

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Emisi Gas Buang Kapal

Emisi gas buang kapal merupakan gas polutan yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar kapal, terutama yang menggunakan mesin diesel, Gas emisi utama yang dihasilkan meliputi nitrogen oksida (NO_x), sulfur oksida (SO_x), karbon dioksida (CO₂), karbon monoksida (CO), dan partikel halus (PM)[13]. Emisi ini menjadi salah satu penyebab pemanasan global, perubahan iklim, serta berdampak negatif pada kualitas udara dan kesehatan manusia terutama di area pelabuhan dan jalur pelayaran. Emisi dihasilkan dari bahan bakar yang dibakar di mesin kapal, khususnya minyak diesel, dan volume emisi dipengaruhi oleh konsumsi bahan bakar dari *main engine* serta *auxiliary engine* dan durasi operasi kapal[14].

Berbagai macam zat kimia yang menjadi polusi udara dapat berdampak pada kesehatan manusia, hewan, serta tumbuhan baik itu secara langsung (instan) maupun tidak langsung[15]. Berbagai bentuk pulusi udara seperti partikulat padat yang berterbangan. Tidak hanya bebentuk partikulat padat melainkan dapat berupa cairan seperti air hujan maupun bahan kimia lainnya yang dominan[16]. Secara khusus, emisi gas buang kapal mengandung:

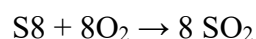
- Sulfur (SO₂)

Sulfur terdapat di bahan bakar yang digunakan dimana semakin banyak kandungan sulfur di bahan bakar tersebut maka mesin akan semakin bertenaga. Sulfur dioksida didapatkan dari proses pembakaran dan terbentuk pada suhu yang tinggi[17]. Dimana reaksi kimianya adalah sebagai berikut:

SO₂ dalam kandungan bahan bakar.



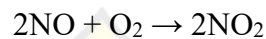
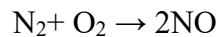
SO₂ hasil dari pembakaran



Sulfur dioksida (SO₂) dapat mengganggu sistem pernafasan, gangguan jantung, serta sifatnya korosif terhadap bahan metal.

- Komponen Nitrogen (NO_x)

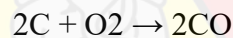
NO_x dapat berupa nitrogen monoksida (NO) dan nitrogen dioksida (NO₂). Dimana sifat dari NO adalah tidak berbau dan tidak berwarna sedangkan NO₂ memiliki bau menyengat dan berwarna merah kecoklatan, Nitrogen ini didapatkan dari udara sekitar yang mana 79% adalah Nitrogen (N) dan akan terbentuk NO_x diruang bakar pada suhu tinggi[18]. Berikut adalah reaksi kimianya sebagai berikut:



NO_x dapat mengakibatkan iritasi mata, gangguan pernafasan, gangguan jantung, serta memicu kanker paru-paru.

- Karbon Monoksida (CO)

CO_x dapat berupa karbon monoksida (CO) maupun karbon dioksida (CO₂), namun karbon monoksida (CO) sangat berbahaya bagi kesehatan manusia, dan karbon monoksida hasil dari pembakaran yang tidak sempurna[19]. Dimana reaksi kimianya sebagai berikut:



Karbon monoksida (CO) apabila terhirup ke dalam paru-paru akan ikut peredaran darah dan akan menghalangi masuknya oksigen yang dibutuhkan oleh tubuh. Hal ini dapat terjadi karena gas CO yang bersifat racun, ikut bereaksi secara metabolis dengan darah (hemoglobin):



- Karbon dioksida (CO₂)

CO₂ dihasilkan melalui oksidasi karbon dalam proses respirasi, pembakaran, dan dekomposisi organik, tetapi emisi antropogenik mendominasi karena aktivitas industri dan transportasi. Tidak seperti VOC, CO₂ tidak mudah bereaksi secara fotokimia tapi akumulasi jangka panjangnya meningkatkan suhu bumi hingga 1,1°C sejak era pra-industri. Gas ini berperan utama sebagai gas rumah kaca yang menjebak panas matahari, menyebabkan pemanasan global. Sumber utama meliputi pembangkit listrik (sekitar 40% emisi global), transportasi (termasuk kapal dengan *hybrid propulsion* sebagai solusi), dan deforestasi[20]. Di sektor

maritim, emisi CO₂ dari kapal kontribusi signifikan terhadap total emisi IMO, dengan regulasi seperti EEDI dan CII untuk pengurangan. Emisi CO₂ mempercepat perubahan iklim, naiknya permukaan laut, dan cuaca ekstrem, serta secara tidak langsung memengaruhi Kesehatan melalui polusi silang dengan NO_x.

- *Volatile Organic Compounds (VOC)*

VOC didefinisikan sebagai senyawa karbon yang terlibat dalam reaksi fotokimia atmosfer, menurut standar seperti EPA. Senyawa ini berasal dari sumber seperti pembakaran bahan bakar kendaraan, proses industri, cat, perekat, dan bahkan aktivitas alam seperti pembusukan organik. VOC berkontribusi pada pembentukan ozon permukaan (*smog fotokimia*) melalui reaksi dengan NO_x di bawah sinar matahari, serta memperburuk efek rumah kaca secara tidak langsung dengan mengurangi radikal OH yang memecah metana. Satu ton VOC bisa setara dengan 1,5-3 ton CO₂ dalam potensi pemanasan global[21].

Paparan VOC dapat menyebabkan iritasi mata, hidung, dan tenggorokan, serta masalah pernapasan jangka panjang pada manusia. Di sektor maritim, emisi ini relevan dengan regulasi MARPOL untuk mengurangi polusi udara dari kapal.

- *Particulate Matter (PM)*

Particulate Matter adalah partikel emisi padat yang sangat berbahaya dimana tingkat bahaya dari PM bergantung pada diameternya, misalnya PM₁₀ yang memiliki diameter 10 µm yang dihasilkan oleh mesin diesel dimana PM dapat menyebabkan penyakit *cardiovasvular*[22].

2.1.1 Faktor Yang Mempengaruhi Emisi Gas Buang Kapal

Emisi kapal dipengaruhi oleh beragam faktor teknis dan operasional termasuk jenis bahan bakar (HFO, MDO, HSD), efisiensi mesin, ukuran kapal, kecepatan operasi, pola pelayaran. Selain itu, kondisi cuaca dan kondisi muatan kapal juga turut menentukan besar kecilnya konsumsi bahan bakar dan emisi[23].

Sementara data AIS dapat membantu mengidentifikasi kategori kapal berdasarkan MMSI, Jenis bahan bakar, dan teknologi mesin juga sangat penting bahan bakar diesel tinggi sulfur meningkatkan SO_x dan PM, sedangkan LNG atau

mesin modern dengan (*scrubber*) dapat mengurangi emisi, meskipun data AIS perlu dikombinasikan dengan database kapal untuk estimasi akurat[24]. Kecepatan dan mode operasi kapal memainkan peran penting, dengan kecepatan tinggi meningkatkan konsumsi bahan bakar secara eksponensial, sedangkan mode berlabuh atau manuver lambat di pelabuhan seperti Tanjung Priok berkontribusi signifikan terhadap emisi NO_x, yang dapat diukur langsung melalui data AIS seperti kecepatan dan waktu di lokasi.

2.1.2 Karakteristik Jenis Bahan Bakar Di Kapal

Bahan bakar kapal memiliki karakteristik fisik dan kimia spesifik yang disesuaikan dengan jenis mesin diesel berdasarkan RPM, sesuai standar ISO 8217 dan regulasi IMO seperti sulfur cap 0.5% global[25]. Terdapat beberapa Jenis bahan bakar yang sering digunakan di kapal serta karakteristik dari bahan bakar tersebut:

- *Heavy Fuel Oil* (HFO)
bahan bakar kapal paling umum untuk mesin diesel utama putaran rendah, berupa residu kental dari penyulingan minyak bumi yang berwarna hitam pekat dan memerlukan pemanasan untuk mengalir. HFO memiliki viskositas tinggi 180-380 cSt pada 50°C (MFO 180/380), densitas 950-1010 kg/m³, flash point >65°C, dan pour point rendah untuk mencegah pengkristalan di laut dingin; sering disebut bunker fuel atau HSFO dengan sulfur hingga 3.5-4% pre-IMO 2020[26].
- *Marine Diesel Oil* (MDO)
bahan bakar kapal campuran antara distilat gas oil dan residu fuel oil ringan, digunakan pada mesin diesel putaran rendah hingga menengah (<1000 RPM), dengan karakteristik lebih encer dari pada HFO untuk aliran lebih mudah. MDO memiliki viskositas sedang 2-12 cSt pada 40-50°C, densitas 890-920 kg/m³ (lebih tinggi dari bensin tapi lebih rendah dari HFO), flash point >60-70°C untuk keselamatan, dan cetane number tinggi (>45) mirip solar untuk pembakaran efisien; sering memerlukan pemanasan ringan[27].
- *High Speed Diesel* (HSD)
bahan bakar distilat murni untuk mesin diesel putaran tinggi (>1000 RPM), seperti *auxiliary engine* atau sistem *hybrid propulsion* pada kapal penumpang. HSD memiliki viskositas rendah 2-5 cSt pada 40°C (paling

encer di antara bahan bakar kapal), densitas 815-870 kg/m³, *flash point* >60°C untuk keselamatan, dan *pour point* rendah agar tetap cair di iklim dingin serta tidak butuh pemanasan intensif seperti HFO[28].

- *Marine Gas Oil* (MGO)

bahan bakar kapal berbasis distilat murni (non-residu), mirip diesel otomotif tapi dengan densitas lebih tinggi, digunakan untuk mesin diesel putaran tinggi atau auxiliary engine tanpa pemanasan intensif. MGO memiliki viskositas sangat rendah 1.5-6 cSt pada 40°C, densitas 850-890 kg/m³ pada 15°C, *flash point* >60°C untuk penyimpanan aman, dan *cetane number* tinggi (>45) agar pembakaran spontan cepat, dan *pour point* rendah cocok iklim dingin[29].

- *Liquefied Natural Gas* (LNG)

bahan bakar kapal modern berupa gas alam yang dicairkan pada suhu kriogenik sekitar -162°C pada tekanan atmosfer, mengurangi volumenya hingga 1/600 dari bentuk gas untuk penyimpanan efisien di tangki khusus. LNG tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak beracun, dengan densitas rendah 420-480 kg/m³ (setengah dari air), titik didih -162°C, dan nilai kalor tinggi 50-56 MJ/kg, membutuhkan isolasi vakum untuk cegah *boil-off gas* (BOG) selama operasi kapal[30].

2.1.3 Standar Pengukuran Emisi Gas Buang Dari Kapal

Pengukuran emisi gas buang kapal di Indonesia berpedoman pada standar internasional yang disusun oleh IMO dalam MARPOL Annex VI serta panduan IPCC, yang mengatur batas kandungan sulfur dalam bahan bakar dan cara perhitungan emisi NO_x, CO, CO₂, VOC, SO_x, dan PM. Standar ini diadopsi untuk menjaga konsistensi data emisi dan memfasilitasi pelaporan transparan baik nasional maupun internasional, Implementasi standar ini juga menjadi dasar regulasi nasional dan kebijakan mitigasi dampak lingkungan maritim[31].

2.2 Regulasi Emisi Gas Buang Kapal Menurut IMO

International Maritime Organization (IMO) adalah badan khusus Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) yang bertanggung jawab atas regulasi keselamatan, keamanan, dan perlindungan lingkungan di sektor maritim internasional[32]. IMO telah menetapkan berbagai regulasi untuk mengendalikan

emisi gas buang dari kapal, yang bertujuan mengurangi dampak polusi udara terhadap kesehatan manusia, ekosistem laut, dan perubahan iklim. Regulasi utama terkait emisi gas buang diatur dalam MARPOL (*International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*) Annex VI: Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships, yang mulai berlaku pada 19 Mei 2005 dan telah direvisi berkali-kali untuk memperketat standar[33].

Annex VI mencakup emisi utama seperti sulfur oksida (SO_x), nitrogen oksida (NO_x), partikulat halus (PM), dan gas rumah kaca (GHG) seperti karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan dinitrogen oksida (N₂O). Regulasi ini bersifat mengikat bagi negara-negara anggota IMO (lebih dari 170 negara, termasuk Indonesia), dan kapal yang berbendera negara anggota harus mematuhi. Pelanggaran dapat mengakibatkan denda, penahanan kapal, atau larangan beroperasi di pelabuhan internasional[34]. Berikut penjelasan rinci mengenai regulasi utama:

1. Regulasi Emisi SO_x (Sulfur Oksida)

SO_x adalah emisi utama dari pembakaran bahan bakar kapal berbasis sulfur tinggi, yang menyebabkan hujan asam dan masalah pernapasan. Regulasi difokuskan pada pengurangan kandungan sulfur dalam bahan bakar kapal (*marine fuel oil*).

- Global Sulfur Cap:
 - Mulai 1 Januari 2012: Maksimal 3,5% sulfur (sebelumnya 4,5%).
 - Mulai 1 Januari 2020: Turun menjadi 0,5% sulfur secara global (dikenal sebagai IMO 2020). Ini berarti kapal harus menggunakan bahan bakar rendah sulfur (VLSFO - Very Low Sulfur Fuel Oil) atau alternatif seperti LNG (*Liquefied Natural Gas*).
- *Emission Control Areas* (ECAs): Wilayah khusus dengan standar lebih ketat untuk mengurangi emisi di daerah sensitif. Saat ini, ada empat ECA: *Baltic Sea*, *North Sea*, *North American* (AS dan Kanada), dan *US Caribbean Sea*.
 - Di ECA: Maksimal 0,1% sulfur sejak 1 Januari 2015.
 - Alternatif kepatuhan: Penggunaan *scrubber* (pencuci gas buang) atau bahan bakar alternatif seperti MGO (*Marine Gas Oil*).

Dampak: Regulasi ini telah mengurangi emisi SO_x global hingga 70-80% sejak 2020, menurut laporan IMO.

2. Regulasi Emisi NO_x (Nitrogen Oksida)

NO_x terbentuk dari pembakaran suhu tinggi dan berkontribusi terhadap *smog fotokimia*, ozon troposfer, dan hujan asam. Regulasi menggunakan pendekatan bertahap berdasarkan "*Tier*" (tingkatan), yang diterapkan pada kapal baru berdasarkan tanggal pembangunan.

- *Tier I*: Berlaku untuk kapal diesel dibangun pada atau setelah 1 Januari 2004 (reduksi NO_x 30-50% dari *baseline* 1988).
- *Tier II*: Berlaku untuk kapal dibangun pada atau setelah 1 Januari 2011 (reduksi tambahan 20% dari *Tier I*).
- *Tier III*: Berlaku untuk kapal dibangun pada atau setelah 1 Januari 2016 yang beroperasi di ECA (reduksi 80% dari *baseline*). Di luar ECA, *Tier II* masih berlaku.
- Metode Kepatuhan: Teknologi seperti *Selective Catalytic Reduction* (SCR), *Exhaust Gas Recirculation* (EGR), atau bahan bakar rendah NO_x. IMO juga mendorong desain mesin yang efisien.

3. Regulasi Emisi Partikulat Halus (PM) dan Karbon Hitam (*Black Carbon*)

PM berasal dari pembakaran tidak sempurna bahan bakar dan berdampak pada kualitas udara serta kesehatan pernapasan. Meskipun tidak ada batas spesifik langsung, PM dikendalikan secara tidak langsung melalui regulasi SO_x dan NO_x.

- Pengurangan SO_x secara global telah menurunkan PM hingga 50%, karena partikulat sulfat adalah komponen utama PM dari kapal.
- Untuk Arktik: IMO mengadopsi panduan pengurangan *black carbon* (2021) melalui resolusi MEPC.369(79), mendorong penggunaan bahan bakar rendah BC di wilayah kutub.

4. Regulasi Emisi Gas Rumah Kaca (GHG)

IMO mengakui sektor maritim menyumbang sekitar 2-3% emisi CO₂ global (sekitar 1 miliar ton CO₂ per tahun). Regulasi GHG difokuskan pada efisiensi energi daripada batas emisi langsung.

- *Energy Efficiency Design Index (EEDI)*: Berlaku untuk kapal baru (300 *gross ton* ke atas) sejak 2013. EEDI mengharuskan kapal mencapai efisiensi energi minimal (gram CO₂ per ton-mil), dengan target pengurangan bertahap: 10% (Fase 0, 2013-2015), 20% (Fase 1, 2015-2020), hingga 30% (Fase 2, 2022-2025), dan 40% (Fase 3, 2025+ untuk kapal tertentu).
- *Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)*: Wajib untuk semua kapal sejak 2013, termasuk *Part III (Data Collection System)* sejak 2019, untuk memantau dan melaporkan konsumsi bahan bakar dan emisi CO₂.
- *Carbon Intensity Indicator (CII)*: Berlaku untuk kapal existing (5.000 *gross ton* ke atas) sejak 1 Januari 2023. CII mengukur intensitas karbon tahunan dan memberi rating (A-E), dengan target pengurangan 2-40% hingga 2030.
- IMO GHG *Strategy* (2018, direvisi 2023):
 - Target jangka pendek: Pengurangan emisi GHG 20-30% (benchmark 2008) pada 2030.
 - jangka menengah: 70-80% pada 2040.
 - jangka panjang: *Net-zero* emisi GHG sekitar 2050. Strategi ini mencakup langkah seperti FuelEU Maritime (mirip EU ETS) dan potensi global carbon levy[34].

2.3 International Maritime Organization (IMO)

2.3.1 Tujuan Pembangunan Berkelanjutan Perserikatan Bangsa-Bangsa

Pada tahun 2015, 193 negara mengadopsi Agenda 2030 untuk Pembangunan Berkelanjutan dan 17 Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs). Sebagai bagian dari Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB), IMO secara aktif bekerja menuju pencapaian Agenda 2030 untuk Pembangunan Berkelanjutan. Memang, sebagian besar unsur Agenda 2030 hanya dapat terwujud dengan sektor transportasi yang berkelanjutan yang mendukung perdagangan dunia dan memfasilitasi perekonomian global. Komite Kerja Sama Teknis IMO secara resmi menyetujui hubungan antara pekerjaan bantuan teknis Organisasi dengan SDGs[35].

Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) memberikan pedoman untuk transisi menuju planet yang lebih sehat dan dunia yang lebih adil — bagi generasi saat ini dan mendatang. Dengan target yang konkret, tujuan-tujuan ini bertujuan untuk mengakhiri kemiskinan dan kelaparan, memperluas akses ke kesehatan,

pendidikan, keadilan, dan pekerjaan, mempromosikan pertumbuhan ekonomi yang inklusif dan berkelanjutan, sambil melindungi planet kita dari degradasi lingkungan[36].

2.3.2 Aksi Untuk Manusia Dan Planet

Dekade 2020-2030 harus bertindak dan menerapkan tujuan ini, untuk mencapai hal tersebut, Sekretaris Jenderal Perserikatan Bangsa-Bangsa, Antonio Guterres, telah meminta semua pemimpin dunia untuk fokus pada Tujuan Pembangunan Berkelanjutan.

Organisasi Maritim Internasional, sejalan dengan Sekretariat IMO Strategi SDG, bekerja untuk lebih meningkatkan kesadaran akan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan Perserikatan Bangsa-Bangsa dan untuk mendukung Negara-negara Anggota dalam upaya mereka untuk mengimplementasikan Agenda 2030 dan menjadikan 2020-2030 sebagai satu dekade tindakan[35].



Gambar 2. 1 Simbol *SDG's*

Sumber: *Sustainable Development Goals*



Mengakhiri kemiskinan dalam segala bentuknya di mana-mana

Miliaran orang di seluruh dunia mengandalkan transportasi laut dalam kehidupan sehari-hari mereka – meskipun mereka mungkin tidak menyadarinya. Sebagai cara yang paling hemat biaya dan hemat bahan bakar untuk membawa barang, pengiriman membentuk tulang punggung perdagangan dunia. Ini

menyediakan sarana transportasi yang dapat diandalkan dan berbiaya rendah, memfasilitasi perdagangan dan membantu menciptakan kemakmuran di antara bangsa dan masyarakat. Dengan menyediakan akses yang lebih baik ke bahan dasar, barang, dan produk, pengiriman diharapkan dapat membantu mengangkat jutaan orang keluar dari kemiskinan.

Pelayaran adalah komponen penting dari setiap program untuk pertumbuhan ekonomi berkelanjutan di masa depan. Melalui IMO, Negara-negara Anggota Organisasi, masyarakat sipil dan industri perkapalan bekerja sama untuk memastikan kontribusi yang berkelanjutan dan diperkuat terhadap ekonomi hijau dan pertumbuhan yang berkelanjutan.

IMO adalah otoritas penetapan standar global untuk pengiriman internasional. Ini telah mengadopsi lebih dari 50 instrumen internasional yang, bersama-sama, menciptakan kerangka peraturan yang memastikan pengiriman aman, terjamin, dan ramah lingkungan.



Mengakhiri kelaparan, mencapai ketahanan pangan dan peningkatan mempromosikan pertanian berkelanjutan.

Ikan adalah sumber nutrisi utama secara global, dan IMO bekerja sama dengan Organisasi Pangan dan Pertanian Perserikatan Bangsa-Bangsa (FAO) untuk mengatasi penangkapan ikan ilegal, tidak dilaporkan, dan tidak diatur (IUU). IUU *Fishing* adalah masalah serius bagi sektor perikanan global yang berdampak negatif pada keselamatan, masalah lingkungan, konservasi dan keberlanjutan. Selain merugikan populasi ikan, penangkapan ikan IUU menciptakan persaingan pasar yang tidak adil untuk – dan mengancam mata pencaharian – nelayan yang mengikuti praktik berkelanjutan.

Dalam konteks yang lebih luas, pengiriman internasional memainkan peran penting dalam impor dan ekspor makanan di seluruh dunia, memastikan bahwa petani, produsen, dan konsumen semuanya memiliki akses satu sama lain. Langkah-langkah IMO memastikan bahwa pengiriman aman, terjamin, dan ramah lingkungan.



Memastikan hidup sehat dan mempromosikan kesejahteraan untuk semua orang di segala usia.

Lebih dari satu miliar orang tinggal di daerah pesisir dan jumlah ini akan meningkat tajam di tahun-tahun mendatang. Konvensi IMO dan instrumen lainnya tidak hanya berkontribusi pada pengurangan polusi terkait pelayaran di lautan yang lebih luas, tetapi juga di pelabuhan dan wilayah pesisir.

1 Januari 2020 terjadi penerapan penurunan kandungan sulfur bahan bakar minyak yang digunakan oleh kapal yang signifikan. Hal ini berdampak menguntungkan bagi lingkungan dan kesehatan manusia, terutama orang-orang yang tinggal di kota pelabuhan dan masyarakat pesisir, di luar Wilayah Pengendalian Emisi yang ada.



Memastikan pendidikan berkualitas yang inklusif dan merata serta mempromosikan kesempatan belajar seumur hidup.

Dalam dunia maritim, pendidikan dan pelatihan sangat penting. Tetapi pentingnya mereka jauh melampaui pengiriman itu sendiri. Keselamatan dan keamanan kehidupan di laut, perlindungan lingkungan laut dan pergerakan perdagangan global yang efisien bergantung pada profesionalisme dan kompetensi pelaut. Konvensi Internasional IMO tentang Standar Pelatihan, Sertifikasi, dan Pengawasan untuk Pelaut - *Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers* (STCW) menetapkan standar kompetensi global untuk pelaut dan mekanisme yang efektif.

IMO juga berkontribusi pada pendidikan yang inklusif dan berkualitas tinggi dengan menyediakan kegiatan pelatihan, khususnya melalui program kerja sama teknis dan lembaga pelatihan maritim – *World Maritime University* (WMU) dan IMO *International Maritime Law Institute* (IMLI).



Mencapai kesetaraan gender dan memberdayakan semua perempuan dan anak perempuan.

Perkapalan secara historis merupakan industri yang didominasi laki-laki dan tradisi itu berjalan panjang dan mendalam. Namun, IMO percaya bahwa pemberdayaan perempuan mendorong ekonomi yang berkembang, memacu produktivitas dan pertumbuhan, serta menguntungkan setiap pemangku

kepentingan dalam komunitas maritim global. Melalui program Women in Maritim, IMO mendorong Negara-negara Anggotanya untuk memungkinkan perempuan berlatih bersama laki-laki di lembaga maritim mereka dan memperoleh kompetensi tingkat tinggi yang dituntut oleh industri maritim.



Memastikan akses ke air dan sanitasi untuk semua

Ada cukup air tawar di planet ini bagi semua orang untuk memiliki akses ke air bersih. Namun karena ekonomi yang buruk atau infrastruktur yang buruk, setiap tahun jutaan orang meninggal karena penyakit yang terkait dengan pasokan air, sanitasi, dan kebersihan yang tidak memadai. Pengelolaan pembuangan dan pembuangan limbah yang efektif sangat penting jika tujuan ini ingin dicapai; Konvensi London dan Protokolnya mengatur pembuangan dan pembuangan limbah di laut, komponen kunci dari siklus pengelolaan limbah secara keseluruhan.



Memastikan akses ke energi yang terjangkau, andal, berkelanjutan, dan modern untuk semua

IMO berkontribusi pada kerja sama internasional untuk memfasilitasi akses ke penelitian dan teknologi energi bersih, khususnya efisiensi energi dan teknologi bahan bakar fosil yang canggih dan lebih bersih, dan mempromosikan investasi dalam infrastruktur energi dan teknologi energi bersih.

IMO mengakui bahwa negara-negara berkembang, khususnya LDC dan SIDS, memiliki kebutuhan khusus sehubungan dengan pengembangan kapasitas dan kerja sama teknis.

- Inisiatif IMO yang relevan yang mendukung pengurangan emisi GRK dari kapal dan energi bersih meliputi:
- Program Kerja Sama Teknis Terpadu (ITCP) IMO
- dana perwalian multi-donor sukarela ("GRK TC-Trust Fund")
- proyek yang didukung Uni Eropa Jaringan Pusat Kerjasama Teknologi Maritim Global (MTCC) (GMN)
- Norwegia mendukung proyek *Green Voyage 2050*

- Program GHG-SMART dan Bahan Bakar dan Teknologi Masa Depan untuk Proyek Pengiriman Rendah dan Nol Karbon (proyek FFT) yang didukung oleh Republik Korea
- proyek Kemitraan GloFouling UNDP-GEF
- Norwegia mendukung proyek *TEST Biofouling* (Transfer Teknologi Ramah Lingkungan)
- Proyek Yayasan IMO CARES (Tindakan Terkoordinasi untuk Mengurangi Emisi dari Pengiriman) yang didukung Kerajaan Arab Saudi
- Forum Inovasi IMO-UNEP-Norwegia
- Meja Bundar Pembiayaan Transportasi Maritim Berkelanjutan (FIN-SMART) yang dipimpin bersama oleh IMO-EBRD-Bank Dunia
- dan portal NextGEN (Navigasi Hijau dan Efisien) dan proyek NextGEN *Connect*.



Mempromosikan pertumbuhan ekonomi yang inklusif dan berkelanjutan, lapangan kerja penuh dan produktif serta pekerjaan yang layak untuk semua.

Saat ini kita semua bergantung pada pelaut untuk sebagian besar hal yang kita anggap remeh dalam kehidupan kita sehari-hari. Lebih dari satu juta pelaut mengoperasikan armada global – mereka membawa kebutuhan pokok dan kemewahan hidup bagi miliaran orang. Pengiriman sangat penting bagi dunia – tetapi tidak akan ada pengiriman tanpa pelaut.

Kepedulian terhadap kesejahteraan pelaut, baik sebagai karyawan maupun sebagai individu, dapat dilihat dalam pekerjaan berkelanjutan IMO pada isu-isu seperti kelelahan, perlakuan yang adil dan kewajiban serta kompensasi bagi pelaut – belum lagi Hari Pelaut tahunan, yang dirayakan setiap tahun pada tanggal 25 Juni, ketika IMO berkampanye secara global untuk memberikan pengakuan yang lebih luas kepada pelaut.

IMO juga bekerja sama dengan Organisasi Buruh Internasional (ILO) untuk mengatasi berbagai masalah terkait layanan kesehatan dan perlindungan jaminan sosial bagi pelaut.



Membangun infrastruktur yang tangguh, mempromosikan industrialisasi yang inklusif dan berkelanjutan, serta mendorong inovasi.

Kemajuan teknologi, seperti kapal otonom dan perkembangan di sektor pelabuhan, adalah kunci untuk membangun infrastruktur yang tangguh dan menjadi pusat dari berfungsinya seluruh sektor transportasi secara efektif dan, oleh karena itu, pendorong utama untuk penyampaian banyak SDGs. Pada akhirnya, pelayaran yang lebih efisien, bekerja dalam kemitraan dengan sektor pelabuhan, akan menjadi pendorong utama menuju stabilitas global dan pembangunan berkelanjutan untuk kebaikan semua orang. IMO berkontribusi pada SDG 9 dengan menyediakan kerangka hukum dan peraturan, inisiatif pengembangan kapasitas, dan forum bagi Negara-negara Anggota untuk bertukar pengetahuan dan pengalaman.

Peraturan IMO untuk pengiriman memberikan fokus nyata bagi inovator dan teknolog untuk mengembangkan solusi teknis yang inovatif dan mengubah permainan. Menanggapi peraturan IMO, teknologi baru telah membawa perubahan bermanfaat yang signifikan dalam cara kapal dirancang, dibangun, dan dioperasikan, berkontribusi pada rantai pasokan global yang lebih saling terhubung dan efisien.

Investasi, pertumbuhan dan peningkatan di sektor pelayaran dan pelabuhan merupakan indikasi yang jelas dari suatu negara atau wilayah yang menikmati kesuksesan di masa kini dan merencanakan lebih banyak kesuksesan di masa depan.

Dengan mempromosikan perdagangan melalui laut, memelihara jalur pelayaran nasional dan mempromosikan pelayaran sebagai karir; dengan meningkatkan infrastruktur dan efisiensi pelabuhan; dengan mengembangkan dan memperkuat hubungan antar-moda dan koneksi pedalaman; Dengan mengelola dan melindungi perikanan, mengeksplorasi produksi energi lepas pantai dan bahkan dengan mendorong pariwisata – aktivitas maritim dapat mendorong dan mendukung pertumbuhan ekonomi nasional.

Peningkatan pembangunan ekonomi, didukung oleh pembangunan maritim yang berkelanjutan dan didukung oleh keamanan maritim yang baik, mendukung Agenda Pembangunan Pasca-2015 dan melengkapi inisiatif Perserikatan Bangsa-

Bangsa dengan mengatasi beberapa faktor yang menyebabkan ketidakstabilan, ketidakamanan, dan migrasi campuran yang tidak terkendali.



Mengurangi ketimpangan di dalam dan di antara negara.

IMO berkontribusi pada SDG 10 dengan memberikan bantuan kerja sama teknis yang luas kepada negara-negara berkembang. Sementara Organisasi mengadopsi peraturan pelayaran internasional, merupakan tanggung jawab pemerintah untuk menerapkan peraturan tersebut. Program Kerja Sama Teknis Terpadu (ITCP) IMO dirancang untuk membantu pemerintah yang kekurangan pengetahuan teknis dan sumber daya yang diperlukan untuk mengoperasikan industri perkapalan dengan aman dan efisien.

ITCP IMO memiliki pernyataan misi untuk “membantu negara-negara berkembang meningkatkan kemampuan mereka untuk mematuhi aturan dan standar internasional yang berkaitan dengan keselamatan maritim dan pencegahan dan pengendalian polusi maritim, memberikan prioritas pada program bantuan teknis yang berfokus pada pengembangan sumber daya manusia dan pengembangan kapasitas kelembagaan.”



Membuat kota dan pemukiman manusia inklusif, aman, tangguh, dan berkelanjutan.

Kota dan komunitas yang berkelanjutan bergantung pada rantai pasokan yang aman. Pekerjaan IMO untuk meningkatkan keselamatan dan keamanan maritim membantu melindungi infrastruktur logistik global.

Agar hubungan antara kapal, pelabuhan, kota dan orang-orang yang tinggal di dalamnya aman, tangguh, dan berkelanjutan, mereka juga harus aman. IMO membantu Negara-negara Anggotanya meningkatkan keamanan maritim, dengan fokus pada apa yang dapat dilakukan oleh industri maritim, yang mencakup sektor pelayaran dan pelabuhan, untuk melindungi dirinya sendiri dan untuk melindungi perdagangan maritim global. Penekanannya adalah pada keamanan preventif melalui manajemen risiko, pencegahan dan transfer ancaman, meningkatkan standar global dan menetapkan norma untuk keselamatan, keamanan dan efisiensi

pelabuhan dan untuk otoritas negara pelabuhan dan pesisir. Melalui pekerjaannya pada fasilitasi lalu lintas maritim internasional, IMO juga memiliki minat dalam migrasi melalui laut, mencegah penyelundupan narkoba, keamanan siber dan pencegahan penumpang gelap.



Memastikan pola konsumsi dan produksi yang berkelanjutan.

IMO berkontribusi pada SDG 12 melalui pengurangan timbulan limbah, baik limbah operasional dari kapal (melalui Konvensi MARPOL) maupun pembuangan limbah di bawah Konvensi dan Protokol London (LC/LP). Untuk sampah dan beberapa jenis sampah lainnya yang dihasilkan di atas kapal, MARPOL mewajibkan negara-negara pelabuhan untuk menyediakan fasilitas penerimaan yang memadai untuk pengelolaan sampah yang aman dan sehat.

IMO juga bekerja untuk meningkatkan kapasitas teknis dalam pengelolaan air limbah di atas kapal dan di pelabuhan, dan untuk mempromosikan daur ulang, teknologi produksi yang lebih bersih, dan pola konsumsi yang lebih berkelanjutan.

Konvensi Internasional Hong Kong IMO, yang menyediakan kerangka kerja untuk daur ulang kapal itu sendiri yang aman dan ramah lingkungan, akan mulai berlaku pada 26 Juni 2025.



Mengambil tindakan segera untuk memerangi perubahan iklim dan dampaknya.

Menanggapi perubahan iklim adalah salah satu tantangan terbesar di era kita dan salah satu yang sedang bekerja keras untuk ditangani oleh IMO. Dalam perannya sebagai regulator global pelayaran internasional, IMO telah mengembangkan serangkaian tindakan yang dirancang untuk mengendalikan emisi gas rumah kaca (GRK) dari sektor perkapalan.

IMO terus berkontribusi dalam perjuangan global melawan perubahan iklim, dalam mendukung Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (*Goal 13*), untuk mengambil tindakan mendesak untuk memerangi perubahan iklim dan dampaknya.

Pada Juli 2023, Negara Anggota IMO mengadopsi Strategi IMO 2023 tentang Pengurangan Emisi GRK dari Kapal. Ini merevisi strategi IMO awal 2018, menempatkan target yang ditingkatkan untuk mengatasi emisi berbahaya.

Berkat IMO, pelayaran internasional adalah sektor industri global pertama yang tunduk pada peraturan dan standar efisiensi energi wajib yang mengikat yang dirancang untuk mengatasi emisi GRK di seluruh industri.

Emisi dari pelayaran internasional diatur oleh Lampiran VI Konvensi MARPOL IMO. Mereka mencakup polusi udara, efisiensi energi, dan emisi gas rumah kaca.

Selain itu, Protokol London membahas penangkapan dan penyerapan karbon dalam formasi geologi bawah laut dan geoenjineering kelautan, seperti pemupukan laut, yang memiliki potensi besar untuk mitigasi perubahan iklim.

Memerangi perubahan iklim akan terus menjadi arah strategis yang penting bagi IMO, baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang. IMO akan terus mengembangkan solusi yang tepat, ambisius, dan realistis untuk meminimalkan kontribusi pelayaran terhadap polusi udara dan dampaknya terhadap perubahan iklim.



Melestarikan dan memanfaatkan lautan, laut, dan sumber daya laut secara berkelanjutan untuk pembangunan berkelanjutan.

Karena pelayaran internasional terjadi di lautan dunia, pekerjaan IMO, yang bertanggung jawab atas langkah-langkah untuk meningkatkan keselamatan dan keamanan pelayaran internasional dan untuk mencegah polusi dari kapal, merupakan bagian integral dari sebagian besar, jika tidak semua, target SDG 14. Agar berkelanjutan, aktivitas manusia harus diimbangi dengan kapasitas lautan untuk tetap sehat dan beragam dalam jangka panjang. Bagian utama dari peran IMO adalah untuk memastikan bahwa pelayaran terus memberikan kontribusinya terhadap ekonomi global tanpa mengganggu keseimbangan yang rapuh itu.

IMO mencakup semua aspek pelayaran internasional – termasuk desain kapal, konstruksi, peralatan, personel, operasi dan pembuangan – untuk memastikan bahwa sektor vital ini tetap aman, ramah lingkungan, hemat energi dan terjamin.

Menerapkan dan menegakkan konvensi dan peraturan utama yang diadopsi oleh Negara-negara Anggota IMO secara aktif mengatasi pencemaran laut, terutama dari sumber berbasis laut tetapi juga, setidaknya secara tidak langsung, dari sumber berbasis darat.

IMO juga mendukung target pengelolaan dan perlindungan ekosistem laut dan pesisir, paling tidak melalui pembentukan Kawasan Khusus dan Wilayah Laut Khusus. Melindungi keanekaragaman hayati laut telah menjadi tema utama bagi IMO selama bertahun-tahun, terutama dalam pekerjaannya untuk mengurangi ancaman spesies invasif berbahaya yang dibawa ke seluruh dunia dengan kapal.

Untuk membantu melindungi satwa liar maritim, pekerjaan IMO meliputi pengurangan kebisingan bawah air dari kapal dan mengadopsi langkah-langkah untuk menghindari tabrakan antara kapal dan mamalia laut. IMO juga telah melarang pembuangan sampah berbahaya dari kapal dan merupakan bagian dari Kemitraan Global tentang Sampah Laut, sementara pembuangan limbah di laut diatur oleh Konvensi 1972 tentang Pencegahan Pencemaran Laut dengan Pembuangan Limbah dan Materi Lain, yang biasa disebut Konvensi London, dan Protokol 1996.



Mengelola hutan secara berkelanjutan, memerangi penggurunan, menghentikan dan membalikkan degradasi lahan, menghentikan hilangnya keanekaragaman hayati.

Manfaat utama dari upaya IMO untuk melestarikan keanekaragaman hayati melalui langkah-langkah untuk membatasi penyebaran global spesies asing invasif oleh kapal (terkait dengan pengelolaan air pemberat dan biofouling) terutama dirasakan di laut dan samudra – tetapi juga memiliki dampak positif pada ekosistem air tawar utama tertentu seperti Great Lakes dan sistem sungai Amerika Selatan.

Organisasi ini juga merupakan bagian dari upaya global untuk menghentikan perburuan dan perdagangan satwa liar ilegal, sebagai anggota Satuan Tugas Transportasi Satwa Liar Bersatu, yang membantu menghentikan perdagangan satwa liar ilegal dan dengan demikian mengurangi permintaan. IMO juga bekerja untuk memperkuat keamanan di pelabuhan dan mempermudah untuk menemukan dan mencegah pengiriman ilegal.



Mempromosikan masyarakat yang damai dan inklusif untuk pembangunan berkelanjutan, menyediakan akses ke keadilan bagi semua orang dan membangun lembaga yang efektif, akuntabel, dan inklusif di semua tingkatan.

IMO memfasilitasi sistem transportasi maritim global melalui rezim perjanjian globalnya yang mencakup berbagai aspek kapal dan pelayaran. IMO membantu negara-negara berkembang dalam membangun lembaga yang efektif untuk memastikan aliran perdagangan maritim yang aman, terjamin, dan melindungi lingkungan.



Memperkuat sarana implementasi dan merevitalisasi kemitraan global untuk pembangunan berkelanjutan.

SDG 17 menyerukan kemitraan global untuk mendukung pencapaian SDGs di semua negara, khususnya negara-negara berkembang. IMO saat ini memiliki pengaturan kemitraan dengan lebih dari 60 IGO dan lebih dari 80 LSM, termasuk organisasi dan badan lingkungan global utama.

IMO secara aktif mengejar kemitraan khusus dengan Negara-negara Anggotanya dan lainnya untuk melaksanakan proyek atau inisiatif individu di tingkat regional dan global. Sebagian besar ditujukan untuk daerah berkembang, yang biasanya mendapat manfaat dari acara pelatihan, beasiswa, dan misi penasihat teknis.

Departemen Kemitraan dan Proyek IMO telah didirikan untuk mempromosikan budaya kolaborasi dan inovasi, menciptakan keterlibatan dan kemitraan yang lebih luas dengan pemangku kepentingan terkait maritim dan laut. Departemen ini bekerja sama dengan Divisi Kerjasama Teknis dan Divisi lain di dalam IMO. Bersama-sama, kemitraan ini dan banyak kemitraan lain yang melibatkan IMO memberikan kontribusi yang signifikan bagi pembangunan berkelanjutan komunitas maritim.

2.4 Pelabuhan Tanjung Priok

Pelabuhan Tanjung Priok adalah pelabuhan utama dan tersibuk di Indonesia yang terletak di Jakarta Utara, tepatnya di Jalan Raya Pelabuhan No. 9 Tanjung Priok Jakarta Utara, Jakarta 14310. dengan koordinat geografis sekitar 06° - 06' -

05" LS dan 106° - 53' - 10 BT dengan kondisi kedalaman, lebar dan panjang Alur pelayaran Pelabuhan Tanjung Priok kedalaman Eksting alur -14 mLWS (*Mean Low Water Springs*), sementara kedalaman yang direncanakan yaitu -16 mLWS, lebar alur 350 meter dan panjang alur pelayaran 3,1 *Nautical Miles*[37]. Pembangunan pelabuhan ini dimulai pada tahun 1877 dan selesai pada 1883, diinisiasi oleh Pemerintah Hindia Belanda untuk menggantikan Pelabuhan Sunda Kelapa yang sudah tidak memadai untuk menampung kapal besar serta meningkatnya aktivitas perdagangan. Pembangunan ini dipimpin oleh Gubernur Jenderal Johan Wilhelm van Lansberge. Tujuannya adalah menyediakan fasilitas pelabuhan modern dengan kedalaman perairan yang memadai untuk kapal besar, serta dermaga dan gudang yang mendukung aktivitas bongkar muat barang[38].

Saat ini, dikelola oleh PT Pelabuhan Indonesia (Persero) disingkat Pelindo, pelabuhan ini mencakup luas area 604 hektar dengan 20 terminal utama, termasuk terminal kontainer, curah, dan *multipurpose*[39]. Menurut Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2008 tentang Pelayaran, Tanjung Priok diklasifikasikan sebagai pelabuhan internasional utama (Type A) yang mendukung konektivitas maritim nasional dan regional[40]. Pelabuhan ini juga mengalami pengembangan bertahap, dengan penambahan kolam pelabuhan kedua mulai 1914 dan kolam ketiga yang selesai pada 1932, untuk mengatasi kemacetan dan meningkatkan kapasitas penanganan kapal. Selain itu, pada 1914 juga dibangun Stasiun Kereta Api Tanjung Priok yang memudahkan distribusi barang dan penumpang[41].

Seiring waktu, Pelabuhan Tanjung Priok berkembang menjadi pusat utama aktivitas ekspor-impor nasional maupun internasional yang melayani berbagai komoditas penting. Statusnya sebagai pelabuhan tersibuk di Asia Tenggara membuatnya memiliki peran strategis di sektor logistik dan perdagangan Indonesia.

Sebagai gerbang utama perdagangan Indonesia, pelabuhan ini menangani lebih dari 70% volume ekspor-impor nasional. Data dari Kementerian Perhubungan Republik Indonesia menunjukkan bahwa pada tahun 2022 Tanjung Priok memproses 7,6 juta TEUs (*Twenty-foot Equivalent Units*) kontainer, 1,2 juta kendaraan, dan 150 juta ton kargo curah, dengan lebih dari 100.000 panggilan kapal per tahun. Pertumbuhan ini didorong oleh posisi strategis Indonesia sebagai negara kepulauan, di mana sektor maritim menyumbang sekitar 5-7% terhadap PDB

nasional, Namun, ekspansi ini juga menimbulkan tekanan lingkungan terutama di wilayah urban Jakarta yang padat penduduk[42]. Gambar 2.2 dibawah ini dapat dilihat merupakan layout Pelabuhan Tanjung Priok Jakarta.



Gambar 2. 2 Layout Pelabuhan Tanjung Priok

Sumber: Permenhub_no_42_Tahun_2011

2.4.1 Operasional Dan Lalu Lintas Kapal

Operasional Pelabuhan Tanjung Priok melibatkan berbagai jenis kapal, termasuk kapal kontainer, tanker minyak, kapal curah (*bulk carrier*), dan kapal penumpang. Rata-rata kedalaman perairan mencapai 12-16 meter, memungkinkan akses kapal besar hingga 200.000 DWT (*Deadweight Tonnage*). Lalu lintas kapal didominasi oleh rute internasional ke Asia Tenggara, Eropa, dan Amerika, dengan puncak aktivitas selama musim ekspor (Oktober-Maret)[43]. bahwa pelabuhan seperti Tanjung Priok mengalami peningkatan lalu lintas sebesar 5-8% per tahun akibat globalisasi perdagangan, yang sejalan dengan proyeksi *ASEAN Port Development Strategy 2025*[44].

Dalam hal monitoring, pelabuhan ini telah terintegrasi dengan sistem nasional seperti Indonesia *National Single Window* (INSW) dan *Vessel Traffic Service* (VTS) sejak 2015. Data AIS menjadi komponen kunci, di mana stasiun penerima AIS di Tanjung Priok merekam posisi, kecepatan, dan arah kapal secara real-time untuk mencegah tabrakan dan mengoptimalkan bermanuver. Menurut IMO (2015) AIS wajib untuk kapal di atas 300 GT di pelayaran internasional, dan kapal cargo diatas 500 GT yang tidak melakukan pelayaran internasional[45]. di

Tanjung Priok, data ini digunakan untuk analisis lalu lintas, meskipun pemanfaatannya untuk estimasi emisi masih terbatas.

2.4.2 Dampak Emisi Gas Buang Dan Isu Lingkungan

Aktivitas kapal di Tanjung Priok menghasilkan emisi gas buang yang signifikan, termasuk CO₂ (sekitar 2-3% dari total emisi nasional Indonesia), NO_x, SO_x, dan PM, yang berkontribusi terhadap polusi udara di Jakarta Utara. Diperkirakan bahwa emisi dari pelabuhan Asia Tenggara, termasuk Tanjung Priok, menyumbang 10-15% NO_x dan SO_x regional, dengan kapal *idle* (*hoteling*) dan manuver menyumbang 40-60% emisi total. Di Tanjung Priok, emisi kumulatif diperkirakan mencapai 1-2 juta ton CO₂ per tahun, yang memperburuk kualitas udara dengan AQI sering di atas 150 (tidak sehat) selama musim kemarau.

Regulasi IMO Annex VI (seperti sulfur cap 0,5% sejak 2020) telah diterapkan di pelabuhan ini, tetapi tantangan tetap ada, termasuk ketergantungan pada bahan bakar berat (HFO) dan kurangnya infrastruktur scrubber. Selain itu, Clean Air Asia (2023) dalam "*State of Clean Air in Southeast Asia*" memproyeksikan bahwa tanpa intervensi, emisi di Tanjung Priok bisa naik 20% hingga 2030 akibat pertumbuhan lalu lintas.

- Degradasi Kualitas Udara:
 - indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU) di stasiun pemantauan Tanjung Priok sering mencapai 100-115 (kategori tidak sehat) pada musim kemarau (mei-Oktober), dengan puncak hingga 200 (sangat tidak sehat) akibat penumpukan polutan. Pada 2024, rata-rata tahunan PM_{2.5} di wilayah ini adalah 18 µg/m³, melebihi standar WHO (5 µg/m³ tahunan) hingga 3 kali lipat[46].
 - NO_x dan SO_x menyebabkan pembentukan ozon troposfer dan *smog*, yang mengurangi visibilitas dan memperburuk kabut asap. Data BMKG (2022) menunjukkan bahwa polusi dari pelabuhan menyumbang 15-20% dari total NO_x di Jakarta Utara.

Laporan AQI US (*United States Air Quality Index*) dan acuan pedoman tahunan PM_{2.5} WHO dengan batas aman 5 µg/m³, yang kemudian disajikan melalui sistem enam warna (Good, Moderate, Poor, Unhealthy, Severe, Hazardous) untuk menggambarkan tingkat risiko kesehatan pada setiap

rentang nilai AQI. Untuk memudahkan pemahaman dampak kesehatan, konsentrasi PM2.5 juga dikonversi ke dalam satuan “batang rokok per tahun” dengan aturan Berkeley Earth, yaitu 1 batang rokok setara 22 µg/m³ PM2.5, sehingga tren dan tingkat pencemaran di berbagai kota dapat dibandingkan secara lebih jelas dan komunikatif[46].



Gambar 2. 3 indeks nilai AQI
Sumber: AQI 2024

Peringkat Kualitas udara Global berdasarkan rata-rata tahun indeks Kualitas udara kota-kota di setiap negara[46].

World Air Quality Country Ranking 2024

The world air quality country ranking calculated with the annual average AQI of cities across each country.

Countries	AQI	Countries	AQI	Countries	AQI
1. Bangladesh	140	48. Saudi Arabia	58	95. Lithuania	38
2. Pakistan	115	49. Gambia	57	96. Curacao	37
3. India	111	50. Israel	57	97. Japan	37
4. Bahrain	103	51. South Korea	57	98. Russia	37
5. Nepal	100	52. Sudan	57	99. Belarus	36
6. Egypt	92	53. Colombia	56	100. Costa Rica	36
7. United Arab Emirates	90	54. Kenya	56	101. French Guiana	36
8. Kuwait	89	55. Liberia	55	102. Morocco	36
9. Tajikistan	89	56. Algeria	54	103. Spain	36
10. Kyrgyzstan	87	57. Georgia	54	104. Bulgaria	35
11. Rwanda	87	58. Chile	53	105. Germany	35
12. Cameroon	86	59. Taiwan	53	106. Argentina	34
13. China	86	60. Zambia	53	107. Bolivia	34
14. Laos	84	61. Ecuador	52	108. France	34
15. Uzbekistan	82	62. Chad	51	109. Luxembourg	34
16. Congo Kinshasa	80	63. El Salvador	51	110. Netherlands	34
17. Nigeria	80	64. Cyprus	50	111. Belgium	33
18. Uganda	80	65. Mali	50	112. Moldova	33
19. Mongolia	79	66. South Africa	50	113. Portugal	33
20. Burma	75	67. Venezuela	50	114. Andorra	32
21. Ethiopia	75	68. Cambodia	49	115. Gibraltar	32
22. Armenia	74	69. Czechia	49	116. United States	32
23. Iran	74	70. Kosovo	48	117. Austria	31
24. Iraq	74	71. Slovakia	48	118. Guadeloupe	31
25. Turkmenistan	72	72. Slovenia	48	119. United Kingdom	31
26. Bosnia and Herzegovina	70	73. Guinea	47	120. Reunion	30
27. Gabon	70	74. Malta	47	121. Grenada	29
28. Kazakhstan	70	75. Singapore	47	122. Ireland	29
29. Thailand	70	76. Botswana	46	123. Jersey	29
30. North Korea	69	77. Cabo Verde	46	124. New Zealand	28
31. Sri Lanka	67	78. Poland	46	125. Norway	28
32. Cote Divoire	65	79. Brazil	44	126. Canada	27
33. Lebanon	63	80. Greece	44	127. Estonia	27
34. Senegal	63	81. Hungary	44	128. Puerto Rico	27
35. Azerbaijan	62	82. Burkina Faso	43	129. Denmark	26
36. Benin	62	83. Romania	43	130. Latvia	26
37. Ghana	62	84. Trinidad And Tobago	43	131. Switzerland	26
38. Madagascar	62	85. Croatia	42	132. Liechtenstein	25
39. Macedonia	60	86. Philippines	42	133. Sweden	25
40. Peru	60	87. Angola	41	134. Malaysia	24
41. Turkey	60	88. Ukraine	41	135. New Caledonia	22
42. Vietnam	60	89. Albania	40	136. Australia	21
43. Mexico	59	90. Italy	40	137. Finland	21
44. Montenegro	59	91. Jordan	40	138. Iceland	21
45. Serbia	59	92. Namibia	40	139. Brunei	17
46. Guatemala	58	93. San Marino	40	140. Greenland	09
47. Indonesia	58	94. Togo	40		

Gambar 2. 4 Ranking AQI Dunia
Sumber: AQI 2024

SOUTHEAST ASIA

INDONESIA

Ranks **47th** worldwide

Indonesia ranked 47th for the highest air quality levels in the world in 2024. With an annual average of 58 in the "Moderate" category, and as compared to the 2023 annual average, 2024 levels recorded an **13.4% decrease**. The major contributor of air pollution includes household, transport and construction emission.

2024
58
Moderate

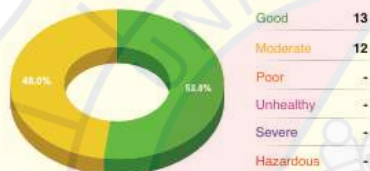
INDONESIA - 2024 AQI TRENDS

In 2024, the annual average AQI in Indonesia recorded "Moderate" AQI levels throughout the year. Only 1 month in the same year reported the "Good" air quality levels.



DISTRIBUTION OF INDONESIAN CITIES ACC. TO THE AVERAGE AQI STATUS FOR 2024

In 2024, Around 13 Indonesian cities reported "Good" air quality levels. Meanwhile, other 12 cities reported the "Moderate" AQI levels.



INDONESIA'S ANNUAL AQI TRENDS OVER LAST 5 YEARS



Indonesia's AQI levels Over the past 5 years showed an increasing trend till 2023. 2024 reported a slight decrease in AQI levels.

SMOKING PREVALENCE AND AIR QUALITY IMPACT

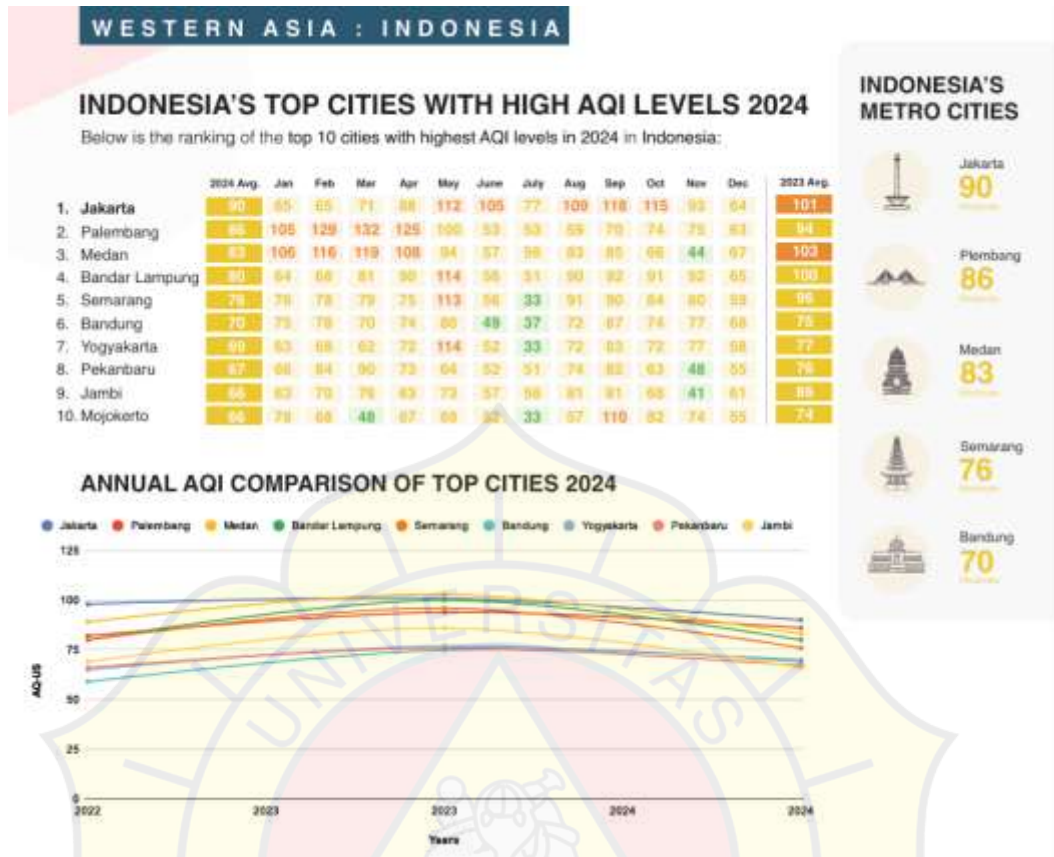
In 2024, Indonesia's annual average PM2.5 concentration (18 µg/m³) was equivalent to each individual inhaling the air pollution over the year, similar to smoking

299 cigarettes.

Gambar 2. 5 Kualitas Udara Jakarta Tahun 2024

Sumber: AQI 2024

Hasilnya menunjukkan 10 kota besar di Indonesia[46].



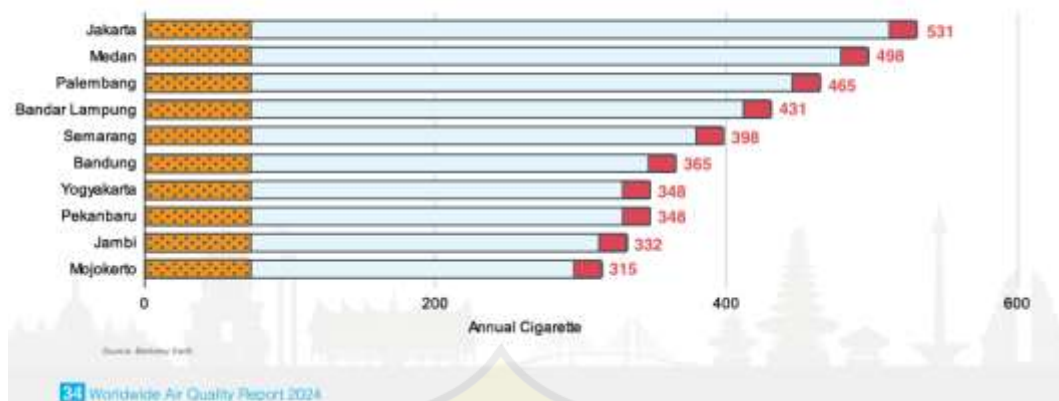
Gambar 2. 6 Hasil Kualitas Udara Jakarta Tahun 2022-2024

Sumber: AQI 2024

- Dampak Kehatan Masyarakat
 - Paparan PM2.5 dan NOx meningkatkan risiko penyakit pernapasan (asma, bronkitis), kardiovaskular, dan kanker paru. warga di sekitar Tanjung Priok mengalami peningkatan kasus asma sebesar 15-20% dibandingkan rata-rata Jakarta, dengan estimasi 5.000-7.000 kasus penyakit pernapasan terkait polusi per tahun. memperkirakan polusi udara di Jakarta, termasuk kontribusi pelabuhan, menyebabkan 20.000 kematian prematur tahunan di Indonesia, dengan Tanjung Priok sebagai penyumbang (kontribusi 10-15%)[47].
 - Kelompok rentan seperti anak-anak dan lansia paling terdampak misalnya, menemukan bahwa 30% anak di Jakarta Utara mengalami gangguan pernapasan akibat PM2.5 dari emisi[48].

ANNUAL SMOKING PREVALENCE

Based on the PM2.5 levels recorded in these cities of Indonesia in 2024, each resident effectively smoked the equivalent of these many cigarettes without actually smoking any.



Gambar 2. 7 Tingkat PM2.5

Sumber: AQI 2024

2.4.3 Sumber Emisi Gas Buang Di Sekitar Pelabuhan Tanjung Priok

Emisi di Tanjung Priok berasal dari berbagai "kendaraan" dan peralatan operasional, dengan kapal sebagai penyumbang terbesar (60-70% total emisi). Istilah "kendaraan" mencakup kapal, kendaraan darat, dan alat berat pelabuhan yang menggunakan bahan bakar fosil (utamanya diesel dan *heavy fuel oil*/HFO). Perhitungan emisi menggunakan model bottom-up berdasarkan konsumsi bahan bakar, di mana 1 ton HFO menghasilkan sekitar 3, 1 ton CO₂, 60 kg NO_x, dan 20 kg SO_x[49]. Berikut detail sumber secara akurat, berdasarkan data yang menganalisis data AIS dan survei lapangan:

- Kapal– Penyumbang Utama (60-70% Emisi Total):
 - Jenis Kapal dan Aktivitas:
 - Kapal kontainer (40% lalu lintas): Emisi saat berlayar masuk/keluar pelabuhan (*manuver*), *berdocking*, dan *idle (hoteling)*. Konsumsi bahan bakar: 20-50 ton/hari per kapal, menghasilkan 50.000-100.000 ton CO₂/tahun dari 5.000 panggilan kapal kontainer.
 - Tanker minyak dan kapal curah (*bulk carrier*, 30%): Lebih tinggi emisi SO_x karena HFO (sulfur hingga 0,5%). Estimasi: 30.000 ton SO_x dan 40.000 ton NO_x/tahun dari aktivitas curah (150 juta ton kargo/tahun).
 - Kapal penumpang dan feeder (30%): Emisi lebih rendah tapi frekuensi tinggi, terutama PM dari mesin diesel tua.

Total emisi kapal di Tanjung Priok: 1,2 juta ton CO₂, 25.000 ton NO_x, 5.000 ton SO_x, dan 2.000 ton PM per tahun. Aktivitas *hoteling* (kapal diam) menyumbang 40% emisi, manuver 30%, dan berlayar 30%.

- Kendaraan Darat dan Alat Bongkar Muat (20-25% Emisi Total):
 - Truk Kontainer dan Trailer: Lebih dari 100.000 truk/hari mengangkut barang dari/in pelabuhan. Mesin diesel Euro II/III menghasilkan PM_{2.5} dan NO_x tinggi. Data: 200.000ton CO₂/tahun dari 1,2 juta kendaraan, dengan emisi NO_x mencapai 10.000 ton/tahun akibat kemacetan di akses jalan.
 - Truk Kontainer dan Trailer: Lebih dari 100.000 truk/hari mengangkut barang dari/in pelabuhan. Mesin diesel Euro II/III menghasilkan PM_{2.5} dan NO_x tinggi. Data: 200.000ton CO₂/tahun dari 1,2 juta kendaraan, dengan emisi NO_x mencapai 10.000 ton/tahun akibat kemacetan di akses jalan.
 - Bus dan Kendaraan Penunjang: Kendaraan pelabuhan internal (seperti shuttle bus) menyumbang <5%, tapi NO_x dari lalu lintas keluar-masuk pelabuhan menambah 15% polusi di radius 5 km.
- Sumber Lainnya (5-15% Emisi Total):
 - Generator dan Pembangkit Listrik Darurat: Digunakan saat pemadaman listrik atau untuk kapal tanpa shore power, menghasilkan 10.000 - 20.000ton CO₂/tahun.
 - Aktivitas Industri Pendukung: Gudang dan fasilitas penyimpanan menggunakan genset diesel, menyumbang SO_x tambahan.
 - Total emisi pelabuhan (termasuk non-kapal): 1,8 juta ton CO₂ ekuivalen/tahun, dengan kapal mendominasi.

2.5 VTS Tanjung Priok

VTS Tanjung Priok adalah sistem pelayanan lalu lintas kapal (*Vessel Traffic Service*) yang dioperasikan di wilayah Pelabuhan Tanjung Priok untuk mengawasi, mengatur, dan memandu pergerakan kapal agar aman, tertib, dan efisien[50]. Sistem ini menggunakan berbagai peralatan seperti radar, AIS, radio komunikasi VHF, dan kamera CCTV untuk memantau posisi serta pergerakan kapal secara real time, kemudian petugas VTS memberikan informasi, instruksi, atau peringatan navigasi kepada nakhoda jika ada potensi bahaya tabrakan, kedangkalan, atau kondisi cuaca buruk. Setiap kapal yang masuk, keluar, atau bergerak di area

tanggung jawab Tanjung Priok pada prinsipnya wajib melapor dan mematuhi panduan dari stasiun VTS, sehingga lalu lintas kapal yang padat di pelabuhan utama ini dapat dikelola dengan baik dan risiko kecelakaan maupun pencemaran lingkungan laut dapat dikurangi.



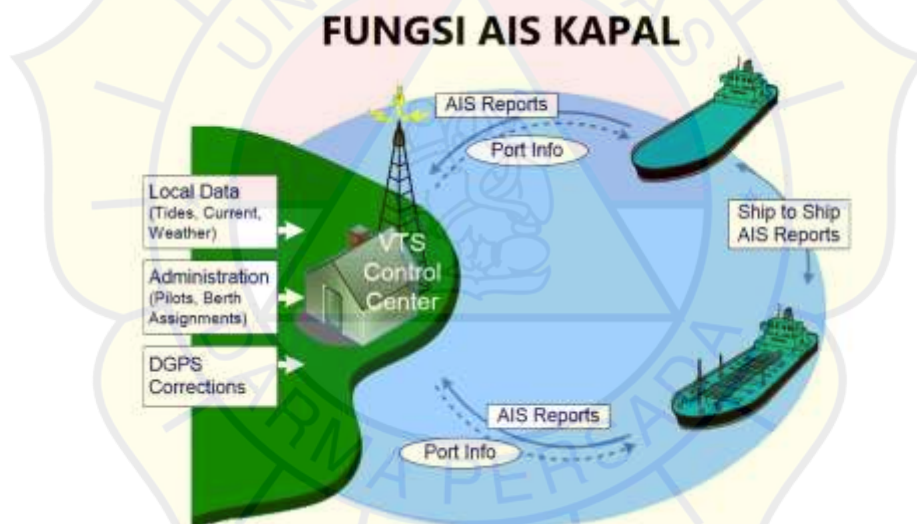
Gambar 2. 8 VTS Tanjung Priok
Sumber: Dokumen Pribadi

2.6 Automatic Identification System (AIS)

Automatic Identification System (AIS) merupakan sistem yang menyediakan informasi atau kapal serta mampu melakukan pengiriman informasi antar kapal maupun antar kapal dengan sebuah stasiun penerima yang berada di darat secara otomatis menggunakan gelombang radio VHF secara otomatis. *International Maritime Organization* (IMO) mengatur penggunaan peralatan pada seluruh kapal dengan bobot diatas 300GT pada pelayaran internasional, kapal diatas 500GT pada pelayaran *non*-internasional dan diwajibkan pada seluruh kapal penumpang (*passenger ship*)[45]. IMO mengatur penggunaan AIS dengan tujuan untuk memenuhi regulasi keselamatan dan keamanan yang berfungsi sebagai pencegahan tabrakan kapal (*collision avoidance*), *vessel traffic service*, alat bantu dalam navigasi, *search and rescue* dan investigasi kecelakaan.

Vessel Traffic Services (VTS) adalah layanan pengawasan lalu lintas kapal yang menggunakan radar, CCTV, dan komunikasi VHF untuk memantau pergerakan kapal di perairan pelabuhan, sementara *Automatic Identification System* (AIS) adalah teknologi berbasis GPS yang memungkinkan kapal saling mengidentifikasi posisi, kecepatan, dan arah secara otomatis. Kombinasi keduanya

meningkatkan keselamatan navigasi dan mengurangi risiko tabrakan, yang semakin relevan dengan peningkatan *traffic* kapal domestik akibat *zero emission*. Di Indonesia, menurut peraturan menteri perhubungan No. PM 7 Tahun 2019 VTS dan AIS telah diimplementasikan di Pelabuhan Tanjung Priok sejak 20 Agustus 2019[51]. sesuai dengan Peraturan Menteri Perhubungan No. PM 10 Tahun 2019 yang mendukung pengelolaan lalu lintas maritim berkelanjutan. Teknologi ini juga memungkinkan pemantauan jejak karbon kapal, membantu pelabuhan mematuhi target *zero emission* nasional. Evaluasi kebijakan menyoroti bahwa meskipun efektif, cakupan AIS di wilayah timur Indonesia masih terbatas, berpotensi menyebabkan inefisiensi saat *traffic* kapal melonjak. AIS diklasifikasikan menjadi 7 tipe *class* yang berbeda yaitu *Class A*, *Class B*, *Base Station*, *Aids to Navigation* (AtoN), *Search and Rescue Transponder* (SART) dan *Specialist AIS Transponder*[52].



Gambar 2. 9 Fungsi *AIS* Kapal

Sumber: <https://www.kapaldanlogistik.com/2023/06/fungsi-dan-cara-kerja-ais-kapal.html>

Berikut 7 Tipe Class AIS:

1. *Class A* AIS (AIS Transponder Kelas A)
 - Deskripsi: Tipe utama untuk kapal komersial besar dan internasional, wajib dipasang pada kapal kargo >300 GT, kapal penumpang, dan tanker sesuai SOLAS Chapter V. Ini adalah sistem transponder penuh yang mengirim dan menerima data secara otomatis.

- Fitur Utama: Menggunakan SOTDMA (*Self-Organizing Time Division Multiple Access*) untuk transmisi prioritas tinggi (setiap 2-10 detik), daya pancar hingga 12,5 W, dan data lengkap seperti posisi GPS, kecepatan (SOG), arah (COG), *draft*, dan status navigasi. Akurat untuk kecepatan hingga 102 knot.
 - Aplikasi: Navigasi di perairan sibuk seperti Pelabuhan Tanjung Priok; mendukung analisis emisi dengan data kecepatan untuk estimasi konsumsi bahan bakar.
 - Kelebihan/Keterbatasan: Akurat dan andal, tapi mahal (biaya >\$5.000) dan konsumsi daya tinggi.
2. *Class B AIS SO (Self-Organized)*
- Deskripsi: Varian dari Class B untuk kapal kecil dan rekreasi (<300 GT), yang tidak wajib SOLAS tapi direkomendasikan untuk keselamatan. "SO" berarti *self-organizing*, mirip SOTDMA tapi dengan prioritas lebih rendah.
 - Fitur Utama: Transmisi setiap 30 detik (atau 3 menit saat diam), daya pancar 2-5 W, data dasar seperti posisi, identitas (MMSI), dan kecepatan. Mengintegrasikan GPS internal.
 - Aplikasi: Kapal nelayan atau yacht di perairan nasional Indonesia; berguna untuk monitoring lalu lintas lokal di sekitar pelabuhan.
 - Kelebihan/Keterbatasan: Lebih murah (\$500-1.000) dan mudah dipasang, tapi rentan interferensi di area padat karena slot waktu terbatas.
3. *Class B AIS CS (Carrier Sense Time Division Multiple Access)*
- Deskripsi: Tipe Class B lain untuk kapal kecil, di mana "CS" berarti *carrier sense*, yang mendeteksi sinyal kosong sebelum mengirim untuk menghindari tabrakan frekuensi.
 - Fitur Utama: Transmisi lebih jarang (setiap 30-180 detik), daya pancar 1-2 W, fokus pada data dasar tanpa fitur dinamis lanjutan seperti Class A. Cocok untuk perangkat portabel.
 - Aplikasi: Perahu kecil atau kapal pendukung di pelabuhan seperti Tanjung Priok; mendukung data AIS dasar untuk analisis pola pergerakan sederhana.
 - Kelebihan/Keterbatasan: Hemat daya dan biaya rendah, tapi kurang andal di lalu lintas tinggi karena potensi *delay* transmisi.

4. *Class B AIS T (Transceiver)*

- Deskripsi: Tipe *transceiver Class B* yang lebih sederhana, dirancang untuk integrasi dengan peralatan navigasi *existing* seperti VHF radio atau *chart plotter*.
- Fitur Utama: Menggunakan *CSTDMA (Carrier Sense TDMA)* atau *SOTDMA* dasar, transmisi setiap 30 detik, daya 2 W, dan data standar termasuk nama kapal dan tipe. Sering terhubung via *NMEA 0183/2000*.
- Aplikasi: Kapal rekreasi atau komersial kecil di perairan inland di Indonesia, digunakan untuk kapal pesiar lokal.
- Kelebihan/Keterbatasan: Fleksibel untuk *retrofit*, tapi kurang presisi dibanding *Class A* untuk aplikasi emisi (data kecepatan kurang detail).

5. *AIS Base Station*

- Deskripsi: Stasiun tetap darat yang berfungsi sebagai pusat pengumpul dan distributor data AIS, bukan dipasang di kapal melainkan di pantai atau pelabuhan.
- Fitur Utama: Daya pancar hingga 25 W, menerima data dari kapal dalam radius 100-200 mil, dan mengirim pesan keselamatan atau peringatan. Terintegrasi dengan *VTS (Vessel Traffic Service)* dan jaringan nasional.
- Aplikasi: *Monitoring* lalu lintas di Pelabuhan Tanjung Priok (ada 5 *base station*) mendukung analisis emisi agregat dari data kapal masuk/keluar.
- Kelebihan/Keterbatasan: Cakupan luas dan *real-time*, tapi bergantung pada infrastruktur listrik dan koneksi internet.

6. *AIS Aids to Navigation (AtoN) Station*

- Deskripsi: Tipe AIS untuk alat bantu navigasi tetap seperti mercusuar, pelampung, atau rambu laut, yang mengirimkan posisi tetap untuk membantu navigasi.
- Fitur Utama: Stasiun pasif atau aktif, transmisi data statis (posisi, tipe AtoN, status), daya rendah (5 W), dan dapat dikendalikan jarak jauh via radio. Standar *IMO Resolution MSC.389(94)*.
- Aplikasi: Di perairan Tanjung Priok untuk menandai zona berbahaya atau kanal membantu dalam pemetaan rute kapal untuk estimasi emisi manuver.

- Kelebihan/Keterbatasan: Meningkatkan keselamatan tanpa biaya tinggi, tapi rentan terhadap kerusakan cuaca atau vandalisme.
7. *AIS Search and Rescue Transmitter* (AIS-SART)
- Deskripsi: Perangkat khusus untuk situasi darurat, menggantikan EPIRB (*Emergency Position Indicating Radio Beacon*) tradisional, wajib pada kapal SOLAS sejak 2010.
 - Fitur Utama: Aktifkan secara manual saat darurat, transmisi *burst* (setiap 3,5 menit) dengan posisi GPS, identitas kapal, dan sinyal SOS pada frekuensi 161.975/162.025 MHz. Daya 1-2 W, tahan air, dan baterai 8 jam.
 - Aplikasi: Pencarian dan penyelamatan (SAR) di perairan Indonesia data dapat digunakan post-incident untuk analisis emisi darurat (misalnya, kapal terdampar).
 - Kelebihan/Keterbatasan: Cepat terdeteksi oleh kapal dan pesawat, tapi hanya untuk satu kali penggunaan dan tidak untuk *monitoring* rutin[53].

2.6.1 Prinsip Cara Kerja Ais

Automatic Identification System (AIS) pada kapal berfungsi sebagai *transponder* otomatis yang memungkinkan pertukaran informasi *real-time* antara kapal, stasiun darat, dan kapal lain untuk meningkatkan keselamatan navigasi, manajemen lalu lintas, dan *monitoring* lingkungan (seperti estimasi emisi gas buang). Prinsip dasarnya adalah pengiriman dan penerimaan data digital melalui gelombang radio VHF (*Very High Frequency*) tanpa memerlukan intervensi manual, sehingga kapal dapat "berkomunikasi" secara otomatis. Sistem ini diatur oleh standar IMO SOLAS Chapter V dan ITU-R M.1371, dengan fokus pada akurasi posisi dan identitas kapal[54]. Berikut penjelasan rinci mengenai prinsip dan cara kerjanya:

1. Komponen Utama AIS pada Kapal

AIS terintegrasi sebagai unit transponder yang dipasang di kapal, terdiri dari perangkat keras dan perangkat lunak yang saling terhubung. Komponen kunci meliputi:

- Antena VHF: Untuk transmisi dan penerimaan sinyal radio, biasanya dipasang di puncak tiang kapal untuk cakupan optimal (radius 20-40 mil laut, tergantung ketinggian).

- *GPS Receiver*: Menyediakan data posisi akurat (*latitude, longitude*) dengan presisi <10 meter, termasuk *speed over ground* (SOG) dan *course over ground* (COG).
- *Gyrocompass* atau *Heading Sensor*: Memberikan arah kapal (*heading*) dengan akurasi 0,5-1 derajat.
- *VHF Transceiver*: Mengirim dan menerima data pada dua channel: AIS 1 (161.975 MHz) dan AIS 2 (162.025 MHz), dengan daya pancar 2-12,5 W tergantung tipe (*Class A* lebih kuat).
- *Display dan Interface*: Terhubung dengan ECDIS (*Electronic Chart Display and Information System*), radar, atau aplikasi mobile untuk visualisasi data (misalnya, posisi kapal lain di layar).
- *Power Supply*: Disediakan dari baterai kapal (12/24 V DC), dengan *backup* untuk operasi darurat.

2. Prinsip Transmisi Data (Pengiriman Informasi)

Cara kerja AIS didasarkan pada prinsip *Time Division Multiple Access* (TDMA), di mana waktu dibagi menjadi slot-slot kecil (26,6 μ s per slot, total 2.250 slot per menit) untuk menghindari tabrakan sinyal. Setiap kapal "berbagi" frekuensi secara otomatis tanpa pusat kendali sentral, seperti sistem *self-organizing*.

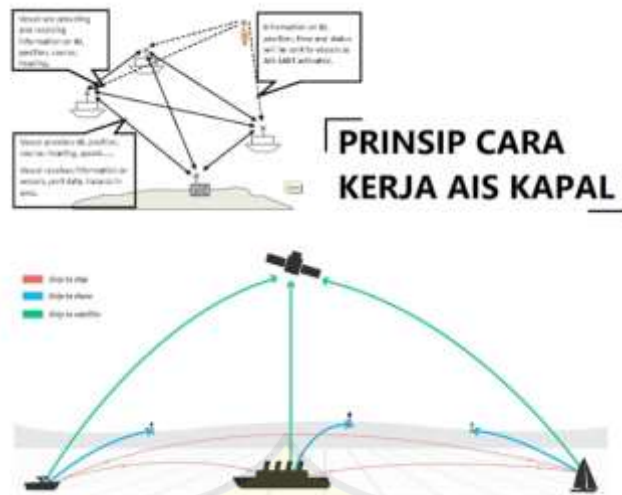
- Proses Pengiriman:
- Pengumpulan Data: Setiap 1-2 detik, AIS mengumpulkan data statis (nama kapal, MMSI - *Maritime Mobile Service Identity*, jenis kapal, dimensi) dan dinamis (posisi GPS, SOG, COG, heading, rate of turn/ROT, status navigasi seperti *underway, anchor, atau restricted maneuver*).
- Pemilihan Slot Waktu:
 - Untuk *Class A* (kapal besar): Menggunakan SOTDMA (*Self-Organizing TDMA*), di mana kapal mendengarkan channel untuk slot kosong, lalu merebutnya secara acak. Slot dipilih berdasarkan prioritas (misalnya, kapal berkecepatan tinggi mendapat slot lebih sering).
 - Untuk *Class B* (kapal kecil): Menggunakan CSTDMA (*Carrier Sense TDMA*), di mana kapal mendeteksi sinyal kosong sebelum mengirim, dengan frekuensi lebih rendah (setiap 30 detik).

- Pengkodean dan Pengiriman: Data dikodekan menjadi 6 jenis pesan (*Message 1-6* untuk posisi, *Message 5* untuk data statis, dll.), lalu dikirim burst pada slot waktu yang dipilih. Transmisi periodik: Setiap 2-10 detik saat bergerak (>23 knot: 2 detik; <3 knot: 3 menit).
- Daya dan Jangkauan: Sinyal dipancarkan omnidireksional, dengan jangkauan horizon VHF (sekitar 40 km untuk kapal ke kapal, lebih jauh via stasiun darat atau satelit).

3. Prinsip Penerimaan dan Pemrosesan Data

AIS bukan hanya pengirim, tapi juga penerima, memungkinkan kapal "melihat" kapal lain dalam radius.

- Proses Penerimaan:
 - Deteksi Sinyal: Antena VHF menerima pesan dari kapal lain atau stasiun darat pada *channel* AIS 1/2. Kapal mendengarkan secara kontinu untuk mengisi peta situasional (*situational awareness*).
 - Dekode dan Validasi: Prosesor AIS mendekode paket data, memverifikasi MMSI untuk menghindari duplikat, dan mengintegrasikan dengan data internal (misalnya, membandingkan posisi dengan ECDIS).
 - Visualisasi: Data ditampilkan di layar kapal sebagai ikon kapal lain dengan label (jarak, *bearing*, ETA). Alarm otomatis jika risiko tabrakan (CPA - *Closest Point of Approach* <1 mil).
 - Integrasi dengan Sistem Lain: Data AIS dapat diekspor ke VTS pelabuhan via NMEA 0183/2000 protocol, atau ke satelit untuk pelacakan global.
- Jenis Pesan yang Diproses:
 - Dynamic Data: Posisi, kecepatan (dari *Message 1/2/3*).
 - *Static/Voyage* Data: Identitas, tujuan (dari *Message 5*, dikirim setiap 6 menit).
 - *Safety-Related Messages*: Peringatan darurat (*Message 14*) atau data cuaca (*Message 8*).



Gambar 2. 10 Cara Kerja AIS Kapal

Sumber: <https://www.kapaldanlogistik.com/2023/06/fungsi-dan-cara-kerja-ais-kapal.html>

2.7 Perhitungan Emisi Gas Buang Kapal Menggunakan Metode Trozzi

Perhitungan emisi dihitung berdasarkan standar metodologi eropa *Marine Emission Estimation Tool* (MEET), Estimasi emisi mempertimbangkan dua belas jenis kapal yang mempunyai *gross tonnage* diatas 100 GT Trozzi, et al, 1998 data lainnya antara lain faktor emisi, dan spesifikasi parameter kapal seperti konsumsi bahan bakar, tipe mesin utama, mesin bantu, *Gross Tonnage* (GT), Mode Operasi[55]. Trozzi, et al, 1998 didalam penelitiannya menggunakan perhitungan konsumsi bahan bakar mesin dari setiap jenis kapal diperoleh dari analisis regresi linier konsumsi bahan bakar terhadap *Gross Tonnage* (GT) seperti terlihat pada Tabel 2.1 dibawah ini[56].

Tabel 2. 1 Perhitungan Estimasi Emisi

Jenis Kapal	Konsumsi Bahan Bakar (ton/day) Dengan Menggunakan Fungsi <i>Gross Tonnage</i> (GT)
Solid Bulk	$C_{jk} = 20,1860 + 0,00049 \times GT$
Liquid Bulk /Tanker	$C_{jk} = 14,6850 + 0,00079 \times GT$
General Cargo	$C_{jk} = 9,8197 + 0,00143 \times GT$
Container	$C_{jk} = 8,0552 + 0,00235 \times GT$
Ro-Ro Cargo	$C_{jk} = 12,8340 + 0,00156 \times GT$
Passenger	$C_{jk} = 16,9040 + 0,00198 \times GT$
High Speed Ferry	$C_{jk} = 39,4830 + 0,00972 \times GT$
Inland Cargo	$C_{jk} = 9,8197 + 0,00143 \times GT$
Sail Ship	$C_{jk} = 0,4268 + 0,00100 \times GT$

Jenis Kapal	Konsumsi Bahan Bakar (ton/day)
	Dengan Menggunakan Fungsi <i>Gross Tonnage</i> (GT)
Tugs	$C_{jk} = 5,6511 + 0,01048 \times GT$
Fishing	$C_{jk} = 1,9387 + 0,00448 \times GT$
Other Ships	$C_{jk} = 9,7126 + 0,00091 \times GT$

Sumber: Mohammad Danil Arifin, 2012

Selain itu, emisi gas buang dihitung dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti mesin utama kapal serta jenis bahan bakar yang digunakan dan mode operasi dari kapal seperti terlihat pada Tabel 2.2 dibawah ini merupakan Faktor Emisi pada Kapal[56].

Tabel 2. 2 Faktor Emisi Pada Kapal (Kg/ton)

Mode	Engine / Bahan Bakar	NO _x	CO	CO ₂	VOC	PM	SO _x
Cruising	SSD/BFO	87	7.4	3200	2.4	1.2	60
	MSD/BFO	57	7.4	3200	2.4	1.2	60
	HSD/MDO	70	9	3200	3	1.5	20
Manoeuvring	SSD/BFO	78	28	3200	3.6	1.2	60
	MSD/BFO	51	28	3200	3.6	1.2	60
	HSD/MDO	63	34	3200	4.5	1.5	20
Hotelling	SSD/BFO	35	99	3200	23.1	1.2	60
	MSD/BFO	23	99	3200	23.1	1.2	60
	HSD/MDO	28	120	3200	28.9	1.5	20

SSD = Slow Speed Diesel Engine BFO = Bunker Fuel Oil
PM = Particulate Matter VOC = Volatile Organic Compound
MSD = Medium Speed Diesel Engine MDO = Marine Diesel Oil
HSD = High Speed Diesel Engine

Sumber: Mohammad Danil Arifin,2012

Tabel 2. 3 Fraksi maksimum konsumsi bahan bakar untuk beberapa mode operasi

Mode	fraction
Cruising	0,8
Manoeuvring	0,4
Hotelling default	0,2
passenger	0,32
liquid bulk	0,2
other	0,12
Tug: ship assistance	0,2
moderate activity	0,5
under tow	0,8

Sumber: Trozzi et.al, 1998

Tabel 2. 4 Fraksi maksimum *Rated Output (PS)*

Ship category	2010 World fleet	Mediterranean Sea fleet (2006)
Liquid bulk ships	0.3	0.35
Dry bulk carriers	0.3	0.39
Container	0.25	0.27
General cargo	0.23	0.35
Ro Ro Cargo	0.24	0.39
Passenger	0.16	0.27
Fishing	0.39	0.47
Others	0.35	0.18
Tugs	0.1	

Sumber: Trozzi et.al, 1998

Tabel 2. 5 Klasifikasi polusi

Code	Nama
NOx	Nitrogen oxides
SOx	Sulfur oxides
CO	Carbon monoxide
VOC	Volatile Organic Compounds
PM	Particulate matter
CO2	Carbon dioxide

Sumber: Trozzi et.al, 1998

Tabel 2. 6 Tipe Jenis Kapal

Code	Nama
SB	Solid Bulk
LB	Liquid Bulk
GC	General Cargo
CO	Container
PC	Ro-Ro Cargo
PA	Passenger
HS	High speed ferries
IC	Inland Cargo
SS	Sail ships
TU	Tugs
FI	Fishing
OT	Other

Sumber: Trozzi et.al, 1998

Tabel 2. 7 Tipe Jenis Bahan Bakar

Code	Nama
RO	Residual oils

Code	Nama
DO	Distillate oil
DF	Diesel fuel
GF	Gasoline fuel

Sumber: Trozzi et.al, 1998

Tabel 2. 8 Tipe Jenis Mesin Kapal

Code	Nama
SE	Steam turbines
HS	High speed motor engines
MS	Medium speed motor engines
SS	Slow speed motor engines
IP	Inboard engines - pleasure craft(only for detailed methodology)
OP	Outboard engines(only for detailed methodology)
TO	Tanker loading and off-loading(only for detailed methodology)

Sumber: Trozzi et.al, 1998

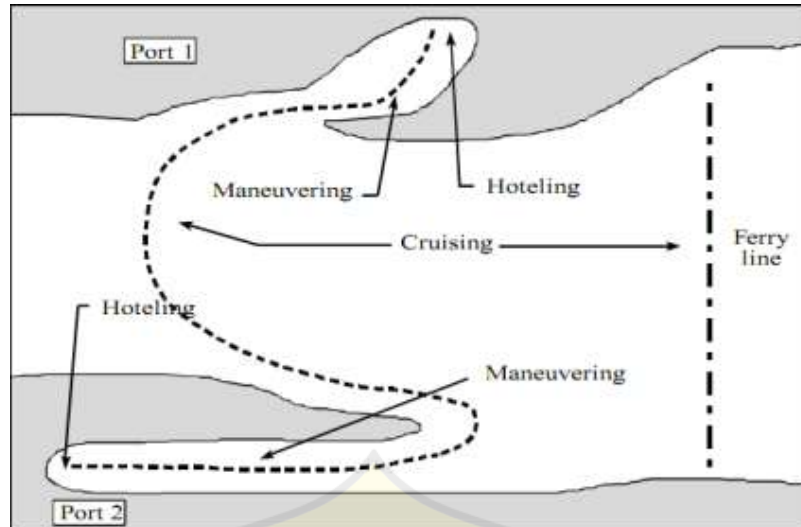
Tabel 2. 9 Mode Operasi Kapal

Code	Nama
C	Cruising
M	Manoeuvring
H	Hotelling
T	Tanker loading and off-loading
A	Auxiliary generators

Sumber: Trozzi et.al, 1998

2.8 Status Pelayaran Kapal Yang Digunakan Dalam Perhitungan Emisi Gas Buang Kapal

Status pelayaran kapal dimanfaatkan untuk menentukan *load factor* (LF) serta besarnya faktor emisi dari operasi kapal. Dalam praktiknya, aktivitas pelayaran dibagi menjadi tiga kategori utama: *cruising*, *maneuvering*, dan *hotelling*. Fase *maneuvering* mencakup saat kapal mendekati pelabuhan, berada pada posisi labuh jangkar (*at anchor*), hingga kembali bergerak meninggalkan pelabuhan. *Hotelling* menggambarkan kondisi kapal yang bersandar di sisi dermaga untuk melakukan kegiatan bongkar muat dan operasi lain di pelabuhan. Sementara itu, *cruising* merujuk pada kapal yang berlayar di laut lepas dengan kecepatan relatif konstan[56]. Status pelayaran kapal ditunjukkan pada Gambar 2.11



Gambar 2. 11 Skema Pada Setiap Status Pelayaran

Sumber: Mohammad Danil Arifin,2012

Setelah modus operasional diketahui, konsumsi bahan bakar dihitung dengan mempertimbangkan fraksi konsumsi bahan bakar dari mesin utama dan mesin bantu maksimum dari masing-masing mode operasi kapal. Hal ini perlu dipertimbangkan konsumsi bahan bakar sebenarnya selama fase operasi kapal yang berbeda yang dilakukan dalam area pelabuhan. Berikut Tabel 2.10 dibawah ini merupakan estimasi faktor beban dari setiap status pelayaran[57].

Tabel 2. 10 Estimasi faktor beban dari mesin utama dan bantu pada mode operasi

Status Pelayaran	LF MCR Mesin		Waktu Operasi	LF MCR Mesin	
	Utama (%)	Mesin Utama (%)		Bantu (%)	
<i>Cruising</i>	80	100		30	
<i>Manoeuvring</i>	20	100		50	
<i>Hotelling (except tankers)</i>	20	5		40	
<i>Hotelling (tankers)</i>	20	100		60	

Sumber: Trozzi et.al 1998

Selain itu, emisi gas buang dihitung dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti mesin dan jenis bahan bakar serta status pelayaran seperti terlihat pada Tabel 2.11 dibawah ini.

Tabel 2. 11 Faktor Emisi untuk NO₂, SO₂, PM_{2,5}, PM₁₀, CO, dan CO₂

Mesin	Status Pelayaran	Tipe Mesin	Tipe Bahan Bakar	Faktor Emisi (g/kWh)								
				NO ₂	SO ₂	PM _{2,5}	PM ₁₀	CO	CO ₂			
Mesin Utama	Cruising	Gas	BFO	5,9	0,61	0,1	0,1	0,2	38			
		Turbine	MDO/MGO	5,5	0,61	0,1	0,1	0,2	38			
		High	BFO	12,3	0,46	0,75	0,8	1,5	28,6			
		Speed	MDO/MGO	11,6	0,46	0,28	0,3	1,1	28,6			
		Diesel										
		Medium	BFO	13,5	0,43	0,75	0,8	1,4	27,5			
		Speed	MDO/MGO	12,8	0,43	0,28	0,3	1,1	27,5			
		Diesel										
		Slow	BFO	17,5	0,39	1,63	1,7	1,4	15,8			
		Speed	MDO/MGO	16,4	0,39	0,28	0,3	1,4	24			
		Diesel										
		Steam	BFO	2	0,61	0,75	0,8	0,2	38			
		Turbine	MDO/MGO	1,9	0,61	0,28	0,3	0,2	38			
		Mesin Bantu	Maneuvering	Gas	BFO	3	0,61	1,39	1,5	0,2	38	
				Hotelling	Turbine	MDO/MGO	2,8	0,61	0,44	0,5	0,2	38
				High	BFO	9,3	0,46	2,37	2,4	1,7	27,9	
Speed	MDO/MGO			9,9	0,46	0,84	0,9	2,2	27,9			
Diesel												
Medium	BFO			10,8	0,43	2,37	2,4	2,2	28			
Speed	MDO/MGO			10,2	0,43	0,82	0,9	2,2	28			
Diesel												
Slow	BFO			14	0,39	2,37	2,4	2,2	15,8			
Speed	MDO/MGO			13,1	0,39	0,82	0,9	2,2	24			
Diesel												
Steam	BFO			1,6	0,61	2,37	2,4	0,2	38			
Turbine	MDO/MGO	1,6	0,61	0,82	0,9	0,2	38					
Mesin Bantu	Maneuvering	Hotelling	High	BFO	11,2	0,46	0,75	0,8	0,9	26,6		
		Speed	MDO/MGO	10,5	0,46	0,28	0,3	0,9	26,6			
		Diesel										
		Medium	BFO	14,2	0,46	0,75	0,8	1,1	27,8			
Mesin Bantu	Hotelling	Speed	MDO/MGO	13,5	0,46	0,28	0,3	1,1	27,8			
		Diesel										

Sumber: https://repository.unhas.ac.id/id/eprint/32361/2/D33116002_skripsi_09-02-2023%20bab%201-3.pdf

Tabel 2. 12 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik pada Tiap Jenis Mesin

Mesin	Status Pelayaran	Tipe Mesin	Tipe Bahan Bakar	Specific Fuel Consumption (gr/kWh)
Mesin Utama	Cruising	Gas Turbine	BFO	305
		High Speed Diesel	MDO/MGO	290
		Medium Speed Diesel	BFO	213
		Slow Speed Diesel	MDO/MGO	203
		Steam Turbine	BFO	213
		High Speed Diesel	MDO/MGO	203
		Medium Speed Diesel	BFO	195
		Slow Speed Diesel	MDO/MGO	185
		Steam Turbine	BFO	305
		High Speed Diesel	MDO/MGO	290
		Gas Turbine	BFO	336
		High Speed Diesel	MDO/MGO	319
		Medium Speed Diesel	BFO	234
		Slow Speed Diesel	MDO/MGO	223
Mesin Bantu	Maneuvering and Hotelling	Medium Speed Diesel	BFO	234
		Slow Speed Diesel	MDO/MGO	223
		High Speed Diesel	BFO	215
		Medium Speed Diesel	MDO/MGO	204
		Steam Turbine	BFO	336
		High Speed Diesel	MDO/MGO	319
		Medium Speed Diesel	BFO	227
		Slow Speed Diesel	MDO/MGO	217
		High Speed Diesel	BFO	227
		Slow Speed Diesel	MDO/MGO	217

Sumber: https://repository.unhas.ac.id/id/eprint/32361/2/D33116002_skripsi_09-02-2023%20bab%201-3.pdf

Keterangan:

BFO : *Bio Fuel Oil*

MDO : *Marine Diesel Oil*

MGO : *Marine Gas Oil*

Pada Tabel 2.11 diatas merupakan nilai faktor emisi dari setiap jenis polutan dan berdasarkan mode operasi pelayaran, tipe mesin, dan tipe bahan bakar yang digunakan oleh kapal. Kemudian nilai emisi faktor diatas, memenuhi standar MARPOL Annex VI. Pada Tabel 2.12 merupakan konsumsi bahan bakar spesifik untuk setiap jenis mesin berdasarkan status pelayaran, dan bahan bakar yang digunakan. Nilai pada konsumsi bahan bakar spesifik ini akan digunakan untuk mengetahui berapa jumlah bahan bakar yang digunakan kapal pada saat berlayar.