

SKRIPSI

**ESTIMASI JUMLAH EMISI KAPAL DAN SEBARAN EMISI
GAS BUANG KAPAL DI DAERAH PELABUHAN MAKASSAR**

Disusun dan diajukan oleh:

**MOH. DEDE ARFANDY RUSDI
D331 16 002**



**PROGRAM STUDI SARJANA SISTEM PERKIPALAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ESTIMASI JUMLAH EMISI KAPAL DAN SEBARAN EMISI GAS BUANG KAPAL DI DAERAH PELABUHAN MAKASSAR

Disusun dan diajukan oleh


Moh. Dede Arfandy Rusdi
D331 16 002

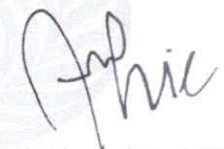
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 24 Januari 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

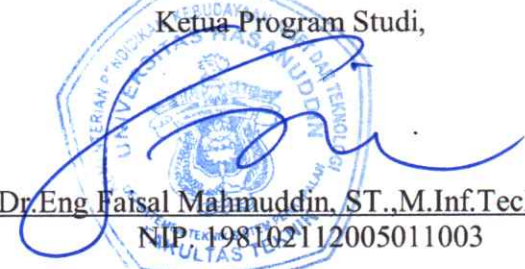
Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,


Rahimuddin, ST., MT., Ph.D
NIP. 1971083251999031002


Haryanti Rivai, ST., MT., Ph.D
NIP. 19790225202122001

Ketua Program Studi,


Dr. Eng Faisal Mahmuddin, ST., M.Inf.Tech., M.Eng
NIP. 198102112005011003

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Moh. Dede Arfandy Rusdi

NIM : D331 16 002

Program Studi : Teknik Sistem Perkapalan

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Estimasi Jumlah Emisi Kapal dan Sebaran Emisi Gas Buang Kapal di Daerah
Pelabuhan Makassar

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 24 Januari 2023

Menyatakan



Moh. Dede Arfandy Rusdi

ABSTRAK

MOH. DEDE ARFANDY RUSDI. *Estimasi Jumlah Emisi Kapal dan Sebaran Emisi Gas Buang Kapal Di Daerah Pelabuhan Makassar* (dibimbing oleh Rahimuddin dan Haryanti Rivai)

Meningkatnya produksi perikanan menjadi 30% dan kebutuhan jasa pengiriman barang seperti perabot rumah tangga, transportasi darat, dan sebagai transportasi lintas provinsi, menyebabkan meningkatnya jumlah emisi gas buang kapal yang dapat menyebabkan pencemaran udara di perairan. Sehingga tujuan penelitian ini adalah mengestimasi jumlah emisi dan sebaran emisi gas buang kapal tertinggi dari tahun 2017 sampai 2021, serta memprediksi jumlah emisi gas buang kapal pada tahun 2022 untuk mengetahui kualitas udara di daerah Pelabuhan Makassar. Dalam hal estimasi jumlah emisi gas buang kapal, maka digunakan metode US.EPA (*United States Environmental Protection Agency*), untuk estimasi nilai sebaran emisi gas buang kapal maka digunakan metode *Gaussian-Plume* sedangkan memprediksi jumlah emisi gas buang kapal pada tahun 2022 menggunakan pendekatan ekstrapolasi. Hasil dari estimasi jumlah emisi gas buang kapal tertinggi pada tahun 2018 dengan nilai NO₂ 1023,337 ton; SO₂ 43,982 ton; PM_{2,5} 22,94 ton; PM₁₀ 24,844 ton; CO 86,029 ton; CO₂ 4305,199 ton. Kemudian hasil estimasi sebaran emisi gas buang kapal tertinggi pada tanggal 2 Oktober 2017 dengan nilai NO₂ 128,317 µg/m³; SO₂ 5,412 µg/m³; PM_{2,5} µg/m³; PM₁₀ 3,062 µg/m³; CO 10,608 µg/m³; CO₂ 2727,429 µg/m³. Dan hasil prediksi jumlah emisi gas buang kapal pada tahun 2022 adalah NO₂ 1085,075 ton; SO₂ 48,685 ton; PM_{2,5} 25,376 ton; PM₁₀ 27,482 ton; CO 95,191 ton; CO₂ 4619,272 ton.

Kata Kunci: Emisi Gas Buang Kapal, US.EPA, *Gaussian Plume*, Ekstrapolasi

ABSTRACT

MOH. DEDE ARFANDY RUSDI. *Estimation Shi Exhaust and Ship Exhaust Emissions Distribution in The Makassar Port Area* (supervised by Rahimuddin and Haryanti Rivai)

The increase in fish production to 30% and the need for goods delivery services such as household furniture, land transport and interprovincial transport has led to an increase in the amount of ship exhaust gases, which can lead to air pollution and water bodies. So, the purpose of this study is to estimate the number of emissions and the highest distribution of ship exhaust emissions from 2017 to 2021 and to predict the amount of ship exhaust emissions in 2022 to improve the air quality in the port area of Makassar determine. The US.EPA (United States Environmental Protection Agency) method is used to estimate the amount of ship exhaust gas, and the Gaussian plume method is used to estimate the distribution value of ship exhaust gas when predicting the amount of ship exhaust emissions . in 2022 using the extrapolation approach. The results of the estimation of the highest ship exhaust emissions in 2018 with a NO₂ value of 1023,337 tons; SO₂ 43,982 tons; PM_{2.5} 22.94 tons; PM₁₀ 24,844 tons; CO 86,029 tons; CO₂ 4305.199 tons. Then the results of the estimation of the highest distribution of ship exhaust emissions on October 2, 2017 with a NO₂ 128,317 µg/m³; SO₂ 5.412 µg/m³; PM_{2.5} µg/m³; PM₁₀ 3.062 µg/m³; CO 10,608 µg/m³; CO₂ 524,380 µg/m³. And the predicted results for the amount of ship exhaust emissions in 2022 are NO₂ 1085,075 tons; SO₂ 48,685 tons; PM_{2.5} 25,376 tons; PM₁₀ 27,482 tons; CO 95,191 tons; CO₂ 4619.272 tons.

Keywords: Exhaust Emissions, US. EPA, Gaussian Plume, Ekstrapolation

DAFTAR ISI

SAMPUL	
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL.....	ix
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
KATA PENGANTAR	xii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Ruang Lingkup Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Polusi Udara	6
2.2 Sumber Polusi Udara	7
2.2.1 Sumber Polusi Udara Tetap	8
2.2.2 Sumber Polusi Udara Tidak Tetap.....	9
2.3 Kadar Emisi Gas Buang Mesin Diesel.....	10
2.4 Perhitungan Jumlah Emisi Gas Buang Kapal	12
2.5 Perhitungan Penyebaran Emisi Gas Buang Kapal.....	16
2.6 Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU).....	20
BAB 3 METODE PENELITIAN	23
3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian.....	23
3.1.1 Lokasi Penelitian	23
3.1.2 Waktu Penelitian	23
3.2 Studi Literatur.....	23
3.3 Pengumpulan Data.....	23
3.4 Identifikasi Data Kapal	24

3.5	Estimasi Jumlah Emisi Gas Buang Kapal	25
3.6	Estimasi Sebaran Emisi Gas Buang Kapal.....	25
3.7	Prediksi Jumlah Emisi Gas Buang Kapal pada Tahun 2022	26
3.8	ISPU dari Hasil Sebaran Emisi Gas Buang Kapal	26
3.9	Kerangka Penelitian.....	27
BAB 4.	HASIL DAN PEMBAHASAN	29
4.1	Hasil Jumlah Kapal.....	29
4.2	Hasil Estimasi Jumlah Emisi Gas Buang Kapal.....	31
4.3	Hasil Estimasi Sebaran Emisi Gas Buang Kapal	35
4.4	Prediksi Jumlah Emisi Gas Buang Kapal Tahun 2022	37
BAB 5.	PENUTUP	41
5.1	Kesimpulan.....	41
5.2	Saran	42
	DAFTAR PUSTAKA	43
	LAMPIRAN	45

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Cerobong Asap	8
Gambar 2. Hubungan Hidrokarbon dengan air fuel ratio	9
Gambar 3. Cerobong Asap Kapal	10
Gambar 4. Hasil Persentasi Kisaran dari Kadar Emisi Mesin Diesel	11
Gambar 5. Skema Pada Setiap Status Pelayaran	13
Gambar 6. Skema Model Gaussian Plume	16
Gambar 7. Koordinat Transfer	17
Gambar 8. Kerangka Penelitian	28
Gambar 9. Grafik Jumlah kapal keseluruhan pada tahun 2017-2021	29
Gambar 10. Grafik Jumlah Bahan Bakar Kapal dari Tahun 2017 sampai Tahun 2021	32
Gambar 11. Grafik Jumlah Emisi Gas Buang Kapal NO ₂ dari Tahun 2017 sampai Tahun 2021	32
Gambar 12. Jumlah Emisi Gas Buang Kapal NO ₂ dari Tahun 2018 sampai 2020	34
Gambar 13. Sebaran Emisi Gas Buang Kapal pada Tanggal 02 Oktober 2017	36
Gambar 14. Grafik Jumlah Kunjungan Pelabuhan Soekarno-Hatta dari Tahun 2014 sampai Tahun 2021	37
Gambar 15. Grafik Prediksi Jumlah Kapal dari Tahun 2020 sampai Tahun 2022	38
Gambar 16. Grafik Hasil Prediksi Jumlah Bahan Bakar pada Tahun 2022	39
Gambar 17. Grafik Hasil Prediksi Jumlah Emisi Gas Buang NO ₂ pada Tahun 2022	39

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Estimasi faktor beban dari mesin utama dan bantu pada jenis status pelayaran.....	13
Tabel 2. Faktor Emisi untuk NO ₂ , SO ₂ , PM _{2.5} , PM ₁₀ , CO, dan CO ₂	14
Tabel 3. Konsumsi Bahan Bakar Spesifik pada Tiap Jenis Mesin	15
Tabel 4. Nilai koefisien p berdasarkan kelas kestabilan udara.....	18
Tabel 5. Kelas Kestabilan Udara	19
Tabel 6. Koefisien dispersi dari tiap kelas kestabilan udara untuk daerah rural	19
Tabel 7. Koefisien disepersi dari tiap kelas kestabilan udara untuk daerah urban	19
Tabel 8. Hasil Pengukuran Nilai Konsentrasi Polutan.....	21
Tabel 9. Kategori Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU)	21
Tabel 10. Website setiap Class Society	24
Tabel 11. Jumlah Setiap Jenis Kapal yang Beroperasi dari Tahun 2017 sampai Tahun 2021	30
Tabel 12. Rata-rata Durasi pada Status Pelayaran Kapal di daerah Pelabuhan Makassar	30
Tabel 13. Jumlah Emisi dari Tahun 2017 sampai 2021	31
Tabel 14. Rata-rata Kadar Emisi Gas Buang dari Hasil Pembakaran pada Setiap Jenis Polutan	33
Tabel 15. Jumlah Emisi Gas Buang Kapal Tertinggi dari Tahun 2017 sampai 2021	33
Tabel 16. Rata-rata Jumlah Emisi Gas Buang setiap Jenis Kapal dari 2017 sampai 2021	34
Tabel 17. Sebaran Emisi Gas Buang Tertinggi dari tahun 2017 sampai 2021	35
Tabel 18. Hasil ISPU Sebaran Emisi Gas Buang Kapal pada Tanggal 2 Oktober 2017	36
Tabel 19. Tabel Hasil Prediksi Jumlah Emisi Gas Buang Kapal Pada Tahun 2022	40

DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
NO ₂	Natrium Dioksida
SO ₂	Sulfur Dioksida
PM	<i>Particular Matter</i>
CO	Karbon Monoksida
CO ₂	Karbon Dioksida
H ₂ O	Hidrogen
O ₂	Oksigen
N ₂	Nitrogen
VTS	<i>Vessel Traffic Service</i>
AIS	<i>Automatic Identification System</i>
BMKG	Badan Meteorologi, Klimatologi, Geofisika
ISPU	Indeks Standar Pencemaran Udara
E	Jumlah Emisi Gas Buang
EF	Faktor Emisi
LF	Faktor Beban
P	Daya Mesin
t	Lama Pelayaran
W	Jumlah Bahan Bakar
SFC	Kebutuhan Bahan Bakar Spesifik
C	Konsentrasi Emisi Gas Buang
Q	Beban Emisi
x	Jarak dari Sumber Emisi ke titik perhitungan sebaran emisi
y	Simpangan terhadap Sumbu y
z	Selisih ketinggian sumber emisi terhadap tempat pemaparan
u	Kecepatan Angin
He	Ketinggian Efektif
σ_y	Koefisien Dispersi <i>Gauss</i> Arah Horizontal

σ_z	Koefisien Dispersi <i>Gauss</i> Arah Vertikal
Δh	Tinggi Kepulan di atas Cerobong
v_s	Laju Gas Buang
d	Diameter Cerobong
u_s	Kecepatan Angin pada Ketinggian Cerobong
T_s	Suhu Gas Buang
T_a	Suhu Ambient
z_1	Tinggi pada Cerobong
z_2	Tinggi Pengukuran pada Kecepatan Angin
I	ISPU Terhitung
I_a	ISPU Batas Atas
I_b	ISPU Batas Bawah
X_a	Konsentrasi Polutan Batas Atas
X_b	Konsentrasi Polutan Batas Bawah
X_x	Konsentrasi Polutan Terhitung

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Jumlah Kapal dalam Tabulasi per Bulan dari 2017 sampai 2021	46
Lampiran 2. Tabel Jumlah Emisi Gas Buang dari tahun 2017 sampai 2021 pada setiap jenis polutan dan Jumlah Bahan Bakar.....	47
Lampiran 3. Grafik Jumlah Emisi Gas Buang untuk jenis polutan SO ₂ ; PM _{2,5} ; PM ₁₀ ; CO; dan CO ₂	50
Lampiran 4. Grafik Jumlah Emisi Gas Buang Kapal Tabulasi Per Bulan dari tahun 2017 sampai 2021.....	53
Lampiran 5. Gambaran Detail Area Sebaran Emisi pada Tanggal 2 Oktober 2017	68
Lampiran 6. Persentase Kadar Emisi Polutan dari Tahun 2017 sampai 2021	69
Lampiran 7. Hasil Jumlah Emisi Gas Buang Setiap Jenis Kapal dari Tahun 2017 sampai 2021	70
Lampiran 8. Data Iklim dan Jumlah Kapal pada Sebaran Emisi Tertinggi dari tahun 2017 sampai 2021	73
Lampiran 9. Grafik Hasil Prediksi Jumlah Emis Gas Buang Jenis Polutan SO ₂ ; PM ₂₅ ; PM ₁₀ ; CO; CO ₂ .pada Tahun 2022.....	74

KATA PENGANTAR

Bismillahirrohmanirrahim, Assalamualaikum Warahmatullah Wabarakatuh, Puji syukur kita panjatkan kehadirat Allah SWT, karena atas kebesaran-Nya dan kehendak-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan baik. Skripsi ini berjudul “Estimasi Jumlah Dan Sebaran Emisi Gas Buang Kapal Di Daerah Pelabuhan Makassar” sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

Sholawat serta salam kami haturkan kepada tauladan terbaik, baginda Rasulullah Muhammad SAW yang telah memperjuangkan Islam sehingga bisa sampai kepada kita saat ini.

Penulisan skripsi ini dilatar belakangi karena kurang diperhatikannya pencemaran dari gas buang kapal.

Dalam kesempatan ini, Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kepada kedua orang tua penulis, Rusdi Djalaluddin dan Barniah atas jasa – jasanya, kesabaran, do’a, dan tidak pernah lelah dalam mendidik dan memberi cinta yang tulus dan ikhlas kepada penulis semenjak kecil hingga penulis dewasa.
2. Andini Nur Indahsari dan Dita Zhazha yang senantiasa membantu mendanai ketika ada kerusakan alat dan membantu memberikan solusi pada pengerjaan model.
3. Dr. Eng Faisal Mahmudin S.T., M.Eng., Ph.D selaku ketua Departemen Teknik Sistem Perkapalan.
4. Rahimuddin, ST., MT., Ph.D selaku ketua Laboratorium Listrik dan kendali kapal Teknik Sistem Perkapalan Unhas sekaligus Pembimbing Utama yang mendanai, bijaksana memberikan bimbingan, nasihat, serta waktunya selama penelitian dan penyusunan skripsi ini.
5. Haryanti Rivai, S.T, M.T, Ph.D selaku Pembimbing Pendamping dan juga penasihat akademik yang memberikan bimbingan, serta waktunya selama penelitian dan penyusunan skripsi ini.

6. Andi Haris Muhammad, ST., MT., Ph. D dan Rusydi Alwi S.T., M.T. selaku dosen penguji.
7. Bapak/Ibu dosen yang namanya tidak sempat saya sebutkan satu per satu disini atas bantuan dan bimbingannya selama kuliah.
8. Para staf Departemen Teknik Sistem Perkapalan atas segala jasa dan dukungannya.
9. Teman-teman Angkatan 2016 TSP tercinta yang telah banyak memberikan dorongan, semangat dan bantuan baik secara moril demi lancarnya penyusunan skripsi ini.
10. Teman-teman Labo Listrik Kendali Kapal khususnya Miftahul Arzaq (SP'14), Jeryls Christoven (SP'14), Zukhra Subagio (SP'14), A.M Samad (SP'15), Alfajrin Syawal (SP'15), Agung Setiawan (SP'15), dan Muh. Nursyahrul Qadri (SP'15) yang selama ini membantu penulis dalam berdiskusi, menyusun skripsi dan memberikan masukan.
11. Semua pihak yang telah banyak membantu penulis dalam proses penyelesaian skripsi ini.

Penyusun sebagai manusia biasa menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna.

Akhir kata, semoga laporan ini dapat menambah wawasan baru. Semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan semoga Allah SWT senantiasa memberikan rahmat dan karunia-Nya kepada kita semua. Aamiin.

Makassar, Januari 2023

Penulis

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara kepulauan terbesar sekaligus negara maritim dengan dua pertiga wilayahnya merupakan wilayah lautan. Dalam hal pangan, laut banyak menyimpan sumber pangan manusia yang melimpah yaitu ikan. Ada lebih dari delapan ribu jenis ikan laut pada tanah air dan yang mengagumkan lagi 37% spesies ikan di dunia hidup pada perairan Indonesia. Untuk produksi perikanan yang sudah dimiliki Indonesia saat ini sudah berkontribusi dalam memasok kebutuhan produk perikanan di dunia mencapai 30% yang membuat Indonesia sebagai salah satu pemasok produk perikanan terbesar didunia. Demikian yang pernah disampaikan oleh mantan Menteri Kelautan dan Perikanan dari Kabinet Kerja periode 2014-2019 Susi Pudjiastuti. Bukan hanya dalam bidang pangan saja, tetapi meningkatnya juga kebutuhan jasa pengiriman barang seperti perabot rumah tangga, transportasi darat, dan lain-lain serta sebagai transportasi lintas provinsi. Yang jadi permasalahan dalam hal ini yaitu emisi gas buang kapal untuk karbon dioksida (CO₂), Karbon monoksida (CO), Nitrogen Oksida (NO_x) dan yang terakhir Particulate matter (PM). Dengan semakin meningkatnya jumlah kebutuhan warga sehingga membutuhkan transportasi kapal maka semakin meningkat pula tingkat pencemaran pada perairan yang disebabkan oleh hasil gas buang oleh kapal itu sendiri tersebut (Fardiaz 1992).

Menurut Keputusan Menteri Negara Kependudukan dan Lingkungan Hidup NO.02/MENKLH/I/1988 yang dimaksud dengan pencemaran udara adalah dimasukkannya zat energi dan komponen lain ke dalam udara atau berubahnya tatanan (komposisi) udara oleh kegiatan manusia atau proses alam, sehingga kualitas udara menjadi berkurang atau tidak dapat berfungsi lagi sesuai dengan peruntukannya. Dikhawatirkan emisi gas buang dari kapal-kapal di Pelabuhan Makassar sudah melewati ambang batas yang telah ditentukan oleh 2 peraturan. Jika emisi gas buang dari kapal sudah melewati ambang batas yang telah ditentukan maka bukan tidak mungkin dapat menyebabkan global warming. Global Warming adalah adanya proses peningkatan suhu rata-rata atmosfer, laut, dan daratan bumi.

Beberapa macam komponen pencemar udara, komponen-komponen yang paling banyak berpengaruh antara lain: Karbon Monoksida (CO), Nitrogen Oksida (NO), Belerang Oksida (SO), Hidra Karbon (HC), dan Partikel.

Emisi gas buang dengan kandungan Nitrogen Oksida (NO_x), Sulfur Oksida (SO_x), Karbon Monoksida (CO), Hidrokarbon (HC) dan substansi lainnya dapat menyebabkan masalah bagi kesehatan pekerja, masyarakat dan lingkungan sekitar pelabuhan. Hal ini akan berdampak besar khususnya bagi manusia, dimana substansi tersebut dapat masuk kedalam tubuh melalui system pernafasan. Beda jenis pencemar maka berbeda pula jauh penetrasinya kedalam tubuh (Goodin 1981). Semakin kecil ukuran partikulat maka penetrasinya dapat mencapai paru-paru namun partikulat yang berukuran besar akan terhambat di saluran pernafasan bagian atas (Colls 2002).

Zat pencemar dapat diserap oleh sistem peredaran darah dalam paru-paru dan menyebar ke seluruh tubuh. Penyakit umum yang dapat diderita adalah SPA (Infeksi Saluran Pernafasan Akut), diantaranya terdiri dari asma, bronkitis, dan gangguan pernafasan lainnya. Fenomena ini diperparah dengan belum diratifikasinya MARPOL 73/78 Annex VI oleh pemerintah Indonesia (Pitana, Kobayashi, and Wakabayashi 2010), minimnya penggunaan bahan bakar ramah lingkungan serta bahan bakar low grade yang masih menjadi idaman karena harga yang lebih murah (Karan 2012).

Berdasarkan narasi diatas, pada tugas akhir ini akan dilakukan analisa emisi gas buang pada area laut Pelabuhan Soekarno Hatta, di Makassar. Analisa dilakukan dengan melihat jumlah kapal beroperasi di daerah laut Pelabuhan Makassar. Perhitungan ini melibatkan emisi gas buang yang dihasilkan oleh mesin utama dan mesin bantu kapal.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang diatas, diperoleh rumusan masalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana cara mengestimasi jumlah emisi gas buang kapal di Daerah Pelabuhan Makassar?
- b. Bagaimana cara mengetahui nilai sebaran emisi gas buang kapal yang tertinggi di Daerah Pelabuhan Makassar?

- c. Bagaimana cara memprediksi jumlah emisi gas buang kapal di Daerah Pelabuhan Makassar pada tahun 2022?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapaun beberapa tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

- a. Mengetahui mengestimasi jumlah emisi gas buang kapal di Daerah Pelabuhan Makassar.
- b. Mengetahui nilai sebaran emisi gas buang kapal tertinggi di Daerah Pelabuhan Makassar.
- c. Mengetahui memprediksi jumlah emisi gas buang kapal di daerah pelabuhan Makassar.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun beberapa manfaat dari penelitian ini yaitu:

- a. Menambah pengetahuan masyarakat pada Daerah Pelabuhan Makassar permasalahan global warming dan dampak yang dihasilkan terhadap kesehatan masyarakat sekitar, sehingga pemilik kapal dapat mengurangi emisi gas buang pada kapal tersebut.
- b. Manfaat untuk pemilik kapal yaitu dapat mengontrol besaran emisi gas buang kapal agar tidak melanggar peraturan yang telah ditetapkan.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Agar pembahasan dalam skripsi ini tidak meluas, maka perlu diberi ruang lingkup anatara lain sebagai berikut:

- a. Ruang lingkup wilayah penelitian hanya sebatas pada laut Daerah Pelabuhan Makassar khususnya Pelabuhan Soekarno-Hatta
- b. Estimasi dan konsentrasi emisi gas buang yang di keluarkan oleh kapal yang di hitung hanya sebatas Karbon Monoksida (CO), Karbon Dioksida (CO₂), Nitrogen Oksida (NO_x), particulate matter (PM), dan Sulfur (SO_x).
- c. *Database* kapal-kapal yang diambil di Kantor VTS Makassar.
- d. *Database* kapal-kapal diambil dari tahun 2017-2021.

- e. Dalam estimasi jumlah emisi gas buang kapal menggunakan Metode US. EPA.
- f. Dalam estimasi sebaran emisi gas buang kapal menggunakan Metode *Gaussian - Plume*.
- g. Prediksi jumlah emisi gas buang kapal pada tahun 2022 dengan menggunakan pendekatan ekstrapolasi di *Microsoft Excel*.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini terbagi dalam 5 bab yaitu:

a. BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini berisi tentang penguraian secara singkat latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah penelitian, metode penelitian, dan sistematika penulisan.

b. BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dijelaskan tentang teori polusi udara, sumber polusi udara, kadar emisi pada mesin diesel, estimasi jumlah emisi gas buang, mengetahui sebaran emisi gas buang, dan Indeks Standar Pencemar Udara

c. BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini berisi uraian secara singkat mengenai lokasi dan waktu penelitian, penjelasan mengenai tahap dalam mengerjakan tugas akhir, yaitu studi literatur, pengumpulan data, identifikasi kapal, estimasi jumlah emisi gas buang kapal, estimasi sebaran emisi gas buang kapal, prediksi jumlah emisi gas buang kapal pada tahun 2022, mengetahui kualitas udara pada sebaran emisi gas buang kapal tertinggi, serta penggambaran kerangka tahap pengerjaan tugas akhir ini.

d. BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisi hasil dan pembahasan dari estimasi jumlah emisi gas buang kapal, sebaran emisi gas buang kapal, prediksi jumlah emisi gas buang kapal pada tahun 2022, dan hasil hitungan ISPU dari sebaran emisi gas buang kapal tertinggi.

e. BAB V PENUTUP

Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran-saran yang berkaitan dengan isi Bab IV

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Polusi Udara

Berbagai macam zat kimia yang menjadi polusi udara dapat berdampak pada kesehatan manusia, hewan, serta tumbuhan baik itu secara langsung (instan) maupun tidak langsung. 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 (Rahmawaty 2002)

Polusi udara merupakan kondisi atmosfer yang kedatangan zat dengan konsentrasi melebihi batas normal *ambient* dimana efeknya dapat berdampak pada manusia, hewan dan vegetasi. Seperti penjelasan dibawah, komponen kimia didalamnya mempengaruhi kategori dari masingmasing polusi udara (Visscher 2014).

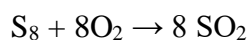
- Sulfur (SO₂)

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

SO₂ dalam kandungan bahan bakar.



SO₂ hasil dari pembakaran

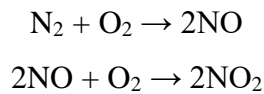


Sulfur dioksida (SO₂) dapat mengganggu sistem pernafasan, gangguan jantung, serta sifatnya korosif terhadap bahan *metal*.

- 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

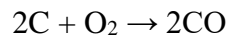
akan terbentuk NO_x diruang bakar pada suhu tinggi. Berikut adalah reaksi kimianya.



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

- Karbon (CO_x)

CO_x dapat berupa karbon monoksida (CO) maupun karbon dioksida (CO_2), namun karbon monoksida (CO) sangat berbahaya bagi kesehatan manusia. Dan karbon monoksida hasil dari pembakaran yang tidak sempurna, 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):



- *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*.

2.2 Sumber Polusi Udara

Berdasarkan peraturan pemerintah republik Indonesia nomor 41 tahun 1999 tentang pengendalian pencemaran udara, definisi dari polusi udara adalah usaha memproduksi bahan pencemar ke udara. Sumber polusi udara dapat dibedakan menjadi beberapa seperti pembakaran dan bukan pembakaran, sumber tetap dan sumber bergerak, serta langsung dan tidak langsung (Goodin 1981)

Letusan gunung berapi juga salah satu fenomena yang menghasilkan polusi udara dengan konsentrasi tinggi (Kawashima 1995). Walaupun kejadian ini menghasilkan emisi yang sangat tinggi namun fenomena ini jarang terjadi serta

belum tentu terjadi ditiap 10 tahun sekali. Namun polusi yang menghasilkan sedikit emisi dari kegiatan manusia seperti kendaraan bermotor, aktifitas industri, boiler, insenerator dan lain-alin. Aktifitas tersebut bisa membuat lingkungan tercemar secara perlahan hingga pada tingkat yang berbahaya bagi kesehatan manusia dan alam itu sendiri (Artana et al. 2014).

2.2.1 Sumber Polusi Udara Tetap

Sumber tetap adalah sumber emisi yang berada pada posisi tetap dari waktu ke waktu, contohnya adalah cerobong asap industri, emisi SO₂ dari cerobong PLTU seperti pada Gambar 1

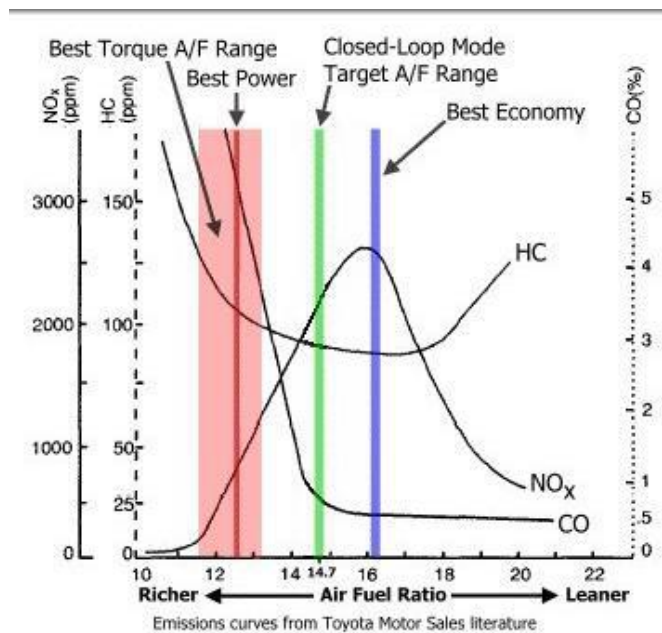


Gambar 1. Cerobong Asap

Beberapa standar dibelakukan untuk mengurangi laju emisi dari sumber tetap seperti pada cerobong asap. Oleh sebab itu diperlukan tindakan yang tepat dalam pengendalian emisi yang harus dilakukan oleh lembaga atau pemerintah seperti dimensi cerobong asap yang sesuai, mengubah praktik operasi pabrik, tinggi serta perangkat yang layak (Goodin 1981).

2.2.2 Sumber Polusi Udara Tidak Tetap

Polusi yang dihasilkan dari kendaraan seperti motor, mobil, kapal, dan sebagainya menjadi salah satu isu utama dalam hal emisi, dikarenakan peningkatan jumlah kendaraan bermotor dan kurun waktu penggunaannya yang tinggi pada setiap tahunnya. Sumber emisi gas buang tidak tetap dihasilkan dari kendaraan yang dapat berpindah-pindah dari satu kota ke kota lainnya serta dipengaruhi oleh faktor lain seperti arah angin dan cuaca (Saputra et al. 2013). Dimana penggunaan kendaraan yang menggunakan mesin bensin dan mesin diesel yang menghasilkan polusi mengandung hidrokarbon yang dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Hubungan Hidrokarbon dengan air fuel ratio



Gambar 3. Cerobong Asap Kapal

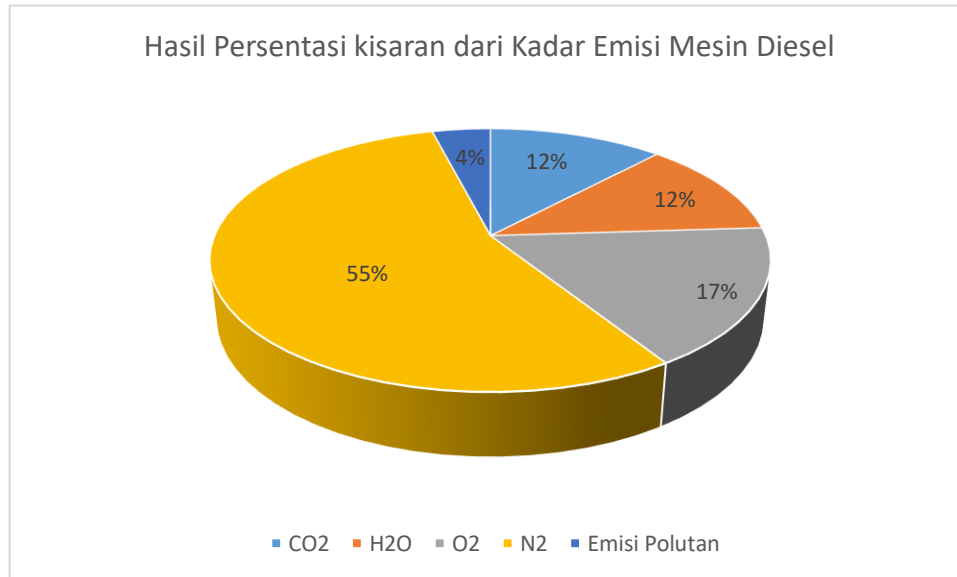
Sebagian besar kendaraan didunia menggunakan motor bakar dalam, baik itu bensin maupun diesel. Polutan yang berasal dari kendaraan tergantung pada faktor-faktor seperti rasio udara-bahan bakar, waktu pengapian, rasio kompresi, geometri ruang bakar, kecepatan putaran mesin, serta tipe bahan bakar itu sendiri. Hal yang paling berpengaruh adalah jenis bahan bakar yang digunakan semakin tinggi kualitas bahan bakar maka hasil emsinya semakin rendah begitupun sebaliknya.

2.3 Kadar Emisi Gas Buang Mesin Diesel

Mesin diesel, seperti mesin pembakaran dalam lainnya, mengubah energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar menjadi energi mekanik. Bahan bakar diesel adalah campuran hidrokarbon yang dalam proses pembakaran ideal hanya akan menghasilkan karbon dioksida (CO_2) dan uap air (H_2O). Konsentrasi volumetrik gas-gas ini dalam knalpot diesel biasanya dalam kisaran yaitu CO_2 12%; H_2O 12%; O_2 17%; N_2 55% (Khair and Dieselnet 2006).

Selain itu ada juga jenis polutan dari emisi mesin diesel yang dapat merugikan kesehatan dan dampak lingkungan. Sebagian besar polutan tersebut berasal dari berbagai proses yang tidak ideal selama pembakaran, seperti pembakaran bahan bakar yang tidak sempurna, reaksi antar komponen campuran pada temperatur dan tekanan tinggi, pembakaran oli pelumas mesin dan aditif oli serta pembakaran

komponen non-hidrokarbon solar. Jenis polutan yang termasuk dalam hal ini yaitu Hidrocarbon (HC), Karbo Monoksida (CO), Nitrogen Dioksida (NO₂) atau Particullar Matter (PM). Nilai konsentrasi dari emisi pada semua jenis polutan ini adalah kisaran 4 %.



Gambar 4. Hasil Persentasi Kisaran dari Kadar Emisi Mesin Diesel

Ada sumber lain yang dapat berkontribusi pada emisi polutan dari mesin pembakaran internal biasanya dalam konsentrasi kecil, tetapi dalam beberapa kasus mengandung bahan dengan toksisitas tinggi. Emisi tambahan ini dapat mencakup logam dan senyawa lain dari keausan mesin atau senyawa yang dipancarkan dari katalis pengatur emisi (melalui gesekan katalis atau penguapan senyawa padat pada suhu gas buang yang tinggi).

Pembentukan spesies baru biasanya tidak ada di knalpot mesin juga dapat difasilitasi oleh katalis. Ini tampaknya terutama terjadi ketika katalis dimasukkan ke dalam ruang bakar. Misalnya, beberapa aditif bahan bakar disebut katalis pembawa bahan bakar yang digunakan untuk mendukung regenerasi filter partikulat diesel telah dikaitkan dengan emisi dioksin dan furan yang sangat beracun. Kemungkinan emisi baru harus dipertimbangkan setiap kali aditif (katalitik atau tidak) dimasukkan ke dalam bahan bakar atau minyak pelumas dan ketika cairan dimasukkan ke dalam gas buang. Selain itu, bahan bakar berkualitas rendah masih dapat menjadi sumber emisi lainnya misalnya, sisa bahan bakar yang digunakan dalam mesin kapal besar mengandung logam berat dan senyawa lain

yang diketahui memiliki efek merugikan bagi kesehatan dan lingkungan (Heeba et al. 2011).

2.4 Perhitungan Jumlah Emisi Gas Buang Kapal

Perhitungan jumlah emisi gas buang pada kapal berdasarkan referensi dari USA. EPA (*Unites States Environmental Protection Energy*) (Trozzi 2011). Perhitungan jumlah emisi gas buang dari mesin utama/bantu pada kapal mengikuti persamaan berikut

$$E_{i,j,m} = \sum_p [t_p \sum_e (P_e \times LF_e \times EF_{e,i,j,m,p})] \quad (1)$$

Dimana:

- E : Total emisi polutan i (g)
- EF : Faktor emisi (g/kWh)
- LF : Faktor beban (%)
- P : Daya mesin (kW)
- t : Waktu (jam)
- e : Kategori mesin (Mesin Utama, Mesin Bantu)
- i : Polutan
- j : Tipe mesin
- m : Tipe bahan bakar
- p : Status Pelayaran

dimana lama pelayaran pada saat p (status pelayaran) dihitung dengan persamaan berikut

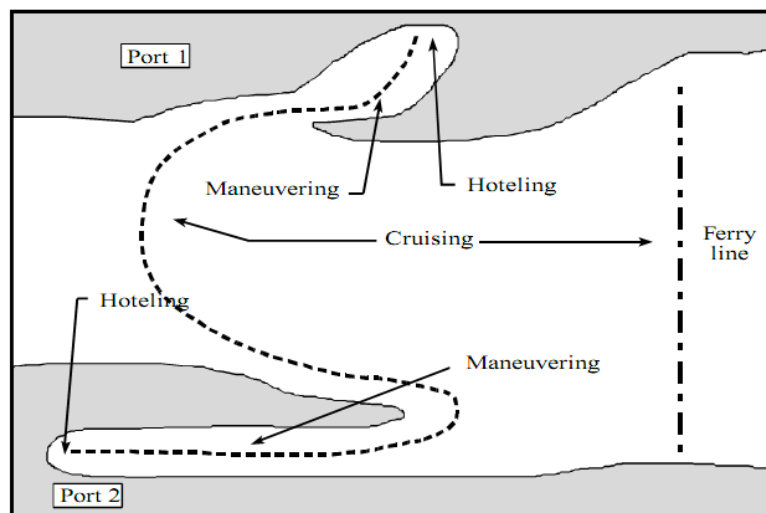
$$t = \frac{S}{V} \quad (2)$$

keterangan:

- t : Lama pelayaran (jam)
- S : Jarak pelayaran (mil laut)
- V : Kecepatan kapal (knot)

Dari persamaan (2), dibutuhkan data kapal untuk mengetahui jenis kapal, jenis mesin utama/bantu, dan jenis bahan bakar yang digunakan, dan jenis status pelayaran pada kapal tersebut.

Status pelayaran kapal digunakan untuk mengukur faktor beban (LF) dan faktor emisi yang dihasilkan dari aktivitas kapal. Terdapat 3 jenis status pelayaran kapal yaitu *cruising*, *maneuvering*, dan *hotelling*. Ketika kapal mendekati, berlabuh (*at anchor*), dan meninggalkan pelabuhan disebut *maneuvering*. *Hotelling* mengacu pada kapal berlabuh di samping dermaga dan melakukan aktifitas bongkar muat, sedangkan kapal yang melaju dengan kecepatan konstan disebut dengan *cruising* (Saputra et al. 2013). Status pelayaran kapal ditunjukkan pada Gambar 5



Gambar 5. Skema Pada Setiap Status Pelayaran

Pada persamaan (1) untuk mengetahui nilai LF (faktor beban) berdasarkan status pelayaran maka menggunakan nilai pada Tabel 1 (Trozzi C and Vaccaro R 1998). Berikut tabel estimasi faktor beban setiap status pelayaran.

Tabel 1. Estimasi faktor beban dari mesin utama dan bantu pada jenis status pelayaran

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

Selain itu, emisi gas buang dihitung dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti mesin dan jenis bahan bakar serta status pelayaran seperti terlihat pada Tabel 2 (Cebolla 2022).

Tabel 2. Faktor Emisi untuk NO₂, SO₂, PM_{2.5}, PM₁₀, CO, dan CO₂

Mesin	Status	Tipe	Tipe Bahan	Faktor Emisi (g/kWh)					
				NO ₂	SO ₂	PM _{2.5}	PM ₁₀	CO	CO ₂
Mesin Utama	<i>Cruising</i>	<i>Gas</i>	BFO	5,9	0,61	0,1	0,1	0,2	38
		<i>Turbine</i>	MDO/MGO	5,5	0,61	0,1	0,1	0,2	38
		<i>High</i>	BFO	12,3	0,46	0,75	0,8	1,5	28,6
		<i>Speed</i>	MDO/MGO	11,6	0,46	0,28	0,3	1,1	28,6
		<i>Diesel</i>							
		<i>Medium</i>	BFO	13,5	0,43	0,75	0,8	1,4	27,5
		<i>Speed</i>	MDO/MGO	12,8	0,43	0,28	0,3	1,1	27,5
		<i>Diesel</i>							
		<i>Slow</i>	BFO	17,5	0,39	1,63	1,7	1,4	15,8
		<i>Speed</i>	MDO/MGO	16,4	0,39	0,28	0,3	1,4	24
	<i>Diesel</i>								
	<i>Steam</i>	BFO	2	0,61	0,75	0,8	0,2	38	
	<i>Turbine</i>	MDO/MGO	1,9	0,61	0,28	0,3	0,2	38	
	<i>Maneuvering</i> <i>Hotelling</i>	<i>Gas</i>	BFO	3	0,61	1,39	1,5	0,2	38
		<i>Turbine</i>	MDO/MGO	2,8	0,61	0,44	0,5	0,2	38
		<i>High</i>	BFO	9,3	0,46	2,37	2,4	1,7	27,9
		<i>Speed</i>	MDO/MGO	9,9	0,46	0,84	0,9	2,2	27,9
		<i>Diesel</i>							
		<i>Medium</i>	BFO	10,8	0,43	2,37	2,4	2,2	28
		<i>Speed</i>	MDO/MGO	10,2	0,43	0,82	0,9	2,2	28
<i>Diesel</i>									
<i>Slow</i>		BFO	14	0,39	2,37	2,4	2,2	15,8	
<i>Speed</i>		MDO/MGO	13,1	0,39	0,82	0,9	2,2	24	
<i>Diesel</i>									
<i>Steam</i>	BFO	1,6	0,61	2,37	2,4	0,2	38		
<i>Turbine</i>	MDO/MGO	1,6	0,61	0,82	0,9	0,2	38		
Mesin Bantu	<i>Cruising</i>	<i>High</i>	BFO	11,2	0,46	0,75	0,8	0,9	26,6
<i>Maneuvering</i> <i>Hotelling</i>	<i>Speed</i>	MDO/MGO	10,5	0,46	0,28	0,3	0,9	26,6	
	<i>Diesel</i>								
	<i>Medium</i>	BFO	14,2	0,46	0,75	0,8	1,1	27,8	
	<i>Speed</i>	MDO/MGO	13,5	0,46	0,28	0,3	1,1	27,8	
<i>Diesel</i>									

Tabel 3. Konsumsi Bahan Bakar Spesifik pada Tiiap 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
		High Speed Diesel	BFO	213
		Medium Speed Diesel	MDO/MGO	203
		Medium Speed Diesel	BFO	213
		Slow Speed Diesel	MDO/MGO	203
		Slow Speed Diesel	BFO	195
		Slow Speed Diesel	MDO/MGO	185
		Steam Turbine	BFO	305
		Steam Turbine	MDO/MGO	290
		Gas Turbine	BFO	336
		Gas Turbine	MDO/MGO	319
		High Speed Diesel	BFO	234
		High Speed Diesel	MDO/MGO	223
Mesin Bantu	Maneuvering and Hotelling	Medium Speed Diesel	BFO	234
		Medium Speed Diesel	MDO/MGO	223
		Slow Speed Diesel	BFO	215
		Slow Speed Diesel	MDO/MGO	204
		Steam Turbine	BFO	336
		Steam Turbine	MDO/MGO	319
		High Speed Diesel	BFO	227
		High Speed Diesel	MDO/MGO	217
		Medium Speed Diesel	BFO	227
		Medium Speed Diesel	MDO/MGO	217

Keterangan:

BFO : *Bunker Fuel Oil*

MDO : *Marine Diesel Oil*

MGO : *Marine Gas Oil*

Pada Tabel 2 diatas merupakan nilai faktor emisi dari setiap jenis polutan dan berdasarkan status pelayaran, jenis mesin, dan jenis bahan bakar yang digunakan. Kemudian nilai emisi faktor diatas, memenuhi standar MARPOL Annex VI.

Pada Tabel 3 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, rumus dari jumlah bahan bakar yang digunakan pada kapal sebagai berikut.

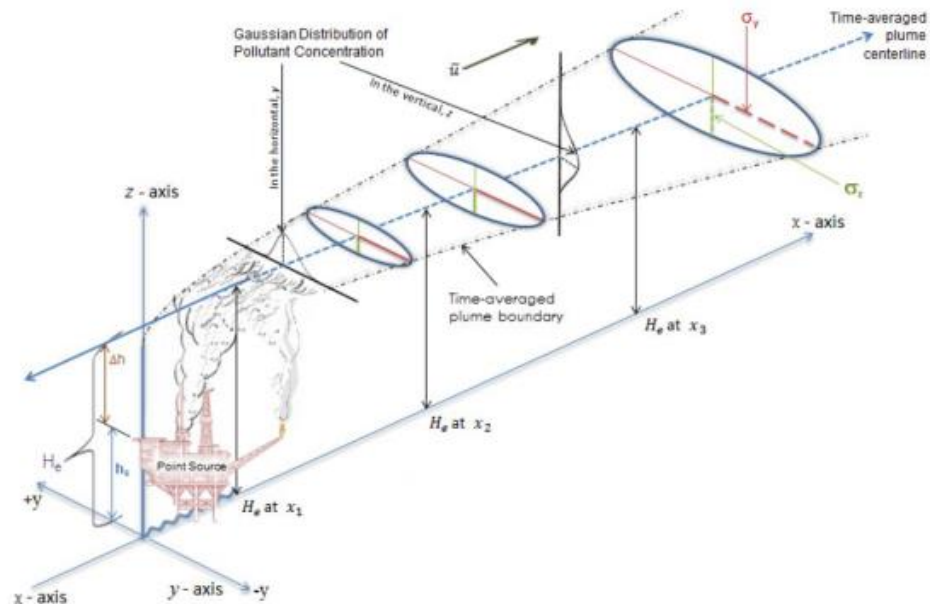
$$W = P \times SFC \times LF \times t \quad (3)$$

Dimana:

- W : Jumlah bahan bakar (ton)
 P : Daya mesin (kW)
 SFC : Konsumsi bahan bakar spesifik (g/kWh)
 LF : Faktor Beban (%)
 t : Lama Pelayaran (jam)

2.5 Perhitungan Penyebaran Emisi Gas Buang Kapal

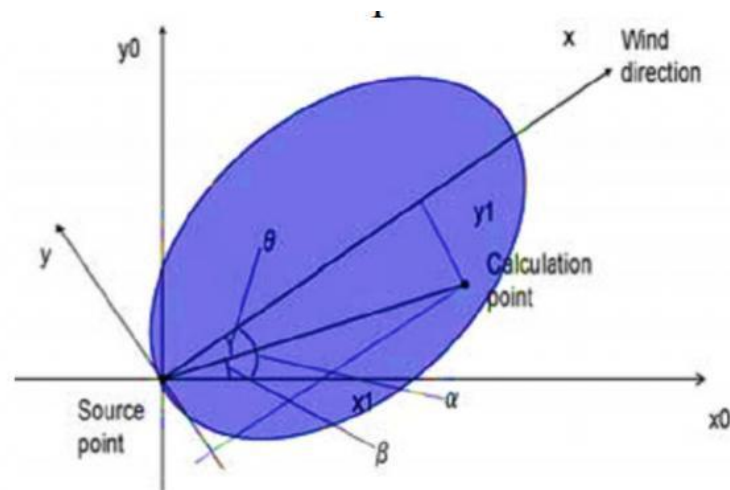
Terdapat beberapa jenis model yang digunakan untuk memperkirakan konsentrasi polutan dari sumber polusi. Salah satunya adalah Model *Gaussian Plume* yang dapat digunakan untuk menghitung sebaran dan konsentrasi polutan dari suatu ketinggian hingga dipermukaan tanah dari sumber polusi model ini sering digunakan dalam penelitian yang berhubungan dengan sebaran polusi udara (Colls 2002). Selain mudah dimengerti dan mudah diaplikasikan, saat ini model *Gaussian Plume* telah mendapatkan persetujuan internasional. Skema dari Model *Gaussian Plume* dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Skema Model *Gaussian Plume*

Sebaran emisi gas buang kapal dapat dipengaruhi oleh keadaan udara atmosfer. Saat keadaan udara stabil, maka nilai konsentrasi pada sebaran emisi gas buang kapal turun sebaliknya, jika keadaan udara tidak stabil maka nilai konsentrasi pada sebaran emisi gas buang kapal naik (Visscher 2014).

Kemudian sebaran emisi gas buang kapal juga dapat dipengaruhi oleh arah angin, yang dapat berubah nilai x dan y seperti pada Gambar 7 dibawah yang disebut dengan Koordinat Transfer (Liu et al. 2006).



Gambar 7. Koordinat Transfer

Dari skema Gambar 6 Model *Gaussian Plume* dapat dirumuskan sebagai berikut (Allen, Young, and Haupt 2007).

$$C(x, y, z, He) = \frac{Q}{u\sigma_z\sigma_y2\pi} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-He)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+He)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (4)$$

Dimana:

- C : Konsentrasi Polutan pada suatu titik (x,y,z) dalam ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- Q : Beban Emisi (g/s)
- x : Jarak dari sumber emisi ke titik perhitungan sebaran emisi (m)
- u : Kecepatan Angin (m/s)
- σ_y, σ_z : Koefisien dispersi Gauss arah horizontal (y) dan vertikal (z) merupakan fungsi dari x (m)
- y : Simpangan menurut sumbu y (m)
- z : Selisih ketinggian sumber emisi terhadap tempat pemaparan (m)
- H_e : Ketinggian efektif ($H_e = h + \Delta h$), h adalah ketinggian cerobong dan Δh adalah tinggi kepulan di atas cerobong (m)

Dimana:

$$\Delta h = v_s \cdot \frac{d}{u_s} \left(1,5 + 2,71551 d \frac{T_s - T_a}{T_s} \right) \quad (5)$$

Keterangan:

- Δh : Tinggi kepulan di atas cerobong (m).
 v_s : Laju gas buang (m/s).
 d : Diameter cerobong (m)
 u_s : Kecepatan angin pada ketinggian cerobong (m/s)
 T_s : Suhu pada gas buang (°K)
 T_a : Suhu udara ambient (°K)

Angka 271551 merupakan konstanta dengan satuan m^{-1}

Untuk menentukan u_s digunakan rumus (2.5) seperti dibawah ini.

$$u_s = u \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^p \quad (6)$$

Keterangan:

- u : Kecepatan Angin (m/s)
 z_1 : Tinggi pada cerobong (m)
 z_2 : Tinggi pengukuran kecepatan angin (m)

nilai koefisien p didapat pada Tabel 4 di bawah ini.

Tabel 4. Nilai koefisien p berdasarkan kelas kestabilan udara

Kelas Kestabilan Udara	p untuk daerah <i>rural</i>	p untuk daerah <i>urban</i>
A	0,11	0,15
B	0,12	0,15
C	0,12	0,20
D	0,17	0,25
E	0,29	0,4
F	0,45	0,6

Pada Tabel 4 diatas penentuan nilai koefisien p untuk menghitung kecepatan angin pada ketinggian cerobong berdasarkan daerah sumber emisi yaitu *rural* dan *urban* jika pada saat kapal dengan status pelayaran *hotelling* serta kelas kestabilan udara. Kawasan *urban* adalah wilayah yang mempunyai kegiatan utama bukan pertanian dengan susunan fungsi kawasan sebagai tempat permukiman perkotaan, pemusatan dan distribusi pelayanan jasa pemerintahan, pelayanan sosial, dan kegiatan ekonomi (Supriyatin, Pravitasari, and Pribadi 2020). Sedangkan kawasan *rural* adalah wilayah yang mempunyai kegiatan

utama pertanian, termasuk pengelolaan sumber daya alam dengan susunan fungsi kawasan sebagai tempat permukiman perdesaan, pelayanan jasa, pemerintahan, pelayanan sosial, dan kegiatan ekonomi (Supriyatin, Pravitasari, and Pribadi 2020).

Untuk mengetahui kelas kestabilan udara yaitu menggunakan Tabel 5 seperti dibawah ini.

Tabel 5. Kelas Kestabilan Udara

Kecepatan Angin	Kelas Kestabilan Udara				
	Pagi/Siang			Malam	
	Terik (<i>Intensity</i>) Matahari			Tutup Berawan	
	Kuat	Sedang	Lemah	$\geq 4/8$	$\leq 3/8$
<2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Pada Tabel 5 diatas penentuan kelas kestabilan udara, berdasarkan data meteorologi daerah sumber emisi. Data meteorologi didapat dari badan meteorologi negara tempat sumber emisi berada. Contohnya di Indonesia yaitu Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG).

Tabel 6. Koefisien dispersi dari tiap kelas kestabilan udara untuk daerah rural

Kelas Kestabilan Udara	$\sigma_y(x)$	$\sigma_z(x)$
A	$0,22x(1 + 0,0001x)^{-0,5}$	$0,20x$
B	$0,16x(1 + 0,0001x)^{-0,5}$	$0,12x$
C	$0,11x(1 + 0,0001x)^{-0,5}$	$0,08x(1 + 0,0001x)^{-0,5}$
D	$0,08x(1 + 0,0001x)^{-0,5}$	$0,06x(1 + 0,0001x)^{-0,5}$
E	$0,06x(1 + 0,0001x)^{-0,5}$	$0,03x(1 + 0,0001x)^{-0,5}$
F	$0,04x(1 + 0,0001x)^{-0,5}$	$0,016x(1 + 0,0001x)^{-0,5}$

Tabel 7. Koefisien disepersi dari tiap kelas kestabilan udara untuk daerah urban

Kelas Kestabilan Udara	$\sigma_y(x)$	$\sigma_z(x)$
A	$0,32x(1 + 0,0004x)^{-0,5}$	$0,24x(1 + 0,001x)^{-0,5}$
B	$0,32x(1 + 0,0004x)^{-0,5}$	$0,24x(1 + 0,001x)^{-0,5}$
C	$0,22x(1 + 0,0004x)^{-0,5}$	$0,20x$
D	$0,16x(1 + 0,0004x)^{-0,5}$	$0,14x(1 + 0,003x)^{-0,5}$
E	$0,11x(1 + 0,0004x)^{-0,5}$	$0,08x(1 + 0,015x)^{-0,5}$
F	$0,11x(1 + 0,0004x)^{-0,5}$	$0,08x(1 + 0,015x)^{-0,5}$

Keterangan:

A : Sangat tidak stabil

B : Tidak stabil

- C : Sedikit tidak stabil
- D : Netral
- E : Lumayan stabil
- F : Stabil

Pada Tabel 6 dan Tabel 7 diatas dibedakan berdasarkan daerah sumber emisi yaitu *rural* atau *urban* jika status pelayaran *hotelling*, tetapi jika pada saat status pelayaran *manoeuvring* dan *cruising* maka hanya menggunakan Tabel 6 (Krause et al. 2021).

Selain dapat menghitung penyebaran emisi gas buang kapal dan menentukan area sumber emisi terbanyak, yaitu dapat memprediksi pertumbuhan data jumlah emisi gas buang kapal dengan menggunakan metode ekstrapolasi (Ignasius and Lamabelawa 2019).

Ekstrapolasi adalah metode yang dipergunakan dalam memprediksi nilai dari suatu data atau fungsi yang berada di luar interval (data awal yang telah diperoleh). Untuk dapat memprediksi persamaan yang berada diluar interval maka sebelumnya perlu mengetahui atau terlebih dahulu hafal konsep dari suatu persamaan ketika hanya diberikan sebuah grafik untuk di analisis dan didapatkan suatu prediksi (pendekatan yang tepat).

Teknik ekstrapolasi menggunakan premis bahwa masa sekarang merupakan produk dari masa lampau dan masa yang akan datang tidak bisa dilepaskan keterkaitannya dengan masa sekarang. Adapun manfaat dari ekstrapolasi adalah sebagai instrumen peramalan berangkat dari pemikiran bahwa kehidupan suatu organisasi merupakan suatu kontinum atau yang berkesinambungan (Ignasius and Lamabelawa 2019).

2.6 Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU)

ISPU merupakan angka tanpa satuan, digunakan untuk menggambarkan kondisi mutu udara ambien di lokasi tertentu dan didasarkan kepada dampak terhadap kesehatan manusia, nilai estetika dan makhluk hidup lainnya. Khusus untuk daerah rawan terdampak kebakaran hutan dan lahan, informasi ini dapat digunakan sebagai *early warning system* atau sistem peringatan dini bagi masyarakat sekitar. Tujuan disusunnya ISPU agar memberikan kemudahan dari

keseragaman informasi mutu udara ambien kepada masyarakat di lokasi dan waktu tertentu serta sebagai bahan pertimbangan dalam melakukan upaya-upaya pengendalian pencemaran udara baik bagi pemerintah pusat maupun pemerintah daerah.

Pada tahun 2020, KLHK telah mengeluarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan nomor 14 tahun 2020 tentang Indeks Standar Pencemar Udara yang merupakan pengganti dari Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 41 tahun 1999 tentang Perhitungan dan Pelaporan serta Informasi Indeks Standar Pencemar Udara. Hasil dari pengukuran konsentrasi polutan pada Tabel 8 dibawah ini.

Tabel 8. Hasil Pengukuran Nilai Konsentrasi Polutan

ISPU	Nilai Konsentrasi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				
	NO ₂	SO ₂	PM _{2,5}	PM ₁₀	CO
0-50	80	52	15,5	50	4000
51-100	200	180	55,4	150	8000
101-200	1130	400	150,4	350	15000
201-300	2260	800	250,4	420	30000
>300	3000	1200	500	500	45000

Tabel 9. Kategori Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU)

Rentang	Kategori	Penjelasan
0-50	Baik	Tingkat mutu udara yang sangat baik, tidak memberikan efek negatif terhadap manusia, hewan, dan tumbuhan
51-100	Sedang	Tingkat mutu udara masih dapat diterima pada kesehatan manusia, hewan, dan tumbuhan
101-200	Tidak Sehat	Tingkat mutu udara yang bersifat merugikan pada manusia, hewan, dan tumbuhan
201-300	Sangat Tidak Sehat	Tingkat mutu udara yang dapat meningkatkan resiko kesehatan pada sejumlah segmen populasi yang terpapar
>300	Berbahaya	Tingkat mutu udara yang dapat merugikan kesehatan serius pada populasi dan perlu penanganan cepat

Perhitungan Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU) dilakukan dengan metode interpolasi. Persamaan matematika perhitungan ISPU sebagai berikut:

$$I = \frac{I_a - I_b}{X_a - X_b} (X_x - X_b) + I_b \quad (7)$$

Dimana:

I : ISPU terhitung

- Ia : ISPU batas atas
Ib : ISPU batas bawah
Xa : Konsentrasi polutan batas atas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Xb : Konsentrasi polutan batas bawah ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Xx : Konsentrasi polutan terhitung ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)