | 226              | 374 | 1052 |
| Agustus   | 182                            | 2654            | 544               | 216              | 366 | 1018 |
| September | 170                            | 1884            | 572               | 164              | 362 | 1042 |
| Oktober   | 186                            | 1966            | 558               | 168              | 376 | 1176 |
| November  | 170                            | 1786            | 560               | 174              | 374 | 1356 |
| Desember  | 176                            | 2238            | 674               | 180              | 380 | 1134 |

Sumber : Analisis data Pelabuhan kolaka 2023

#### 3.2 Waktu *manouvering* dan *Hotelling*

Untuk mengestimasi nilai konsumsi bahan bakar, waktu tiap tahapan aktivitas kapal pada Pelabuhan kolaka diamati guna mengetahui waktu rata-rata yang kemudian digunakan pada analisis. berdasarkan hasil pengamatan, diketahui rata-rata waktu manuver kapal pada Pelabuhan sebesar 0.53 jam dan waktu hotelling rata-rata 17.24 jam sebagaimana ditunjukkan pada table 5.

**Tabel 5. Hasil pengamatan waktu manuver dan hotelling pada Pelabuhan Kolaka**

|                                | Minimum | Maximum | Mean  |
|--------------------------------|---------|---------|-------|
| Waktu <i>Manouvering</i> (jam) | 0.42    | 0.62    | 0.53  |
| Waktu <i>Hotelling</i> (jam)   | 10.00   | 21.00   | 17.24 |

Sumber : Analisis data Survey

### 3.3 Konsumsi Bahan Bakar Mesin Kapal

Karakteristik mesin mempengaruhi nilai beban emisi melalui tingkat konsumsi bahan bakaar, berdasarkan data sekunder diketahui nilai kapasitas dan detail lainnya untuk mesin auxiliary dan mesin utama kapal penumpang yang beroperasi pada Pelabuhan kolaka, sebagaimana ditunjukkan pada table 6 & table 7.

**Tabel 6. Karakteristik Mesin Utama Kapal pada Pelabuhan Kolaka**

| Objek Pengamatan  | Jumlah Mesin | Jenis Bahan Bakar | Kapasitas (HP) | Power (Kw)<br>$PK \times 0.7335$ |
|-------------------|--------------|-------------------|----------------|----------------------------------|
| Kapal Penumpang 1 | 2            | HSD- Diesel       | 1300           | 1938.82                          |
| Kapal Penumpang 2 | 2            | HSD- Diesel       | 1330           | 1983.562                         |
| Kapal Penumpang 3 | 5            | HSD- Diesel       | 1600           | 5965.6                           |
| Kapal Penumpang 4 | 2            | HSD- Diesel       | 1300           | 1938.82                          |
| Kapal Penumpang 5 | 2            | HSD- Diesel       | 1800           | 2684.52                          |
| Kapal Penumpang 6 | 2            | HSD- Diesel       | 1300           | 1938.82                          |
| Kapal Penumpang 7 | 2            | HSD- Diesel       | 2000           | 2982.8                           |
| Kapal Penumpang 8 | 3            | HSD- Diesel       | 1330           | 2975.343                         |
| Kapal Penumpang 9 | 5            | HSD- Diesel       | 1800           | 6711.3                           |

Sumber : bki.go.id

**Tabel 7. Karakteristik auxiliary engine Kapal pada Pelabuhan Kolaka**

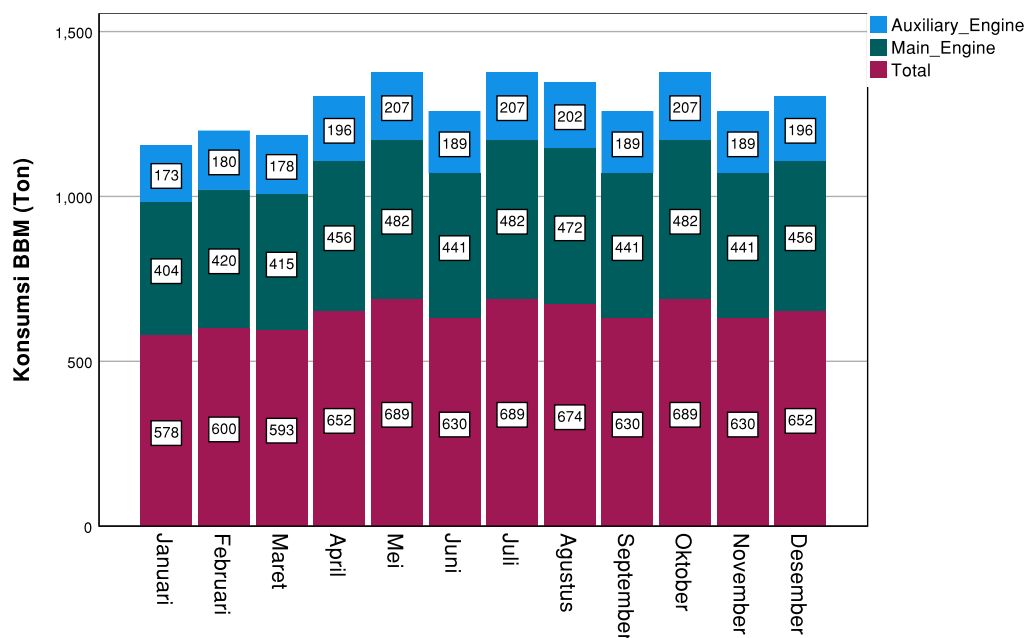
| Objek Pengamatan  | Jumlah Mesin | Jenis Bahan Bakar | Kapasitas (PK) | Power (Kw)<br>$PK \times 0.7335$ |
|-------------------|--------------|-------------------|----------------|----------------------------------|
| Kapal Penumpang 1 | 2            | Diesel            | 300            | 441.2994                         |
| Kapal Penumpang 2 | 2            | Diesel            | 460            | 676.65908                        |
| Kapal Penumpang 3 | 2            | Diesel            | 420            | 617.81916                        |
| Kapal Penumpang 4 | 2            | Diesel            | 420            | 617.81916                        |
| Kapal Penumpang 5 | 2            | Diesel            | 420            | 617.81916                        |
| Kapal Penumpang 6 | 2            | Diesel            | 300            | 441.2994                         |
| Kapal Penumpang 7 | 2            | Diesel            | 360            | 529.55928                        |
| Kapal Penumpang 8 | 3            | Diesel            | 900            | 1985.8473                        |
| Kapal Penumpang 9 | 2            | Diesel            | 300            | 441.2994                         |

Sumber : bki.go.id

Sehingga menggunakan persamaan 3 dapat diketahui nilai konsumsi bahan bakar yang secara umum ditunjukkan pada table 8 dan gambar 2. Berdasarkan hasil perhitungan diketahui bahwa rata-rata konsumsi bahan bakar tertinggi terjadi proses hotelling nilai total konsumsinya sebesar 3500 kg.

**Tabel 8. Konsumsi bahan bakar Rata-Rata pada proses manouvering dan Hotelling**

| Konsumsi BBM                     | Minimum (kg) | Maximum (Kg) | Mean (Kg) |
|----------------------------------|--------------|--------------|-----------|
| <i>Manouvering (Main Engine)</i> | 46.12        | 159.64       | 76.96     |
| <i>Hotelling (Main Engine)</i>   | 1506.91      | 5216.22      | 2514.73   |
| <i>Manouvering (Auxiliary)</i>   | 25.54        | 114.91       | 40.95     |
| <i>Hotelling (auxiliary)</i>     | 667.52       | 3003.86      | 1070.51   |



**Gambar 2. Konsumsi bahan bakar kapal pada Pelabuhan Kolaka**

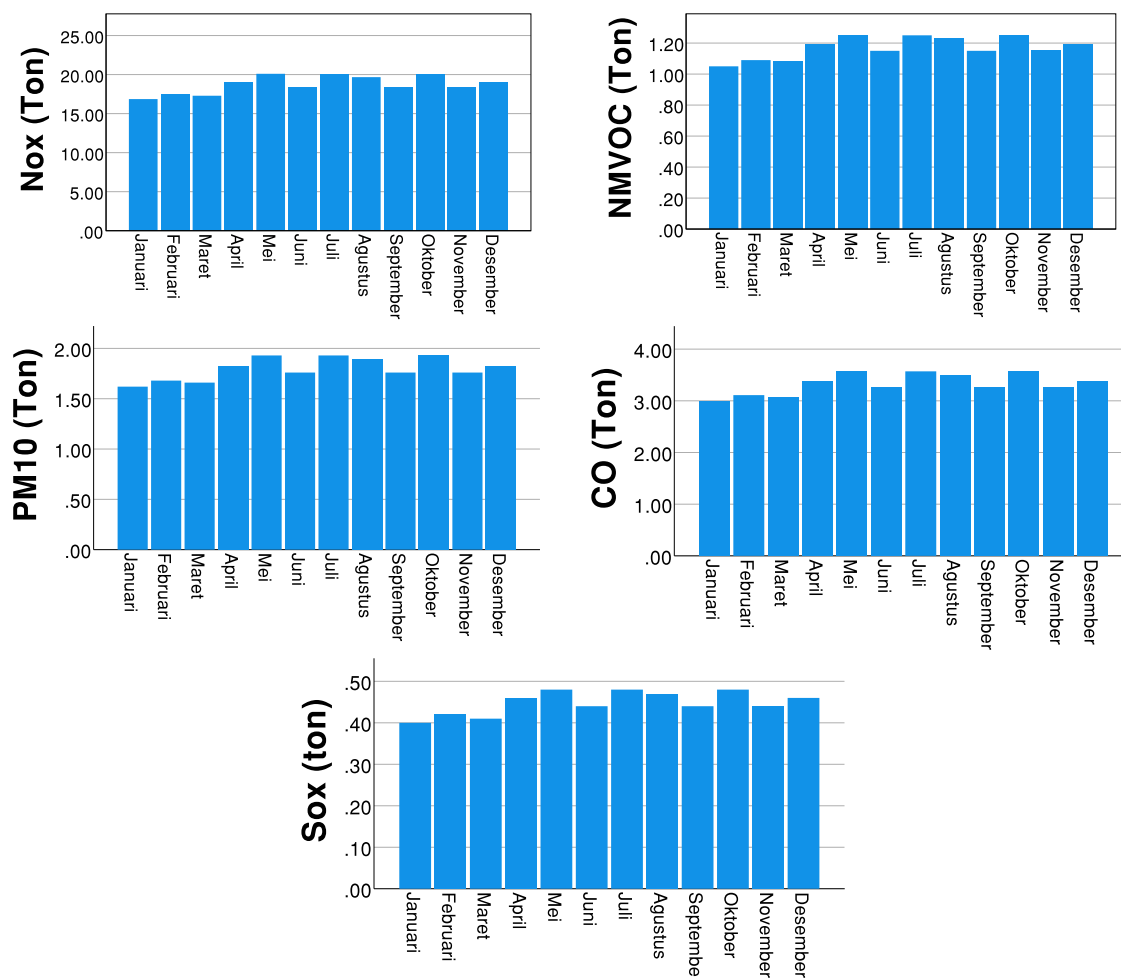
### 3.4 Beban Emisi Kapal

Dari hasil estimasi emisi gas buang aktifitas kapal penumpang pada Pelabuhan kolaka selama tahun2023. Polutan utama yang diamati meliputi nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), senyawa organik volatil non-metana (NMVOC), partikel halus (PM<sub>10</sub>), karbon monoksida (CO), dan sulfur oksida (SO<sub>x</sub>). NO<sub>x</sub> menunjukkan nilai emisi tertinggi, dengan rata-rata bulanan 18.7317 ton, diikuti oleh CO sebesar 3.3258 ton. Polutan lainnya, seperti NMVOC, PM<sub>10</sub>, dan SO<sub>x</sub>, masing-masing memiliki rata-rata emisi bulanan yang lebih rendah, yaitu 1.1692 ton, 1.7967 ton, dan 0.4483 ton. Data ini memberikan gambaran bahwa nitrogen oksida menjadi kontributor terbesar terhadap total emisi, sedangkan sulfur oksida memiliki dampak terkecil berdasarkan jumlah tonase.

Rentang emisi untuk setiap polutan menunjukkan variasi yang relatif kecil, mencerminkan pola aktivitas sumber emisi yang cenderung stabil selama setahun. Sebagai contoh, emisi NO<sub>x</sub> berkisar antara 16.86 hingga 20.10 ton per bulan, sedangkan SO<sub>x</sub> berada dalam rentang 0.40 hingga 0.48 ton per bulan. Stabilitas ini mungkin disebabkan oleh operasi kendaraan atau kapal yang konsisten,



atau pola aktivitas yang tidak banyak berubah dari bulan ke bulan. secara detail fluktuasi beban emisi perbulan ditunjukkan pada gambar 3 dan tabel 9.

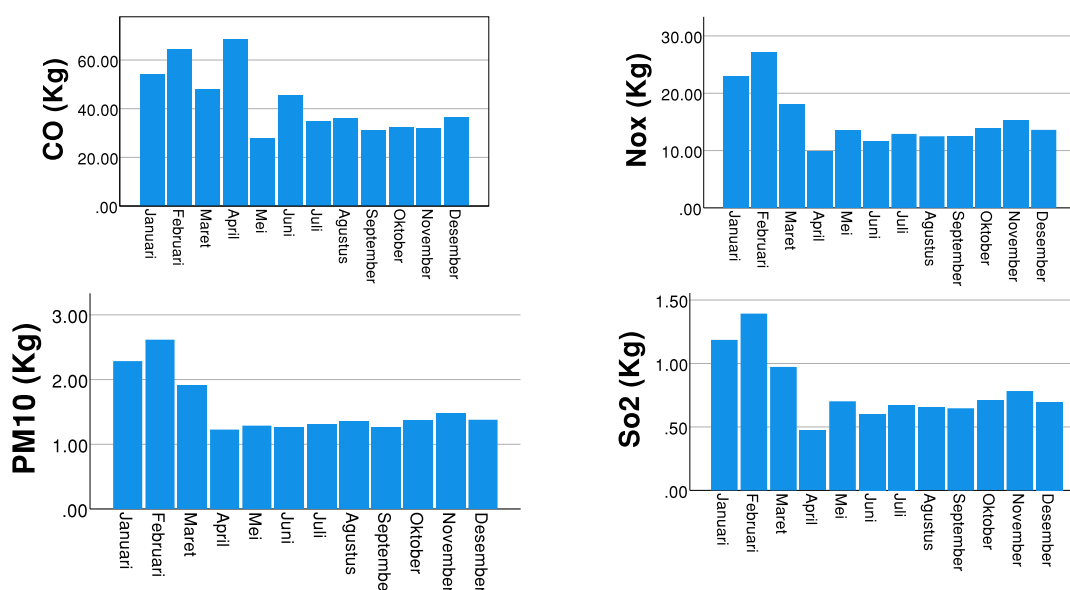


**Gambar 3. Beban Emisi akibat aktivitas kapal pada Pelabuhan penyeberangan kabupaten Kolaka**

**Tabel 9. Rata-rata beban emisi akibat aktivitas kapal pada Pelabuhan penyeberangan kabupaten kolaka**

|             | N  | Minimum<br>(Ton) | Maximum<br>(Ton) | Mean<br>(Ton/Bulan) |
|-------------|----|------------------|------------------|---------------------|
| Nox (Ton)   | 12 | 16.86            | 20.10            | 18.7317             |
| NMVOC (Ton) | 12 | 1.05             | 1.25             | 1.1692              |
| PM10 (Ton)  | 12 | 1.62             | 1.93             | 1.7967              |
| CO (Ton)    | 12 | 2.99             | 3.57             | 3.3258              |
| Sox (ton)   | 12 | 0.40             | 0.48             | 0.4483              |

### 3.5 Beban Emisi Kendaraan Bermotor



**Gambar 4. Beban Emisi akibat aktivitas bongkar muat kendaraan bermotor pada Pelabuhan penyeberangan kabupaten Kolaka**

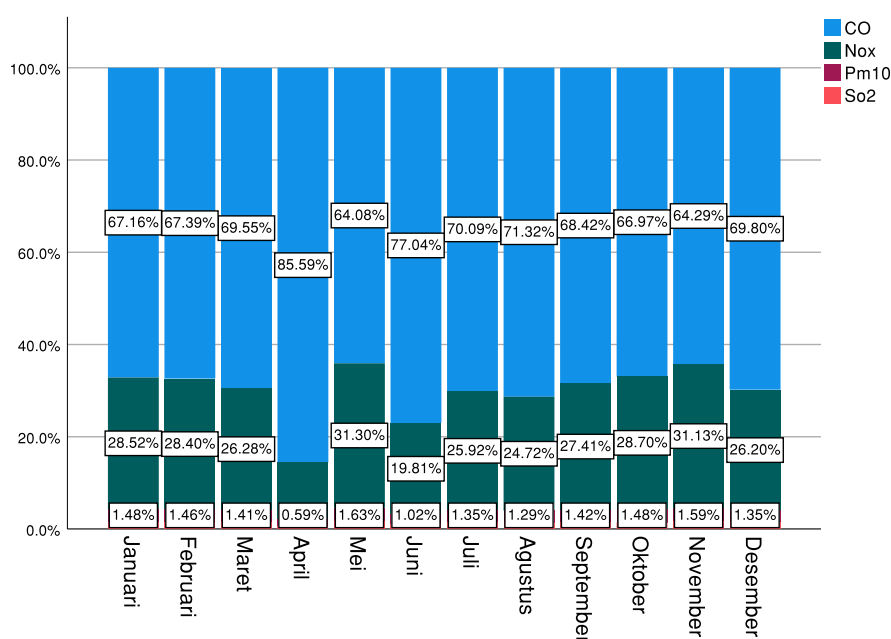
**Tabel 10. Rata-rata beban emisi akibat aktivitas bongkar muat kendaraan bermotor pada Pelabuhan penyeberangan kabupaten kolaka**

|           | N  | Minimum (kg) | Maximum (Kg) | Mean (kg/Bulan) |
|-----------|----|--------------|--------------|-----------------|
| CO (Kg)   | 12 | 27.59        | 68.61        | 42.49           |
| Nox (Kg)  | 12 | 9.85         | 27.05        | 15.31           |
| PM10 (Kg) | 12 | 1.23         | 2.62         | 1.55            |
| So2 (Kg)  | 12 | 0.47         | 1.39         | 0.79            |

Hasil analisis menggambarkan rata-rata beban emisi akibat aktivitas bongkar muat kendaraan bermotor di Pelabuhan Penyeberangan Kabupaten Kolaka sepanjang tahun 2023. Polutan utama yang diukur meliputi karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), partikel halus (PM<sub>10</sub>), dan sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>). Dari hasil analisis pada Tabel 10, karbon monoksida (CO) menjadi beban emisi dominan dengan rata-rata bulanan sebesar 42.49 kg, jauh lebih tinggi dibandingkan polutan lainnya. Sebaliknya, PM<sub>10</sub> dan SO<sub>2</sub> memiliki beban emisi rata-rata yang relatif kecil, masing-masing hanya sebesar 1.55 kg dan 0.79 kg per bulan.

Rentang nilai emisi menunjukkan bahwa aktivitas bongkar muat menghasilkan tingkat emisi yang beragam, tergantung pada intensitas dan jenis kendaraan bermotor yang terlibat. CO memiliki rentang emisi tertinggi, dari 27.59 kg hingga 68.61 kg per bulan, sementara PM<sub>10</sub> dan SO<sub>2</sub> menunjukkan rentang yang lebih kecil, yaitu 1.23–2.62 kg dan 0.47–1.39 kg per bulan. Variasi ini mencerminkan bahwa polutan seperti CO dan NO<sub>x</sub> lebih banyak dipengaruhi oleh volume kendaraan dan durasi mesin hidup selama proses bongkar muat, sedangkan SO<sub>2</sub> dan PM<sub>10</sub> relatif lebih terkontrol. Data ini dapat menjadi dasar penting untuk mengidentifikasi prioritas mitigasi emisi di pelabuhan guna meningkatkan kualitas udara setempat.

Persentase beban emisi dari empat polutan utama, yaitu CO, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, dan SO<sub>2</sub>, menunjukkan variasi yang signifikan setiap bulan. Emisi CO memiliki kontribusi dominan, dengan puncaknya mencapai 85% pada bulan April, yang kemungkinan besar disebabkan oleh tingginya jumlah kendaraan roda dua (golongan 2) sebanyak 4398 unit pada bulan tersebut. Sebaliknya, bulan Mei mencatat kontribusi CO terendah sebesar 64.08%. Polutan NO<sub>x</sub> juga menunjukkan fluktuasi, dengan kontribusi tertinggi sebesar 31.30% pada bulan Mei dan terendah 12.29% pada bulan April. Kontribusi PM<sub>10</sub>, meskipun lebih kecil, mencapai puncaknya di bulan Mei sebesar 2.99% dan terendah di bulan April sebesar 1,53%. Sementara itu, SO<sub>2</sub> memiliki kontribusi yang relatif stabil, dengan nilai tertinggi 1,63% di bulan Mei dan terendah 0,59% di bulan April. Tingginya kontribusi emisi CO pada bulan April mengindikasikan bahwa jumlah sepeda motor memainkan peran signifikan dalam peningkatan emisi polutan (Kaleka et al, 2023), khususnya CO, yang dapat menjadi perhatian utama dalam mitigasi emisi pada periode aktivitas kendaraan yang tinggi pada kendaraan di jalan raya (Ofriat et al, 2016).



**Gambar 5. Persentase Beban Emisi kendaraan bermotor pada Pelabuhan penyeberangan kabupaten Kolaka**

#### 4. Kesimpulan

Hasil analisis beban emisi dari aktivitas kapal laut di pelabuhan penyeberangan Kolaka tahun 2023. Berdasarkan analisis beban emisi tahunan pada tahun 2023, aktivitas kapal di Pelabuhan Penyeberangan Kabupaten Kolaka menjadi kontributor utama terhadap emisi polutan udara. Emisi terbesar berasal dari nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>) sebesar 224.78 ton/tahun, diikuti oleh karbon monoksida (CO) sebesar 39.91 ton/tahun dan partikel halus (PM<sub>10</sub>) sebesar 21.56 ton/tahun. Selain itu, senyawa organik volatil non-metana (NMVOC) mencapai 14.03 ton/tahun, sedangkan sulfur oksida (SO<sub>x</sub>) berada pada angka 5.38 ton/tahun. Aktivitas kapal secara signifikan mendominasi total emisi di pelabuhan. Sementara itu, aktivitas bongkar muat kendaraan bermotor memiliki kontribusi yang lebih kecil tetapi tetap penting untuk diperhatikan. Karbon monoksida (CO) merupakan emisi tertinggi dari aktivitas ini, yaitu 509.88 kg/tahun, diikuti oleh nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>) sebesar 183.72 kg/tahun, partikel halus (PM<sub>10</sub>) sebesar 18.6 kg/tahun, dan sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>) sebesar 9.48 kg/tahun. Meskipun dampaknya lebih terbatas dibandingkan dengan aktivitas kapal, aktivitas bongkar muat tetap memberikan kontribusi tambahan terhadap polusi udara di sekitar pelabuhan.

## 5. Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih terutama disampaikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Universitas Sembilanbelas November Kolaka yang memberikan kesempatan dan dukungannya pada penelitian ini.

## 6. Daftar Pustaka

- Agrawal, H., Malloy, Q. G. J., Welch, W. A., Wayne Miller, J., & Cocker, D. R. (2008). In-use gaseous and particulate matter emissions from a modern ocean going container vessel. *Atmospheric Environment*, 42(21), 5504–5510. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.02.053>
- Arisman, A., Rosdiana, R., & Adami, A. (2023). Estimasi Emisi Kendaraan Bermotor untuk Memprediksi Beban Pencemar Udara CO dan NO<sub>x</sub> di Tempat Pelelangan Ikan Kota Kendari. *Jurnal TELUK: Teknik Lingkungan UM Kendari*, 3(1), 008–013. <https://doi.org/10.51454/teluk.v3i1.541>
- Babo Martins, M. D. A. P., Huboyo, H. S., & Samadikun, B. P. (2022). Emisi Polutan Konvensional dari Aktivitas di Alur Pelayaran Pelabuhan Dili. *Jurnal Serambi Engineering*, 7(3). <https://doi.org/10.32672/jse.v7i3.4268>
- Barberi, S., Sambito, M., Neduzha, L., & Severino, A. (2021). Pollutant Emissions in Ports: A Comprehensive Review. *Infrastructures*, 6(8), 114. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6080114>
- BPS Kolaka. (2023). Kabupaten Kolaka dalam Angka, 2023. In Kabupaten Kolaka dalam Angka, 2023.
- Budiyanto, M. A., Habibie, M. R., & Shinoda, T. (2022). Estimation of CO<sub>2</sub> emissions for ship activities at container port as an effort towards a green port index. *Energy Reports*, 8, 229–236. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.090>
- Grigoriadis, A., Mamarikas, S., Ioannidis, I., Majamäki, E., Jalkanen, J.-P., & Ntziachristos, L. (2021). Development of exhaust emission factors for vessels: A review and meta-analysis of available data. *Atmospheric Environment: X*, 12, 100142. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2021.100142>
- Kaleka, Y. U., Anggraeni, D. M., Garung, E. R., & Deke, O. (2023). EMISI GAS RUMAH KACA (GRK) ON ROAD DENGAN TIER-2 DI SUMBA BARAT DAYA. 3.
- Ofriat, S. A. M. P., Ahyudanari, E., & Syafei, A. D. (2016). Estimation on the Increasing Value of CO Based on the Vehicle Growth in Surabaya. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 227, 410–416. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.06.094>
- Perčić, M., Vladimir, N., Fan, A., & Jovanović, I. (2022). Holistic Energy Efficiency and Environmental Friendliness Model for Short-Sea Vessels with Alternative Power Systems Considering Realistic Fuel Pathways and Workloads. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(5), 613. <https://doi.org/10.3390/jmse10050613>

- Sherbaz, S., & Duan, W. (2014). Ship Trim Optimization: Assessment of Influence of Trim on Resistance of MOERI Container Ship. *The Scientific World Journal*, 2014, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2014/603695>
- Trozi, C. (2010). Emission estimate methodology for maritime navigation. *Emission Estimate Methodology for Maritime Navigation*. Presented at the 9th International Emissions Inventory Conference, San Antonio, Texas. San Antonio, Texas: US Environmental Protection Agency. Retrieved from <https://www3.epa.gov/ttnchie1/conference/ei19/session10/trozzi.pdf>
- Tsanakas, N. (2019). Emission estimation based on traffic models and measurements. Linköping: Linköping University Electronic Press. <https://doi.org/10.3384/lic.diva-155771>
- Wibowo, D., Risal B., Muh., Sumarlin, S., Ilham, I., & Irawandani, T. D. (2023). Beban Emisi Kendaraan Bermotor di Pelabuhan Ferry Amolengo Konawe Selatan, Sulawesi Tenggara. *Jurnal Geografi, Edukasi Dan Lingkungan (JGEL)*, 7(2), 109–117. <https://doi.org/10.22236/jgel.v7i2.8194>