



**TUGAS AKHIR - MN 184802**

**MODIFIKASI *OPEN TOP CONTAINER SHIP* 800 TEUs  
YANG DILENGKAPI *SCRUBBER* UNTUK MENGURANGI  
EMISI SO<sub>x</sub> PADA JALUR PELAYARAN SURABAYA-  
BELAWAN**

**Deni Nabil Sulthon  
NRP 0411154000046**

**Dosen Pembimbing  
Ahmad Nasirudin, S.T., M.Eng.  
Dedi Budi Purwanto, S.T., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN  
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA**



**TUGAS AKHIR - MN 184802**

**MODIFIKASI *OPEN TOP CONTAINER SHIP* 800 TEUs  
YANG DILENGKAPI *SCRUBBER* UNTUK MENGURANGI  
EMISI SO<sub>x</sub> PADA JALUR PELAYARAN SURABAYA-  
BELAWAN**

**Deni Nabil Sulthon  
NRP 0411154000046**

**Dosen Pembimbing  
Ahmad Nasirudin, S.T., M.Eng.  
Dedi Budi Purwanto, S.T., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN  
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2020**



---

**FINAL PROJECT - MN 184802**

**MODIFICATION OF 800 TEUS OPEN TOP CONTAINER  
SHIP WITH SURABAYA-BELAWAN ROUTE BY  
INSTALLING A *SCRUBBER* AS SO<sub>x</sub> EMISSION  
REDUCTION DEVICE**

**Deni Nabil Sulthon  
NRP 0411154000046**

**Supervisor  
Ahmad Nasirudin, S.T., M.Eng.  
Dedi Budi Purwanto, S.T., M.T.**

**DEPARTMENT OF NAVAL ARCHITECTURE  
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2020**

## LEMBAR PENGESAHAN

# **MODIFIKASI *OPEN TOP CONTAINER SHIP* 800 TEUs YANG DILENGKAPI *SCRUBBER* UNTUK MENGURANGI EMISI SO<sub>x</sub> PADA JALUR PELAYARAN SURABAYA- BELAWAN**

## TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Sarjana Departemen Teknik Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**DENI NABIL SULTHON**  
NRP 0411154000046

Disetujui oleh:

Dosen Pembimbing II

Dosen Pembimbing I

Dedi Budi Purwanto, S.T., M.T.  
NIP 19820320 201012 1 002

Ahmad nasirudin, S.T., M.Eng.  
NIP 19761029 200212 1 003

Mengetahui,  
Kepala Departemen Teknik Perkapalan

Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc., Ph.D.  
NIP 19640210 198903 1 001

SURABAYA, 04 Agustus 2020



# LEMBAR REVISI

## **MODIFIKASI *OPEN TOP CONTAINER SHIP* 800 TEUs YANG DILENGKAPI *SCRUBBER* UNTUK MENGURANGI EMISI SO<sub>x</sub> PADA JALUR PELAYARAN SURABAYA- BELAWAN**

### **TUGAS AKHIR**

Telah direvisi sesuai dengan hasil Ujian Tugas Akhir  
Tanggal 21 Juli 2020

Program Sarjana Departemen Teknik Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**DENI NABIL SULTHON**

NRP 0411154000046

Disetujui oleh Tim Penguji Ujian Tugas Akhir:

1. Dr. Eng. Yuda Apri Hermawan, S.T., M.T. ....

2. Ir. Hesty Anita Kurniawati, M.Sc. ....

3. Danu Utama, S.T., M.T. ....



Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

1. Ahmad Nasirudin, S.T., M.Eng. ....

2. Dedi Budi Purwanto, S.T., M.T. ....

SURABAYA, 04 Agustus 2020

## **HALAMAN PERUNTUKAN**

Dipersembahkan kepada kedua orang tua atas segala dukungan dan doanya

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas karunianya Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.

Pada kesempatan ini Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang membantu penyelesaian Tugas Akhir ini, yaitu:

1. Bapak Ahmad Nasirudin, S.T., M.Eng. dan Bapak Dedi Budi Purwanto, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing atas bimbingan dan motivasinya selama pengerjaan dan penyusunan Tugas Akhir ini;
2. Bapak Dr. Eng. Yuda Apri Hermawan, S.T., M.T., Ibu Ir. Hesty Anita Kurniawati, M.Sc dan Bapak Danu Utama, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji yang telah memberikan kritik dan sarannya untuk perbaikan Laporan Tugas Akhir ini;
3. Bapak Hasanudin, S.T., M.T. selaku Kepala Laboratorium Desain Kapal Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS atas bantuannya selama pengerjaan Tugas Akhir ini dan atas ijin pemakaian fasilitas laboratorium;
4. MERATUS LINE atas bantuan data yang diberikan kepada Penulis sehingga Penulis dapat mengerjakan Tugas Akhir ini dengan baik;
5. Kedua orang tua Penulis, Bapak Imam Cahyanto dan Ibu Indrati, yang selalu mendoakan dan memberikan dukungan baik materiil maupun spiritual kepada Penulis;
6. Istri penulis Icha Rachmalia yang selalu memberikan dukungan, doa, serta semangat guna menyelesaikan Tugas Akhir;
7. Teman-teman seperjuangan bimbingan Tugas Akhir Penulis, yaitu Dede, Luthfi, Mas Aji, Qayyim, Dinda, Iqbal yang selalu kooperatif selama bimbingan Tugas Akhir;
8. SEMUT yang selalu memberikan masukan, dukungan serta motivasi;
9. Teman-teman P55 Samudra Raksa yang selalu memberikan bantuan kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, sehingga kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan. Akhir kata semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi banyak pihak.

Surabaya, 04 Agustus 2020

Deni Nabil Sulthon

# **MODIFIKASI *OPEN TOP CONTAINER SHIP* 800 TEUs YANG DILENGKAPI *SCRUBBER* UNTUK MENGURANGI EMISI SO<sub>x</sub> PADA JALUR PELAYARAN SURABAYA-BELAWAN**

Nama Mahasiswa : Deni Nabil Sulthon  
NRP : 04111540000046  
Departemen / Fakultas : Teknik Perkapalan / Teknologi Kelautan  
Dosen Pembimbing : 1. Ahmad Nasirudin, S.T., M.Eng.  
2. Dedi Budi Purwanto, S.T., M.T.

## **ABSTRAK**

Pencemaran lingkungan oleh gas-gas sulfur oksida dari bahan bakar kapal mengakibatkan kerusakan lingkungan yang semakin luas, maka dibuatlah peraturan MARPOL Annex VI Reg. 14 yang bertujuan untuk mengatur kandungan sulfur pada seluruh bahan bakar yang digunakan di atas kapal yang tidak boleh melebihi 0,1% untuk daerah ECA (*Emission Control Area*) dan 0,5% untuk daerah non-ECA terhitung mulai 1 Januari 2020. Oleh karena itu terdapat beberapa macam metode untuk mengurangi emisi SO<sub>x</sub>, salah satunya adalah dengan penambahan *scrubber* pada kapal di mana berdasarkan data dari DNV banyak kapal yang cenderung sesuai pada penggunaan *scrubber*. *Scrubber* dapat mengurangi emisi SO<sub>x</sub> tanpa mengganti bahan bakar konvensional yang memiliki kadar emisi SO<sub>x</sub> tinggi pada kapal di Indonesia, salah satunya kapal *Open top container ship* 800 TEUS yang melayani rute pelayaran Surabaya-Belawan. Penambahan *Scrubber* pada kapal diawali dengan mengetahui data-data pada kapal guna menentukan ukuran, jenis dan tata letak *scrubber*, data tersebut seperti kapasitas mesin induk dan *layout* kamar mesin. Untuk mesin induk 3,99 MW dan jalur pelayaran Surabaya-Belawan didapatkan *scrubber* dengan sistem *close-loop* dan berat 25 ton. Setelah diketahui ukuran, jenis, dan tata letak dari *scrubber* dilanjutkan dengan perhitungan teknis yang meliputi perhitungan berat, *freeboard*, dan *trim*. Perhitungan ekonomis yang tepat perlu dilakukan untuk menghindari kerugian akibat investasi perlengkapan *scrubber unit* dan dilakukan perbandingan antara penggunaan *scrubber* dengan LSHFO (*Low Sulphur Heavy Fuel Oil*) yang bertujuan untuk mengetahui manakan yang lebih ekonomis dari keduanya. Hasil dari perhitungan tersebut didapatkan bahwa perbandingan antar *scrubber*+HFO dengan LSHFO adalah Rp 3,385,666,694 pertahun. Di mana jika dihitung hingga batas sisa lifetime kapal yaitu 28 tahun maka didapatkan perbandingan Rp 94,798,667,443. sehingga didapat kesimpulan bahwa *scrubber* dengan sistem *close-loop* sesuai untuk kapal *open top container ship* 800 TEUs di mana tidak banyak mempengaruhi pada perubahan berat serta biaya bahan bakar penggunaan HFO yang ditambah *scrubber* lebih murah daripada LSHFO.

Kata kunci: IMO, SO<sub>x</sub>, *Scrubber*, Pencemaran, Emisi, *Container*.



# **MODIFICATION OF 800 TEUS OPEN TOP CONTAINER SHIP WITH SURABAYA-BELAWAN ROUTE BY INSTALLING A SCRUBBER AS SO<sub>x</sub> EMISSION REDUCTION DEVICE**

Author : Deni Nabil Sulthon  
Student Number : 0411154000046  
Department / Faculty : Naval Architecture / Marine Technology  
Supervisor : 1. Ahmad Nasirudin, S.T., M.Eng.  
2. Dedi Budi Purwanto, S.T., M.T.

## **ABSTRACT**

Environmental pollution by sulfur oxide gases from shipbuilders causes widespread environmental damage, so MARPOL Annex VI Regulations 14 are made which aims to regulate the sulfur content of all fuels used on board which must not exceed 0.1% for the ECA (Emission Control Area) and 0.5% for non-ECA areas as of 1 January 2020. Therefore there are several methods to reduce SO<sub>x</sub> emissions, one of which is the addition of scrubbers to ships where based on data from DNV many vessels tend to be suitable for scrubber use. Scrubbers can reduce SO<sub>x</sub> emissions without replacing conventional fuels that have high SO<sub>x</sub> emission levels on ships in Indonesia, one of which is the Open top container ship 800 TEUS that serves the Surabaya-Belawan shipping route. The addition of the Scrubber on the ship begins with knowing the data on the ship to determine the size, type and layout of the scrubber, such data as the capacity of the main engine and the engine room layout. For the 3.99 MW main engine and the Surabaya-Belawan shipping line, a scrubber with a close-loop system weighs 25 tons. After knowing the size, type, and layout of the scrubber continued with technical calculations which include weight calculation, freeboard, and trim. An accurate economic calculation needs to be done to avoid losses due to investment in scrubber unit equipment and a comparison between the use of scrubbers and LSHFO (Low Sulfur Heavy Fuel Oil) aims to find out which is more economical for both. The results of these calculations show that the comparison between scrubber + HFO with LSHFO is Rp Rp 3,385,666,694 per year. Where if calculated up to the remaining lifetime limit of the ship is 28 years, a comparison of Rp 94,798,667,443 is obtained. So it was concluded that scrubber with a loop-appropriate system is suitable for open vessels on 800 TEU container ships which is no more dependent on major changes and the cost of fuel using HFO plus scrubber is cheaper than LSHFO.

Keywords: IMO, SO<sub>x</sub>, Scrubber, Pollution, Emission, Container.

## DAFTAR ISI

1.1. Latar Belakang Masalah .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	3
1.3. Tujuan .....	3
1.4. Batasan Masalah .....	4
1.5. Manfaat .....	4
1.6. Hipotesis .....	4
2.1. Dasar Teori .....	5
2.1.1. Modifikasi Kapal .....	5
2.1.2. Pengertian Kapal .....	5
2.1.3. Kapal Kontainer/ Peti Kemas .....	7
2.1.4. Open Top Container Ship .....	10
2.1.5. Berat Kapal dan Titik Berat .....	10
2.1.6. <i>Freeboard</i> .....	11
2.1.7. <i>Trim</i> .....	11
2.1.8. Stabilitas .....	11
2.2. Tinjauan Pustaka .....	14
2.2.1. <i>Scrubber</i> .....	14
2.2.2. Macam-Macam <i>Scrubber</i> .....	14
3.1. Bagan Alir .....	19
3.2. Identifikasi dan Perumusan Masalah .....	20
3.3. Pengumpulan Data dan Studi Literatur .....	20
3.4. Menentukan Ukuran, Jenis dan Tata Letak <i>Scrubber</i> .....	20
3.5. Perhitungan Teknis .....	21
3.6. Desain 3D Kamar Mesin .....	21
3.7. Analisis Ekonimis .....	21
4.1. Menentukan Jenis, Ukuran dan Tata Letak <i>Scrubber</i> .....	23
4.1.1. Menentukan Sistem <i>Scrubber</i> .....	23
4.1.2. Menentukan Ukuran <i>Scrubber</i> .....	26
4.1.3. Menentukan Tata Letak <i>Scrubber</i> .....	28
4.2. Perhitungan Teknis .....	29
4.2.1. Perhitungan Total LWT dan DWT .....	29
4.2.2. Perhitungan <i>Trim</i> .....	32
4.2.3. Perhitungan <i>Freeboard</i> .....	33
4.3. Gambar 3D Kamar Mesin .....	33
5.1. Perhitungan Biaya Penggunaan <i>Scrubber</i> .....	37
5.1.1. Biaya Investasi .....	37
5.1.2. Penghitungan Biaya Bahan Bakar .....	38
5.1.3. Biaya Operasional .....	39
5.1.4. Total <i>Cost</i> HFO dengan <i>Scrubber</i> .....	40
5.1.5. <i>Scrubber</i> Saving .....	40
5.2. Total Perbandingan Pengeluaran LSHFO dan HFO + <i>Scrubber</i> .....	41
6.1. Kesimpulan .....	43
6.2. Saran .....	43

LAMPIRAN

LAMPIRAN A Layout kamar mesin yang telah dilengkapi *scrubber*

LAMPIRAN B Perhitungan Teknis

LAMPIRAN C Parameter *cost estimation scrubber system* (Lathinen, 2016)

LAMPIRAN D *Cost estimation closed-loop scrubber system*

LAMPIRAN E SE Ditjen Perhubungan Laut SE. 35 tahun 2019

BIODATA PENULIS

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Opsi Bahan Bakar Berdasarkan Data DNV.....	3
Gambar 2.1 <i>Full Container Ship</i> .....	8
Gambar 2.2 <i>Semi Container Ship</i> .....	8
Gambar 2.3 <i>Convertible Container Ship</i> .....	9
Gambar 2.4 Kapal Dobonsolo .....	9
Gambar 2.5 <i>Container Ship</i> dan <i>Open Top Container Ship</i> .....	10
Gambar 2.6 Ilustrasi Jenis Stabilitas Positif (stabil).....	12
Gambar 2.7 Ilustrasi Jenis Stabilitas Netral.....	12
Gambar 2.8 Ilustrasi Jenis Stabilitas Negatif (labil).....	13
Gambar 2.9 <i>Open-loop Scrubber System</i> .....	15
Gambar 2.10 <i>Closed-loop Scrubber System</i> .....	15
Gambar 2.11 <i>Hybrid Scrubber System</i> .....	16
Gambar 2.12 Desain <i>Scrubber Unit</i> Wartsila.....	18
Gambar 2.13 <i>Scrubber Unit</i> .....	18
Gambar 3.1 Bagan Alir Pengerjaan Tugas Akhir.....	20
Gambar 4.1 <i>Open-loop Scrubber System</i> .....	24
Gambar 4.2 <i>Closed-loop Scrubber System</i> .....	24
Gambar 4.3 <i>Hybrid Scrubber System</i> .....	25
Gambar 4.4 <i>Scrubber</i> yang Dipilih.....	26
Gambar 4.5 Desain <i>Scrubber Unit</i> Wartsila.....	27
Gambar 4.6 Dimensi <i>Scrubber Unit</i> .....	27
Gambar 4.7 Kamar Mesin Kapal Sebelum Dilengkapi <i>Scrubber Unit</i> .....	28
Gambar 4.8 Kamar Mesin Kapal Setelah Dilengkapi <i>Scrubber Unit</i> .....	29
Gambar 4.9 Berat Total Instalasi <i>Scrubber Unit</i> .....	30
Gambar 4.10 3D Penampang Samping Kamar Mesin Kapal .....	33
Gambar 4.11 Proses Penyaringan Gas Buang .....	34
Gambar 4.12 Kapal Tanpa Menggunakan <i>Scrubber</i> .....	34
Gambar 4.13 Alur Kerja <i>Scrubber</i> Dalam Pengolahan Gas Buang .....	35
Gambar 5.1 Diagram Perbandingan Biaya antara HFO+ <i>scrubber</i> dengan LSHFO .....	40
Gambar 5.2 Grafik Perbandingan HFO+ <i>Scrubber</i> dengan LSHFO.....	41

## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Negara-negara yang Meratifikasi MARPOL Annex VI.....	1
Tabel 2.1 Kategori Ukuran Kapal Kontainer.....	7
Tabel 2.2 Keterbatasan Operasi Sistem <i>Scrubber</i> .....	16
Tabel 2.3 Komponen <i>Scrubber System</i> .....	17
Tabel 2.4 Ukuran <i>Scrubber</i> .....	17
Tabel 4.1 Daftar Ukuran <i>Scrubber</i> yang Terdapat di Pasaran.....	26
Tabel 4.2 Komponen <i>Scrubber System</i> .....	28
Tabel 4.3 Estimasi Total Berat .....	31
Tabel 4.4 Perhitungan <i>Trim</i> .....	32
Tabel 4.5 Perbandingan <i>Freeboard</i> .....	33
Tabel 5.1 Biaya Investasi <i>Scrubber</i> .....	37
Tabel 5.2 Perhitungan Estimasi Biaya Bahan Bakar HFO dan LSHFO .....	38
Tabel 5.3 Perhitungan <i>Operational Cost Scrubber</i> .....	39
Tabel 5.4 <i>Total Cost</i> HFO dan <i>Scrubber</i> .....	40
Tabel 5.5 Perbandingan antara Penggunaan <i>Scrubber</i> dan LSHFO.....	40
Tabel 5.6 Perbandingan Pengeluaran LSHFO dengan HFO + <i>Scrubber</i> .....	41

## DAFTAR SIMBOL

L	= Panjang kapal (m)
Lwl	= <i>Length of Water Line</i> (m)
LoA	= <i>Length Over All</i> (m)
Lpp	= <i>Length Between Perpendicular</i> (m)
B	= Lebar kapal (m)
H	= Tinggi kapal (m)
T	= Sarat kapal (m)
$\Delta$	= <i>Displacement</i> (ton)
$\nabla$	= <i>Volume displacement</i> kapal (m <sup>3</sup> )
BHP	= <i>Brake horse power</i> (hp)
Cb	= Koefisien blok
Cl	= Koefisien gaya angkat
$\tau$	= Sudut <i>trim</i>
$\beta$	= Sudut <i>deadrise</i>
$\lambda$	= Perbandingan panjang dan lebar permukaan basah
$\nu$	= Viskositas fluida
K	= Koefisien perbandingan geometris ukuran utama
CD	= Koefisien <i>Displacement</i>
Cf	= Koefisien hambatan gesek
Cm	= Koefisien <i>midship</i>
Cp	= Koefisien prismatic
Cv	= Koefisien kecepatan
Cwp	= Koefisien <i>water plane</i>
DHP	= <i>Delivered horse power</i> (hp)
SHP	= <i>Shaft horse power</i> (hp)
DWT	= <i>Dead weight tonnage</i> (ton)
EHP	= <i>Effectif horse power</i> (hp)
Fn	= <i>Froud number</i>
g	= Percepatan gravitasi (m/s <sup>2</sup> )
LCB	= <i>Longitudinal center of bouyancy</i> (m)
LCG	= <i>Longitudinal center of gravity</i> (m)
KB	= <i>Kell to Bouyancy</i>
LWT	= <i>Light weight tonnage</i> (ton)
Rn	= <i>Reynolds number</i>
Rt	= Hambatan total kapal (N)
VCG	= <i>Vertical center of gravity</i> (m)
Vmax	= Kecepatan maksimal kapal (knot)
Vs	= Kecepatan dinas kapal (knot)
kW	= Kilo watt
MW	= Mega watt
$\rho$	= Massa jenis (kg/m <sup>3</sup> )
MSI	= <i>Motion Sickness Incidence</i> (%)



# BAB 1 PENDAHULUAN

## 1.1. Latar Belakang Masalah

Berdasarkan MARPOL Annex VI Reg. 14, kandungan sulfur pada seluruh bahan bakar yang digunakan di atas kapal tidak boleh melebihi 0,1% untuk daerah ECA (*Emission Control Area*) yang meliputi wilayah Laut Baltik, Laut Utara, Laut Amerika Utara, dan Laut Karibia Amerika Serikat dan 0,5% untuk daerah non-ECA (Indonesia termasuk daerah non-ECA) terhitung mulai 1 Januari 2020. Per 16 November 2018, terhitung ada 91 negara yang merepresentasikan 96.62% dari total tonase dunia yang telah meratifikasi regulasi tersebut. Regulasi tersebut sudah “*entry into force*” sejak 1 Juli 2010 sehingga wajib ditaati oleh seluruh kapal yang melakukan pelayaran melalui daerah-daerah yang telah meratifikasi MARPOL Annex VI.

Tabel 1.1 Negara-negara yang Meratifikasi MARPOL Annex VI  
(Sumber: [www.imo.org](http://www.imo.org))

Antigua & Barbuda	Iran (Islamic Republic of)	Republic of Korea
Australia	Ireland	Romania
Azerbaijan	Italy	Russian Federation
Bahamas	Jamaica	Saint Kitts and Nevis
Bangladesh	Japan	Saint Lucia
Barbados	Jordan	St. Vincent & Grenadines
Belgium	Kenya	Samoa
Belize	Kiribati	Saudi Arabia
Benin	Kuwait	Serbia
Brazil	Latvia	Sierra Leone
Bulgaria	Liberia	Singapore
Canada	Lithuania	Slovakia
Chile	Luxembourg	Slovenia
China	Malaysia	South Africa
Congo	Malta	Spain
Cook Islands	Marshall Islands	Sweden
Croatia	Monaco	Switzerland
Cyprus	Mongolia	Syrian Arab Republic
Czechia	Montenegro	Tonga
Denmark	Morocco	Trinidad & Tobago
Estonia	Netherlands	Tunisia
Finland	Nigeria	Turkey
France	Niue	Turkmenistan
Germany	Norway	Tuvalu
Ghana	Palau	Ukraine
Greece	Panama	United Kingdom
Guatemala	Peru	United States
Honduras	Philippines	Uruguay
Iceland	Poland	Vanuatu
India	Portugal	Viet Nam
Indonesia		



Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk menyesuaikan kapal-kapal, baik bangunan baru atau kapal yang eksisting, dengan regulasi terkait SOx. Metode-metode tersebut yaitu sebagai berikut.

1. Penggunaan bahan bakar sulfur rendah atau *Low Sulfur Heavy Fuel Oil* (LSHFO) memiliki keuntungan yaitu kandungan sulfur  $\leq 0,5\%$ , tidak memerlukan peralatan tambahan dan berat dan volume kapal tetap karena tidak ada peralatan tambahan. Serta memiliki kekurangan yaitu harga bahan bakar mahal ( $\geq 500$  EUR), perlu modifikasi peralatan pembakaran, keselamatan bahan bakar masih dalam penelitian (titik didih, kualitas pembakaran, dll), ketersediaan LSHFO yang langka, ketidaksesuaian bahan bakar campuran, dan menyebabkan abrasi yang cukup parah.
2. Penggunaan bahan bakar alternatif seperti *Liquefied Natural Gas* (LNG) memiliki keuntungan yaitu, tidak ada emisi sulfur, harga bahan bakar lebih kompetitif. Serta memiliki kekurangan yaitu memerlukan penggantian mesin, memerlukan sistem penjagaan suhu tangki LNG ( $< -162^{\circ}\text{C}$ ), dan memerlukan tangki bahan bakar yang lebih besar karena massa jenisnya yang lebih kecil (2,5 kali).
3. Penggunaan teknologi reduksi SOx seperti *scrubber* memiliki keuntungan yaitu, hasil emisi SOx gas buang  $< 0,5\%$ , tidak memerlukan penggantian bahan bakar harga bahan bakar yang jauh lebih murah dibandingkan LSHFO ( $\pm 350$  EUR). Serta kekurangan yaitu membutuhkan alokasi ruangan untuk *scrubber*, peningkatan berat dan pengurangan volume muatan sehingga mengurangi efisiensi kapal, terbatasnya manufaktur *scrubber* sehingga pemasangannya membutuhkan waktu tunggu hingga 2 tahun, kurangnya data pemakaian *scrubber* pada industri perkapalan, aturan pembatasan regional terkait pengeluaran air buangan, keterbatasan operasi *scrubber* pada wilayah tertentu.

Survey yang dilakukan oleh Lloyd Register pada tahun 2012 terkait pemilihan metode penyesuaian regulasi emisi SOx menghasilkan hasil sebagai berikut.

- Penggunaan LSHFO dipandang sebagai opsi jangka pendek untuk menyesuaikan dengan regulasi emisi SOx.
- Penggunaan *scrubber* dipandang sebagai opsi jangka menengah.

- Penggunaan LNG dipandang sebagai opsi jangka menengah dan jangka panjang (Boer & Hoen, 2015).

Berdasarkan data yang dipublikasikan oleh DNV, *scrubber* menjadi opsi yang paling mungkin untuk kapal saat ini dengan kemungkinan 4014 kapal yang memakai *scrubber*.



Gambar 1.1 Opsi Bahan Bakar Berdasarkan Data DNV  
(sumber: DNV, 2019)

## 1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah di atas permasalahan yang akan dibahas pada Tugas Akhir ini adalah:

1. Bagaimana Menentukan ukuran, jenis, dan tata letak *scrubber unit* pada kapal kontainer?
2. Bagaimana melakukan analisis teknis pada kapal kontainer yang telah dilengkapi *scrubber*?
3. Bagaimana membuat desain 3D pada kamar mesin kapal kontainer yang telah dilengkapi *scrubber*?
4. Bagaimana analisis ekonomis pada kapal kontainer yang telah dilengkapi *scrubber*?

## 1.3. Tujuan

Tujuan dari penulisan Tugas Akhir ini adalah:

1. Menentukan Ukuran, jenis, dan tata letak *scrubber unit* pada kapal kontainer.
2. Melakukan analisis teknis pada kapal kontainer yang telah dilengkapi *scrubber*.
3. Membuat desain 3D pada kamar mesin kapal kontainer yang telah dilengkapi *scrubber*.

4. Melakukan analisis ekonomis pada kapal kontainer yang telah dilengkapi *scrubber*.

**1.4. Batasan Masalah**

Batasan masalah pada penulisan Tugas Akhir ini adalah perbandingan ekonomis dilakukan antara penggunaan *scrubber* dengan LSHFO.

**1.5. Manfaat**

Dari Tugas Akhir ini, diharapkan dapat diambil manfaat yaitu Sebagai opsi alternatif bagi pemilik kapal guna memenuhi standar kriteria MARPOL Annex VI Reg. 14 pada kapal *existing*.

**1.6. Hipotesis**

Penambahan *scrubber* pada kapal memiliki guna untuk memenuhi standar kriteria MARPOL Annex VI Reg. 14 yaitu mengenai pengurangan emisi SO<sub>x</sub> pada kandungan sulfur bahan bakar yang digunakan di atas kapal yang diterapkan per tanggal 1 januari 2020. Di mana penambahan *scrubber* dinilai lebih ekonomis daripada penggunaan LSFO (low sulphur fuel oil).

## **BAB 2**

### **STUDI LITERATUR**

#### **2.1. Dasar Teori**

##### **2.1.1. Modifikasi Kapal**

Modifikasi kapal adalah perubahan pada kapal yang mempengaruhi ukuran utama, berat, dan beberapa hal yang mempengaruhi pengoperasian pada kapal. Modifikasi kapal memiliki aturan tersendiri yang telah diatur oleh regulasi-regulasi yang berlaku. Bagian-bagian tertentu pada regulasi berisi referensi singkat untuk peraturan yang mungkin memiliki konsekuensi besar untuk konversi atau perubahan. Perlu diperhatikan bahwa persyaratan tertentu, misalnya SOLAS dan MARPOL, dapat dikaitkan dengan tanggal penandatanganan kontrak antara galangan kapal dan pemilik, atau tanggal dimulainya konversi atau penyelesaian. Selanjutnya, dalam hal modifikasi didefinisikan sebagai "Konversi Besar" oleh SOLAS atau MARPOL. Undang-undang baru persyaratan mungkin harus dipenuhi, misalnya persyaratan untuk menggandakan ketinggian bawah, posisi bahan bakar, tangki minyak, alat *safety*, stabilitas kerusakan, emisi NOx dll. Demikian pula, konversi yang mengubah keterangan tonase atau bobot mati dapat menyiratkan bahwa kapal harus mematuhi persyaratan baru. Itu perlu dicatat bahwa pemanjangan kapal dapat menghasilkan persyaratan baru. Misalnya meningkatkan panjang garis beban dari di bawah 85 m hingga di atas 85 m akan memicu persyaratan sekoci.

##### **2.1.2. Pengertian Kapal**

Kapal adalah kendaraan pengangkut penumpang dan barang di laut, sungai, dsb. Seperti halnya sampan atau perahu yang lebih kecil. Kapal biasanya cukup besar untuk membawa perahu kecil seperti sekoci. Sedangkan dalam istilah Inggris, dipisahkan antara ship yang lebih besar dan boat yang lebih kecil. Secara kebiasaannya kapal dapat membawa perahu tetapi perahu tidak dapat membawa kapal. Ukuran sebenarnya di mana sebuah Perahu disebut Kapal selalu ditetapkan oleh undang-undang dan peraturan atau kebiasaan setempat.

Berabad-abad kapal digunakan oleh manusia untuk mengarungi sungai atau lautan yang diawali oleh penemuan perahu. Biasanya manusia pada masa lampau menggunakan kano, rakit ataupun perahu, semakin besar kebutuhan akan daya muat maka

dibuatlah perahu atau rakit yang berukuran lebih besar yang dinamakan kapal. Bahan-bahan yang digunakan untuk pembuatan kapal pada masa lampau menggunakan kayu, bambu ataupun batang-batang papyrus seperti yang digunakan bangsa mesir kuno kemudian digunakan bahan-bahan logam seperti besi/baja karena kebutuhan manusia akan kapal yang kuat. Untuk penggerakannya manusia pada awalnya menggunakan dayung kemudian angin dengan bantuan layar, mesin uap setelah muncul revolusi Industri dan mesin diesel serta Nuklir. Beberapa penelitian memunculkan kapal bermesin yang berjalan mengambang di atas air seperti Hovercraft dan Ekranoplane. Serta kapal yang digunakan di dasar lautan yakni kapal selam.

Berabad abad kapal digunakan untuk mengangkut penumpang dan barang sampai akhirnya pada awal abad ke-20 ditemukan pesawat terbang yang mampu mengangkut barang dan penumpang dalam waktu singkat maka kapal-pun mendapat saingan berat. Namun untuk kapal masih memiliki keunggulan yakni mampu mengangkut barang dengan tonase yang lebih besar sehingga lebih banyak didominasi kapal niaga dan tanker sedangkan kapal penumpang banyak dialihkan menjadi kapal pesiar.

Kapal memiliki berbagai macam jenis yang dapat dibagi menurut beberapa kriteria seperti.

1. Berdasarkan tenaga penggerak
  - a) Kapal bertenaga manusia (Pendayung)
  - b) Kapal layar
  - c) Kapal uap
  - d) Kapal diesel atau Kapal motor
  - e) Kapal nuklir
2. Berdasarkan jenis pelayarannya
  - a) Kapal permukaan
  - b) Kapal selam
  - c) Kapal mengambang
  - d) Kapal bantalan udara
3. Berdasarkan fungsinya
  - a) Kapal Perang
  - b) Kapal penumpang
  - c) Kapal barang
  - d) Kapal tanker
  - e) Kapal feri
  - f) Kapal pemecah es
  - g) Kapal tunda
  - h) Kapal pandu
  - i) Tongkang




- j) Kapal tender
- k) Kapal Ro-Ro
- l) Kapal dingin beku
- m) Kapal keruk
- n) Kapal peti kemas / Kapal kontainer


### 2.1.3. Kapal Kontainer/ Peti Kemas

Kapal peti kemas (Inggris: containership atau cellularship) adalah kapal yang khusus digunakan untuk mengangkut peti kemas yang standar. Memiliki rongga (*cells*) untuk menyimpan peti kemas ukuran standar. Peti kemas diangkat ke atas kapal di terminal peti kemas dengan menggunakan kran/derek khusus yang dapat dilakukan dengan cepat, baik derek-derek yang berada di dermaga, maupun derek yang berada di kapal itu sendiri.

Menurut ukurannya kapal peti kemas dapat dikelompokkan atas beberapa jenis mulai dari kapal pengumpan sampai kapal post panamax yang kemudian dikembangkan lagi menjadi kapal *Ultra Large Container Vessel* yang bisa mengangkut di atas 14.501 petikemas. Berikut adalah tabel ukuran kapal kontainer/petikemas.

Tabel 2.1 Kategori Ukuran Kapal Kontainer

Kategori ukuran kapal petikemas			
Name	Capacity (TEU)	Contoh	
Ultra Large Container Vessel (ULCV)	lebih besar dari 14,501	Dengan panjang 397 m, lebar 56 m, draft 15.5 m, dan kapasitas di atas 15,000 TEU, Kapal Emma Maersk yang melampaui batas New Panamax class. (Photo: The 15,000 TEU kapal Edith Maersk.)	
New panamax	10,000–14,500	Dengan lebar 43 m, kapal COSCO Guangzhou merupakan kapal yang tidak bisa melewati kolam pemindahan kapal di terusan Panama class yang lama tetapi bisa melalui pelebaran yang baru. (Photo: The 9,500 TEU kapal COSCO Guangzhou di dermaga pelabuhan Hamburg.)	
Post panamax	5,101–10,000		
Panamax	3,001 – 5,100	Kapal dari kelas yang berada pada batas atas Panamax class, dengan panjang 292.15 m, lebar 32.2m, dan kedalaman draft 21.2 m. (Photo: The 4,224 TEU MV Providence Bay melewati terusan Panama.)	
Feedermax	2,001 – 3,000	Kapal peti kemas sampai dengan 3,000 TEU biasanya disebut sebagai kapal pengumpan, dan biasanya dilengkapi dengan kran.	
Feeder	1,001 – 2,000		

Small feeder	Up to 1,000	(Photo: The 384 TEU kapal TransAtlantic sedang lego jangkar)	
--------------	-------------	--	---

Selain dari segi ukurannya, kapal kontainer juga dibagi menurut jenis muatannya.

1. *Full Container Ship/ Cellular Ship*



Gambar 2.1 *Full Container Ship*

Mempunyai ciri - ciri dan kelengkapan khusus dan semata-mata hanya dipergunakan untuk mengangkut peti kemas dalam seluruh palka. Umumnya kapal-kapal demikian berupa Single Purpose Ship karena dianggap sebagai kapal yang paling ekonomis pada dewasa ini, menyangkut waktu bongkar muatnya yang cepat. sebab hanya mengangkut peti kemas, baik di palka maupun digeladak utamanya dengan cara menumpuk secara vertikal keatas. Pemuatan dilaksanakan dengan menurunkan peti kemas ke dalam tempat yang tersedia (berbentuk sel - sel) dalam palkah, ataupun menumpuk dalam susunan vertikal keatas pada geladak utamanya tanpa menggeser-geser lagi kearah horisontal. Proses pembongkarannya dilaksanakan sebaliknya.

2. *Partial / Semi Container Ship*



Gambar 2.2 *Semi Container Ship*

Pada jenis ini hanya sebagian ruangnya saja yang dibangun khusus untuk peti kemas, sedangkan sisanya diperuntukkan untuk konvensional *vessel*. Misalnya sebagai contoh kapal-kapal dari perusahaan Atlantic Container Line. Kapal-kapalnya direncanakan akan mengangkut peti kemas sebanyak 300 buah, disamping itu juga akan memuat muatan general cargo (konvensional) plus mobil sebanyak 1.400 buah. Dalam hal ini, Containernya diangkat secara Lo / Lo, sedang muatan mobilnya diangkat secara Do / Do (*Driven On/ Driven Off*).

### 3. *Convertible Container Ship*



Gambar 2.3 *Convertible Container Ship*

Kapal jenis ini sebagian atau seluruhnya ruang muatnya dapat digunakan baik untuk peti kemas maupun cargo biasa. Ia mempunyai bentuk yang khusus yang memungkinkan perubahan fungsinya. Untuk perubahan fungsinya, terutama atas dasar *Voyage to Voyage*.

### 4. Kapal dengan Kemampuan Angkut Peti Kemas Terbatas



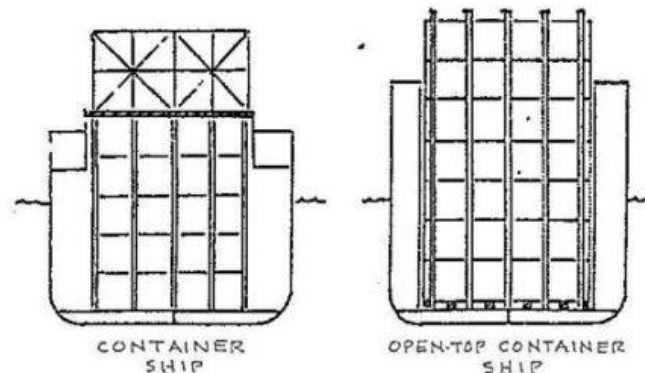
Gambar 2.4 Kapal Dobonsolo

Kapal ini dilengkapi dengan peralatan yang diperlukan bagi kapal kontainer seperti *Container Handling* dan *Securing Device*. Namun demikian kapal tersebut umumnya bangunan kapalnya seperti kapal biasa.



#### 2.1.4. Open Top Container Ship

Selain jenis kontainer yang telah disebutkan, ada juga kapal kontainer yang tidak dilengkapi oleh *hatch*/palkah di mana peti kemas disusun keatas tanpa disekat oleh palkah. Menghilangkan palkah bertujuan untuk meningkatkan *payload* kapal akibat ditiadakannya palkah. Biasanya *open top container ship* itu sendiri adalah *full container ship* tanpa palkah.



Gambar 2.5 *Container Ship* dan *Open Top Container Ship*

#### 2.1.5. Berat Kapal dan Titik Berat

Harga *displacement* kapal haruslah sama besar dengan berat total kapal. Berat total kapal terdiri dari dua komponen, yaitu *lightweight tonnage* (LWT) dan *dead weight tonnage* (DWT).

##### 1. LWT (*Lightweight Tonnage*)

LWT adalah berat kapal dalam keadaan kosong. Komponen LWT dapat dibagi menjadi tiga, yaitu: berat lambung kapal, berat *outfitting* dan akomodasi, dan berat instalansi permesinan kapal.

##### 2. DWT (*Deadweight Tonnage*)

DWT adalah berat muatan maksimum yang dapat dimuat kapal. DWT terdiri dari *payload* atau muatan bersih, *consumable* dan *crew*. *Payload* pada *rescue boat* adalah jumlah penumpang yang dapat dimuat, *consumable* terdiri dari bahan bakar (*fuel oil*), dan air tawar (*fresh water*).

##### 3. Titik Berat

Titik berat benda adalah suatu titik pada benda tersebut di mana berat dari seluruh bagian benda terpusat pada titik tersebut. Titik berat adalah salah satu hal yang krusial dalam mendesain kapal, karena akan mempengaruhi stabilitas hingga *trim* kapal. Dalam perhitungan mencari titik berat terdapat dua jenis pendekatan, yaitu pendekatan dengan formula yang didapatkan dari hasil penelitian dan pengujian, serta pendekatan

terhadap bentuk-bentuk bidang dan ruang seperti persegi, persegi panjang, segi tiga, lingkaran, trapesium, dan lain-lain.

Perhitungan jarak titik berat kapal dibagi menjadi dua macam, yaitu jarak titik berat secara memanjang (*longitudinal center of gravity / LCG*) untuk mengetahui di mana letak titik berat secara memanjang, yang pada umumnya menjadikan titik AP atau *midship* titik acuannya, dan jarak titik berat secara vertikal (*vertical center of gravity / VCG*) guna mengetahui letak titik berat secara vertikal, yang pada umumnya menjadikan dasar lunas (*keel*) sebagai titik acuan untuk mengukur VCG (Ginting, 2019). Titik berat gabungan (LCG total dan VCG total) kapal dapat dirumuskan seperti pada persamaan (II.11) dan (II.12).

$$LCG_{Tot} = \frac{(LCG_1 \times W_1) + (LCG_2 \times W_2) + (LCG_3 \times W_3) + \dots + (LCG_n \times W_n)}{(W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_n)} \quad (II.11)$$

$$VCG_{Tot} = \frac{(VCG_1 \times W_1) + (VCG_2 \times W_2) + (VCG_3 \times W_3) + \dots + (VCG_n \times W_n)}{(W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_n)} \quad (II.12)$$

#### 2.1.6. *Freeboard*

*Freeboard* atau lambung timbul adalah jarak vertikal yang diukur pada tengah kapal dari sarat air hingga sisi atas garis geladak lambung timbul. Geladak lambung timbul adalah geladak teratas yang menyeluruh dan terbuka secara langsung (*exposed deck*) terhadap cuaca dan air laut dan mempunyai cara penutupan yang tetap dan kedap cuaca untuk bukaan-bukaan di atas geladak dan kedap air untuk bukaan-bukaan dibawah geladak (Kementerian Perhubungan, 2016).

#### 2.1.7. *Trim*

*Trim* adalah kemiringan kapal secara memanjang akibat perbedaan sarat depan dan sarat belakang kapal. Terjadi sebagai akibat dari tidak meratanya momen statis dari penyebaran gaya berat. *Trim* dibedakan menjadi dua, yaitu *trim* haluan dan *trim* buritan. *Trim* haluan terjadi apabila sarat haluan lebih tinggi daripada sarat buritan. Begitu juga sebaliknya untuk *trim* buritan.

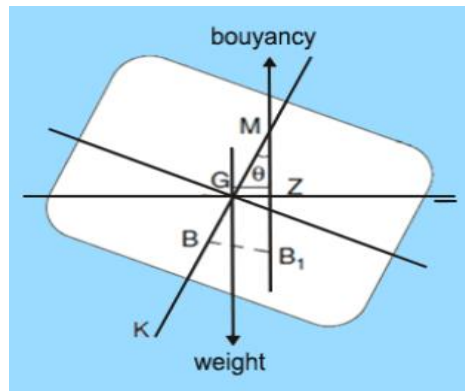
#### 2.1.8. *Stabilitas*

Stabilitas adalah kemampuan sebuah kapal untuk kembali ke kedudukan semula setelah mengalami kemiringan oleh gaya-gaya yang ditimbulkan oleh kapal itu sendiri dan gaya-gaya dari luar kapal. Kemampuan tersebut di pengaruhi oleh lengan dinamis (GZ) yang membentuk

momen kopel yang menyeimbangkan gaya tekan ke atas dengan gaya berat. Secara umum, stabilitas kapal dibedakan menjadi 3 kondisi, yaitu: stabil, netral, dan labil.

1. Stabil (stabilitas positif)

Suatu keadaan di mana titik G-nya berada di bawah titik M, sehingga sebuah kapal yang memiliki stabilitas yang baik sewaktu oleng dan memiliki kemampuan untuk menegak kembali. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar II.4.

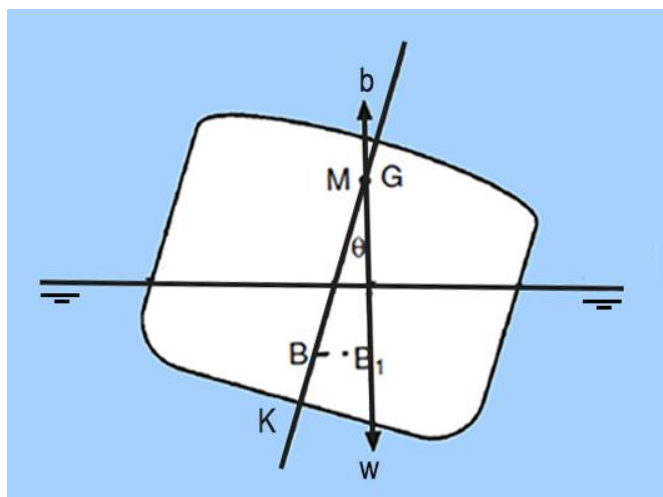


Gambar 2.6 Ilustrasi Jenis Stabilitas Positif (stabil)

(Sumber: <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/intact-stability-of-surface-ships/>, 2019)

2. Netral

Suatu keadaan stabilitas di mana titik G-nya berhimpit dengan titik M. Maka momen penegak kapal bernilai sama dengan nol, atau bahkan tidak memiliki kemampuan untuk menegak kembali sewaktu oleng. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar II.5.

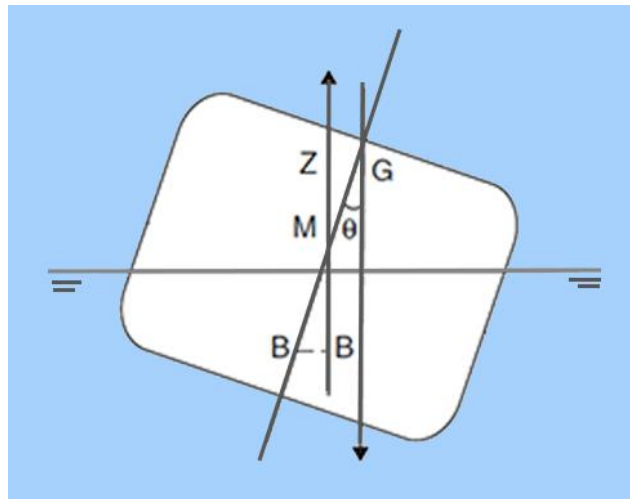


Gambar 2.7 Ilustrasi Jenis Stabilitas Netral

(Sumber: <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/intact-stability-of-surface-ships/>, 2019)

### 3. Labil (stabilitas negatif)

Suatu keadaan stabilitas di mana titik G-nya berada di atas titik M, sehingga lengan GZ bernilai negatif ketika oleng yang mengakibatkan kapal bertambah oleng. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar II.6.



Gambar 2.8 Ilustrasi Jenis Stabilitas Negatif (labil)

(Sumber: <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/intact-stability-of-surface-ships/>, 2019)

Dalam perhitungan stabilitas terdapat 6 kriteria *intact stability*. Kriteria tersebut adalah:

1. Kriteria cuaca yang terkandung dalam paragraf 3.2 dari *Intact Stability Code* harus berlaku (lihat catatan). Dalam menerapkan kriteria cuaca, nilai tekanan angin  $P$  ( $N/m^2$ ) harus diambil sebagai  $(500 \{V_w / 26\}^2)$ , di mana  $V_w$  = kecepatan angin (m/s) yang sesuai dengan kondisi yang dimaksudkan terburuk.

Catatan: Mereferensi *Code on Intact Stability* untuk semua jenis kapal yang dicakup oleh instrumen IMO, yang diadopsi oleh organisasi dengan resolusi A.749(18), sebagaimana diubah oleh resolusi MSC.75 (69).

2. Area di bawah kurva GZ harus kurang dari 0.07 m.rad hingga  $\theta_{max} = 15^0$  ketika lengan GZ maksimum terjadi pada  $\theta_{max} = 15^0$ , dan 0.055 m.rad hingga  $\theta_{max} = 30^0$  ketika lengan GZ maksimum terjadi pada  $\theta_{max} = 30^0$  atau lebih. Ketika lengan GZ maksimum terjadi diantara  $\theta = 15^0$  dan  $\theta = 30^0$ , area di bawah kurva GZ harus:

$$A = 0.055 + 0.001 (30^0 - \theta_{max}) \text{ [m.rad]}$$

3. Area di bawah kurva GZ antara  $\theta = 30^0$  dan  $\theta = 40^0$  atau antara  $\theta = 30^0$  dan sudut banjir  $\theta_F$ , jika sudut ini kurang dari  $40^0$ , tidak boleh kurang dari 0.03 m.rad.
4. Lengan GZ harus setidaknya 0.2 m pada sudut  $30^0$  atau lebih.
5. Lengan GZ maksimum harus terjadi pada sudut tidak kurang dari  $15^0$ .
6. Tinggi *initial metacentric* GMT tidak boleh kurang dari 0.15 m.

## 2.2. Tinjauan Pustaka

### 2.2.1. Scrubber

*Scrubber* merupakan salah satu alat reduksi emisi SOx yang dipasang pada kapal.

*Scrubber* umumnya terdiri dari:

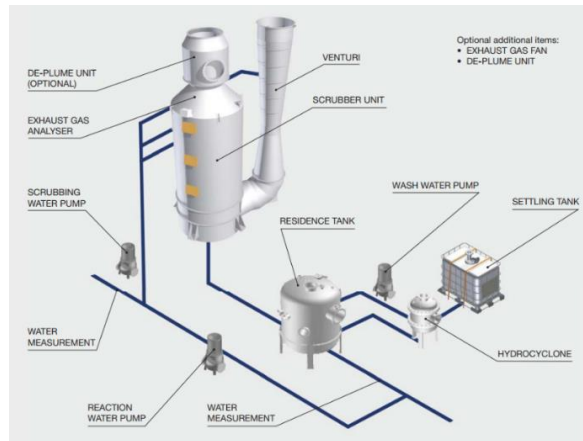
1. *Exhaust gas cleaning* (EGC) unit yang berfungsi sebagai tempat untuk pencampuran gas buang dengan air sehingga SOx akan berubah menjadi asam sulfida ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Biasanya EGC unit terletak di daerah yang tinggi di kapal seperti *funnel*
2. *Wash water treatment plant* yang berfungsi untuk membersihkan air buangan dari sisa-sisa bahan bakar
3. *Sludge handling* yang berfungsi untuk menahan kotoran yang dipisahkan oleh *wash water treatment* dan akan dibuang di pelabuhan (Boer & Hoen, 2015).

### 2.2.2. Macam-Macam Scrubber

Berdasarkan sistemnya *scrubber* dapat dibagi menjadi tiga yaitu sebagai berikut.

#### a. Open-loop system

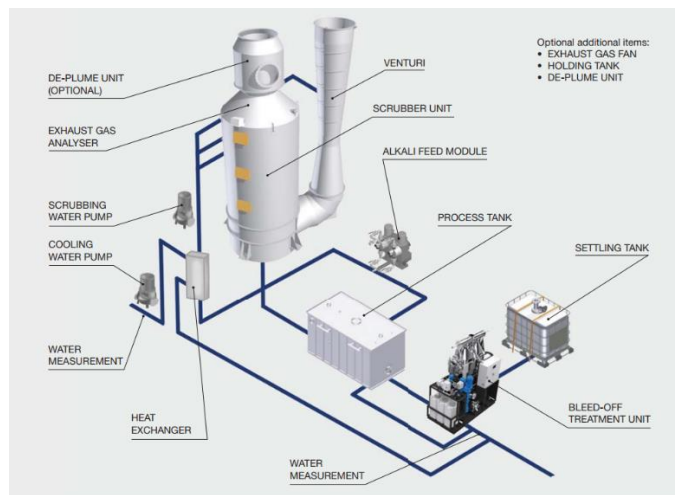
*Open-loop system* menggunakan air laut untuk menghilangkan SOx dari gas buang. Gas buang masuk ke dalam *scrubber* dan disemprotkan air laut dengan tiga tahap. Oksida sulfur pada gas buang bereaksi dengan air dan membentuk asam sulfida ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Air laut yang bersifat basa secara alami menetralisasi keasaman dari asam sulfida yang terbentuk sehingga pH dari air buangan tetap terjaga. Air buangan dari *scrubber* diberikan perlakuan dan diawasi pada *inlet* dan *outlet* untuk memastikan kesesuaian buangan dengan MEPC 184(59) kriteria buangan. Dengan demikian, sisa buangan tersebut dapat dibuang ke laut tanpa menimbulkan resiko terhadap lingkungan.



Gambar 2.9 *Open-loop Scrubber System*  
(Sumber: Wartsila, 2018)

b. *Closed-loop system*

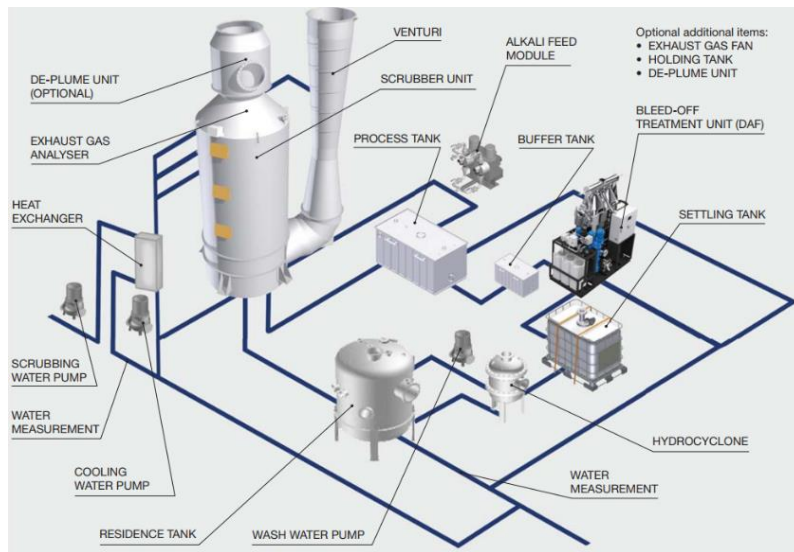
*Closed-loop system* bekerja dengan menggunakan sistem kontinu yang tertutup sehingga tidak perlu khawatir akan tingkat kebasahan dari air laut. Sistem ini sangat cocok untuk kapal-kapal yang beroperasi di daerah yang memiliki air dengan tingkat kebasahan rendah seperti sungai. Dalam *closed-loop scrubber system*, gas buang masuk ke *scrubber* dan disemprotkan dengan air yang telah dicampur dengan basa natrium (NaOH). Oksida sulfur yang terdapat pada gas buang bereaksi dengan campuran tersebut dan ternetralisir sehingga pH nya tetap terjaga. Sisa buangan diekstraksi dari sistem *closed - loop* dan diberikan perlakuan agar memenuhi persyaratan IMO. Buangan yang telah dibersihkan dapat dibuang ke laut dengan aman tanpa menimbulkan bahaya terhadap lingkungan atau dapat disimpan di tangki penyimpanan sementara untuk pembuangan berkala.



Gambar 2.10 *Closed-loop Scrubber System*  
(Sumber: Wartsila, 2018)

c. *Hybrid system*

*Hybrid system* memberikan fleksibilitas dalam operasi baik *open-loop* dan *closed-loop*. Hal ini berarti kapal yang menggunakan sistem *hybrid* dapat beroperasi baik di perairan dengan tingkat kebasaaan rendah maupun di laut terbuka yang memiliki kebasaaan tinggi. Pendekatan *hybrid* dapat memberikan keleluasaan operasi pada mode *closed-loop* saat dibutuhkan seperti ketika sedang berlabuh dengan menggunakan basa natrium (NaOH) sebagai *buffer* atau operasi pada mode *open-loop* pada saat di laut terbuka.



Gambar 2.11 *Hybrid Scrubber System*  
(Sumber: Wartsila, 2018)

Tiap sistem memiliki cara kerja yang berbeda. Sistem *open loop* membutuhkan air laut untuk menghilangkan kandungan SO<sub>x</sub> berlebih pada gas buang. Sistem *closed loop* membutuhkan air tawar yang dicampurkan dengan larutan basa natrium (NaOH) untuk menghilangkan kandungan SO<sub>x</sub> berlebih pada gas buang. Sistem *hybrid* dapat menggunakan dua sistem kerja *open-loop* dan *closed-loop*. Sistem *open-loop* efektif digunakan pada kapal-kapal *ocean-going*, *closed-loop* efektif digunakan pada kapal-kapal di sungai atau air payau, dan sistem *hybrid* efektif beroperasi di laut lepas ataupun di sungai atau air payau.

Tabel 2.2 Keterbatasan Operasi Sistem *Scrubber*  
(Sumber: Korean Register of Shipping)

	Open loop	Closed loop	Hybrid
Dependable on seawater alkalinity	Yes	No	Partly
Alkaline reactant	Seawater	NaOH	NaOH / Seawater
Zero discharge possible	No	Yes	Partly
Applications	Ocean-going ships	Low-alkalinity waters And for zero discharge	Areas requiring full flexibility of operations

Pertimbangan keterbatasan operasi tiap sistem dapat menjadi dasar dalam pemilihan. Selain itu, regulasi lokal negara-negara tertentu juga dapat dijadikan dasar dalam pemilihan *scrubber* yang tepat. Data rute operasi kapal dibutuhkan untuk memilih *scrubber system* berdasarkan pertimbangan keterbatasan operasi.

*Scrubber unit* dan perlengkapannya memiliki dimensi tertentu yang harus dicocokkan ukurannya dengan ruang yang tersedia pada kapal. Berdasarkan katalog SOx *Scrubber* dari Wartsila, terdapat beberapa komponen yang harus dipasang dalam pemasangan *scrubber* yang dijelaskan dalam tabel berikut.

Tabel 2.3 Komponen *Scrubber System*  
(Sumber: Wartsila, 2018)

Komponen	<i>Open-loop</i>	<i>Closed-loop</i>	<i>Hybrid</i>
<i>Scrubber unit</i>	√	√	√
<i>Seawater pump</i>	√	√	√
<i>Heat exchanger</i>	√	√	√
<i>Alkali feed module pump</i>		√	√
<i>Buffer tank</i>		√	√
<i>Water treatment unit</i>	√	√	√
<i>Water pump module</i>		√	√
<i>Sludge tank</i>		√	√
<i>Hydroclone</i>	√		√
<i>Water monitoring unit</i>	√		√

Pemilihan ukuran *Scrubber unit* dapat ditentukan dari kapasitas mesin induk kapal, berikut adalah tabel ukuran *scrubber unit*.

Tabel 2.4 Ukuran *Scrubber*  
(Sumber: Wartsila, 2018)

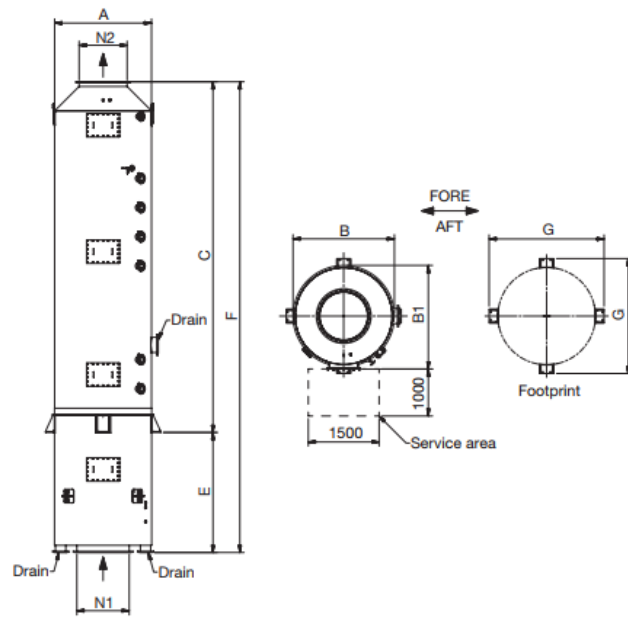
**WEIGHTS & DIMENSIONS - STANDARD I-SOX SCRUBBER SIZES**

Dim.	Description (Diameter A)	Ø850	Ø1050	Ø1250	Ø1450	Ø1650	Ø1850	Ø2050	Ø2250	Ø2450	Ø2650	Ø2850	Ø3050	Ø3250
	MW	1.2	1.9	2.7	3.6	4.7	5.9	7.2	8.7	10.3	12.0	13.9	15.9	18.1
	Gas flow (kg/S)	2.7	4.1	5.8	7.7	10.0	12.6	15.5	18.6	22.1	25.9	29.9	34.3	38.9
F	Total height (mm)	8,100	8,300	8,500	8,800	9,200	10,000	10,000	10,500	11,000	11,500	11,500	12,500	13,500
B	Overall length (mm)	950	1,150	1,350	1,550	1,750	1,950	2,150	2,350	2,550	2,750	2,950	3,150	3,350
B1	Overall width (mm)	1,000	1,200	1,400	1,600	1,800	2,000	2,200	2,400	2,600	2,800	3,000	3,200	3,400
C	Outlet height (mm)	6,100	6,300	6,500	6,800	7,200	7,450	7,450	7,950	8,450	8,950	8,950	9,450	9,450
G	Footprint (mm)	1,240	1,440	1,640	1,840	2,040	2,240	2,440	2,660	2,900	3,120	3,380	3,600	3,850
E	Drain below base (mm)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,550	2,550	2,550	2,550	2,550	2,550	2,550	2,250
N1	Inlet nominal bore	DN400	DN500	DN600	DN700	DN800	DN900	DN1000	DN1100	DN1200	DN1300	DN1400	DN1500	DN1500
N2	outlet nominal bore	DN400	DN500	DN600	DN700	DN800	DN900	DN900	DN1000	DN1100	DN1200	DN1300	DN1400	DN1400
W1	Approx. dry weight (kg)	1,600	1,900	2,200	2,600	3,000	4,200	4,600	5,000	5,900	7,500	8,100	9,000	10,800
W2	Approx. operational weight (kg)	1,800	2,100	2,500	2,900	3,600	5,100	5,600	6,200	7,900	9,700	10,600	11,700	13,800

Above 20 MW requires customized solution.

Pada tabel bagian atas terdapat MW yang didefinisikan sebagai kapasitas mesin induk kapal di mana untuk bagian tabel dibawahnya adalah ukuran dari *scrubber unit* di mana simbol-simbol dimensinya dapat dilihat pada gambar dibawah ini.





Gambar 2.12 Desain *Scrubber Unit* Wartsila  
(Sumber: Wartsila, 2018)

Gambar di bawah ini adalah penampakan dari *scrubber unit* pada proses produksi.

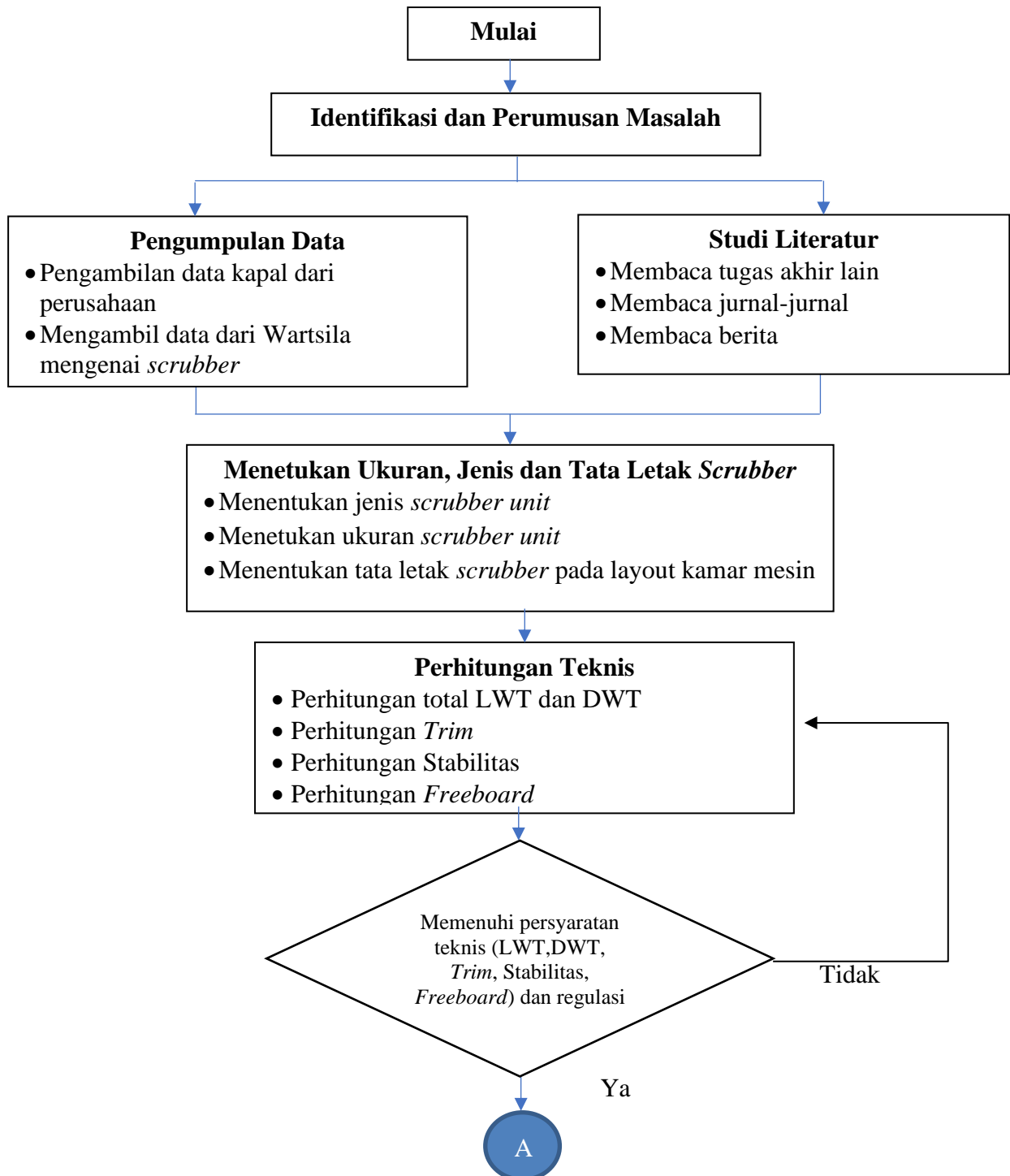


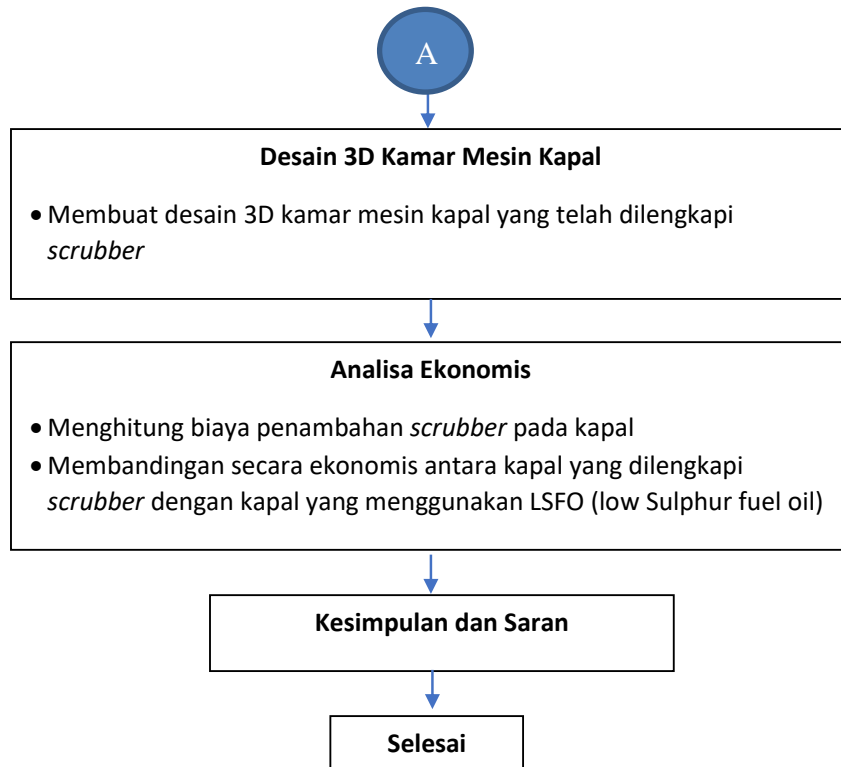
Gambar 2.13 *Scrubber Unit*  
(Sumber: Wartsila, 2018)

# BAB 3 METODOLOGI

## 3.1. Bagan Alir

Secara umum metodologi dalam pengerjaan Tugas Akhir ini sebagai berikut





Gambar 3.1 Bagan Alir Pengerjaan Tugas Akhir

### 3.2. Identifikasi dan Perumusan Masalah

Pada tahap ini dilakukan identifikasi terhadap suatu permasalahan yang melatarbelakangi penulisan Tugas Akhir, adapun permasalahan yang diidentifikasi meliputi:

1. Penentuan ukuran, jenis, dan tata letak *scrubber* pada kapal
2. Analisis teknis pada kapal yang telah dilengkapi *scrubber*
3. Nalai ekonomis *scrubber* pada kapal

### 3.3. Pengumpulan Data dan Studi Literatur

Pada tahap ini, dilakukan pencarian data yang terkait beserta teori-teori pendukung dalam mengerjakan Tugas Akhir ini. Data terkait yang dicari dalam pengerjaan Tugas Akhir ini meliputi:

1. Data kapal yang akan di modifikasi.
2. Keperluan dalam penambahan *Scrubber*
3. Biaya pemasangan *Scrubber*

### 3.4. Menentukan Ukuran, Jenis dan Tata Letak *Scrubber*

Pada tahap ini dilakukan penentuan *scrubber* yang sesuai untuk kapal yang meliputi:

1. Ukuran *scrubber*

2. Jenis *scrubber*
3. Tata letak *scrubber*

### **3.5. Perhitungan Teknis**

Pada tahap ini, dilakukan pengolahan data-data yang diperoleh sesuai dengan keperluan teknik dalam modifikasi kontainer dengan penambahan *scrubber*. Adapun analisis digunakan untuk menentukan beberapa hal yang meliputi:

1. Perhitungan total LWT dan DWT.
2. Perhitungan *Trim*
3. Perhitungan Stabilitas
4. Perhitungan *Freeboard*

### **3.6. Desain 3D Kamar Mesin**

Setelah ditentukan tata letak dan perhitungan teknis, dibuatlah desain 3D kamar mesin kamar guna memudahkan dalam proses pemasangan *scrubber*.

### **3.7. Analisis Ekonomis**

Melakukan analisis ekonomis dalam modifikasi kapal yang meliputi biaya modifikasi dan penambahan *scrubber* serta perbandingan ekonomis antara penggunaan *scrubber* dengan penggunaan bahan bakar LSHFO.

Halaman ini sengaja dikosongkan

## **BAB 4**

### **ANALISIS TEKNIS**

#### **4.1. Menentukan Jenis, Ukuran dan Tata Letak *Scrubber***

*Scrubber* merupakan salah satu alat reduksi emisi SO<sub>x</sub> yang dipasang pada kapal.

*Scrubber* umumnya terdiri dari:

- *Exhaust gas cleaning* (EGC) unit yang berfungsi sebagai tempat untuk pencampuran gas buang dengan air sehingga SO<sub>x</sub> akan berubah menjadi asam sulfida (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Biasanya EGC unit terletak di daerah yang tinggi di kapal seperti *funnel*.
- *Wash water treatment plant* yang berfungsi untuk membersihkan air buangan dari sisa-sisa bahan bakar.
- *Sludge handling* yang berfungsi untuk menahan kotoran yang dipisahkan oleh *wash water treatment* dan akan dibuang di pelabuhan (Boer & Hoen, 2015).

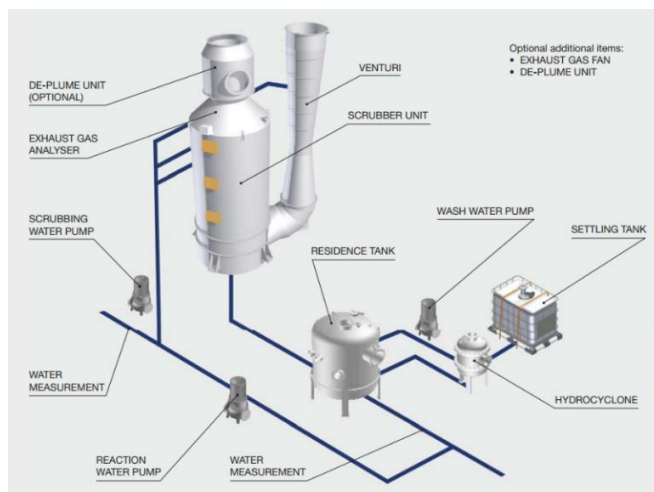
Dalam menentukan *scrubber unit* yang sesuai untuk kapal terdapat beberapa hal yang harus dilakukan sebagai berikut:

##### **4.1.1. Menentukan Sistem *Scrubber***

Terdapat tiga jenis sistem *scrubber* yaitu:

###### 1. *Open-loop*

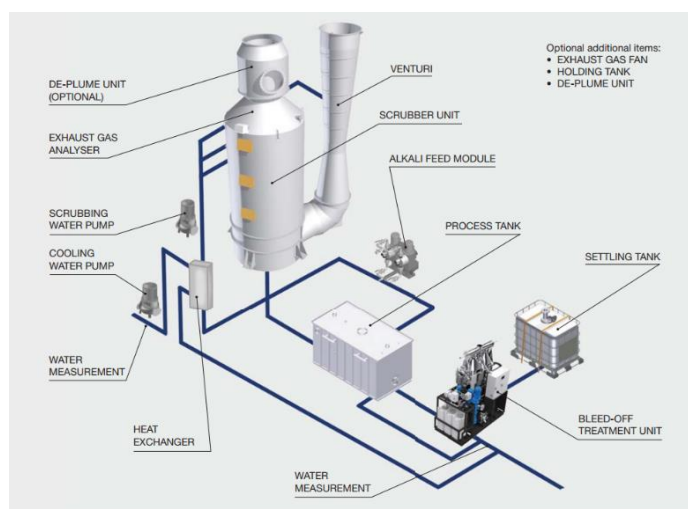
*Open-loop system* menggunakan air laut untuk menghilangkan SO<sub>x</sub> dari gas buang. Gas buang masuk ke dalam *scrubber* dan disemprotkan air laut dengan tiga tahap. Oksida sulfur pada gas buang bereaksi dengan air dan membentuk asam sulfida (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Air laut yang bersifat basa secara alami menetralkan keasaman dari asam sulfida yang terbentuk sehingga pH dari air buangan tetap terjaga. Air buangan dari *scrubber* diberikan perlakuan dan diawasi pada *inlet* dan *outlet* untuk memastikan kesesuaian buangan dengan MEPC 184(59) kriteria buangan.



Gambar 4.1 *Open-loop Scrubber System*  
(Sumber: Wartsila, 2018)

## 2. *Closed-loop*

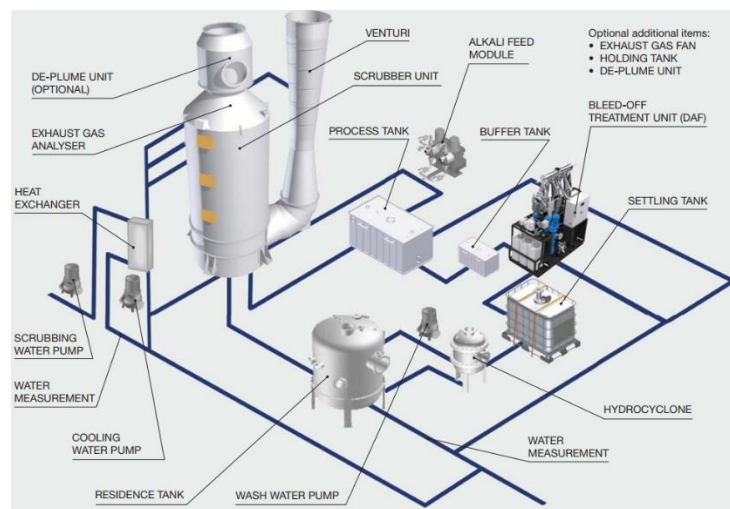
*Closed-loop system* bekerja dengan menggunakan sistem kontinu yang tertutup sehingga tidak perlu khawatir akan tingkat kebasahan dari air laut. Sistem ini sangat cocok untuk kapal-kapal yang beroperasi di daerah yang memiliki air dengan tingkat kebasahan rendah seperti sungai. Dalam *closed-loop scrubber system*, gas buang masuk ke *scrubber* dan disemprotkan dengan air yang telah dicampur dengan basa natrium (NaOH). Oksida sulfur yang terdapat pada gas buang bereaksi dengan campuran tersebut dan ternetralisir sehingga pH nya tetap terjaga. Sisa buangan diekstraksi dari sistem *closed-loop* dan diberikan perlakuan agar memenuhi persyaratan IMO. Buangan yang telah dibersihkan dapat dibuang ke laut dengan aman tanpa menimbulkan bahaya terhadap lingkungan atau dapat disimpan di tangki penyimpanan sementara untuk pembuangan berkala.



Gambar 4.2 *Closed-loop Scrubber System*  
(Sumber: Wartsila, 2018)

### 3. Hybrid

*Hybrid system* memberikan fleksibilitas dalam operasi baik *open-loop* dan *closed-loop*. Hal ini berarti kapal yang menggunakan sistem *hybrid* dapat beroperasi baik di perairan dengan tingkat kebasaaan rendah maupun di laut terbuka yang memiliki kebasaaan tinggi. Pendekatan *hybrid* dapat memberikan keleluasaan operasi pada mode *closed-loop* saat dibutuhkan seperti ketika sedang berlabuh dengan menggunakan basa natrium (NaOH) sebagai *buffer* atau operasi pada mode *open-loop* pada saat di laut terbuka.



Gambar 4.3 *Hybrid Scrubber System*  
(Sumber: Wartsila, 2018)

Untuk memilih jenis *scrubber* dalam tahap awal, pertimbangan keterbatasan operasi tiap sistem dan keamanan lingkungan dapat menjadi dasar dalam pemilihan. Selain itu, regulasi lokal negara-negara tertentu juga dapat dijadikan dasar dalam pemilihan *scrubber* yang tepat. Berdasarkan dari publikasi ([www.jurnalmaritim.com](http://www.jurnalmaritim.com)) *scrubber* jenis *open-loop* membuang air bilasan/cucian (*washwater*) ke laut. *Washwater* dinilai berbahaya bagi kehidupan biota laut dan bahkan manusia dikarenakan terdapat kandungan berbahaya seperti sulfur dioxide dan nitrogen oksida pada *washwater*. *Scrubber* jenis *closed-loop* lebih aman, karena menyimpan air bilasan di dalam sebuah tanki sebelum dibuang di *reception facility* (RF). Dan dari segi tersebut maka dipilihlah *close-loop scrubber*.



#### 4.1.2. Menentukan Ukuran *Scrubber*

Menentukan ukuran *scrubber* dilakukan agar *scrubber unit* yang dipasang sesuai dengan kapasitas mesin kapal sehingga *scrubber* dan berfungsi dengan optimal, berikut adalah tabel ukuran *scrubber* yang terdapat dipasaran.

Tabel 4.1 Daftar Ukuran *Scrubber* yang Terdapat di Pasaran  
(Sumber: Wartsila, 2018)

##### WEIGHTS & DIMENSIONS - STANDARD I-SOx SCRUBBER SIZES

Dim.	Description (Diameter A)	Ø850	Ø1050	Ø1250	Ø1450	Ø1650	Ø1850	Ø2050	Ø2250	Ø2450	Ø2650	Ø2850	Ø3050	Ø3250
	MW	1.2	1.9	2.7	3.6	4.7	5.9	7.2	8.7	10.3	12.0	13.9	15.9	18.1
	Gas flow (kg/S)	2.7	4.1	5.8	7.7	10.0	12.6	15.5	18.6	22.1	25.9	29.9	34.3	38.9
F	Total height (mm)	8,100	8,300	8,500	8,800	9,200	10,000	10,000	10,500	11,000	11,500	11,500	12,500	13,500
B	Overall length (mm)	950	1,150	1,350	1,550	1,750	1,950	2,150	2,350	2,550	2,750	2,950	3,150	3,350
B1	Overall width (mm)	1,000	1,200	1,400	1,600	1,800	2,000	2,200	2,400	2,600	2,800	3,000	3,200	3,400
C	Outlet height (mm)	6,100	6,300	6,500	6,800	7,200	7,450	7,450	7,950	8,450	8,950	8,950	9,450	9,450
G	Footprint (mm)	1,240	1,440	1,640	1,840	2,040	2,240	2,440	2,660	2,900	3,120	3,380	3,600	3,850
E	Drain below base (mm)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,550	2,550	2,550	2,550	2,550	2,550	2,550	2,250
N1	Inlet nominal bore	DN400	DN500	DN600	DN700	DN800	DN900	DN1000	DN1100	DN1200	DN1300	DN1400	DN1500	DN1500
N2	outlet nominal bore	DN400	DN500	DN600	DN700	DN800	DN900	DN900	DN1000	DN1100	DN1200	DN1300	DN1400	DN1400
W1	Approx. dry weight (kg)	1,600	1,900	2,200	2,600	3,000	4,200	4,600	5,000	5,900	7,500	8,100	9,000	10,800
W2	Approx. operational weight (kg)	1,800	2,100	2,500	2,900	3,600	5,100	5,600	6,200	7,900	9,700	10,600	11,700	13,800

Above 20 MW requires customized solution.

Cara menentukan ukuran scrubber yang dipakai adalah dengan melihat dari kapasitas mesin induk kapal. Kapal *Open top container ship* 800 TEUs menggunakan mesin induk Mitsubishi 6UEC33LSE-C2 yang berkapasitas 3990 kW atau 3,99 MW. Pengambilan ukuran *scrubber* berdasarkan kapasitas mesin induk, jika tidak ada kapasitas yang sama pada table maka diambil kapasitas mesin induk di atasnya. Untuk mesin induk dengan kapasitas 3,99 MW maka diambil ukuran *scrubber* untuk kapasitas 4,7 MW

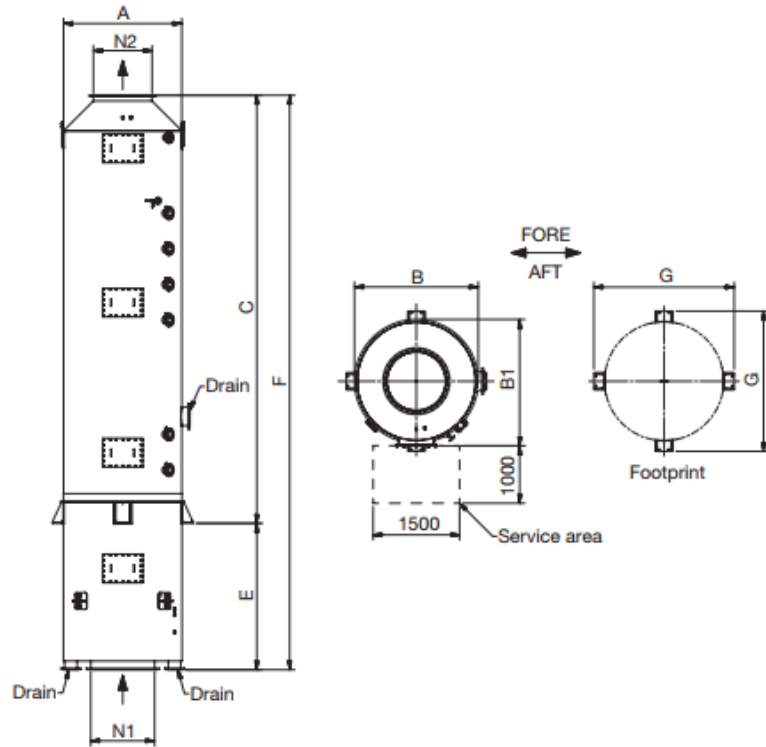
##### WEIGHTS & DIMENSIONS - STANDARD I-SOx SCRUBBER SIZES

Dim.	Description (Diameter A)	Ø850	Ø1050	Ø1250	Ø1450	Ø1650	Ø1850	Ø2050	Ø2250	Ø2450	Ø2650	Ø2850	Ø3050	Ø3250
	MW	1.2	1.9	2.7	3.6	4.7	5.9	7.2	8.7	10.3	12.0	13.9	15.9	18.1
	Gas flow (kg/S)	2.7	4.1	5.8	7.7	10.0	12.6	15.5	18.6	22.1	25.9	29.9	34.3	38.9
F	Total height (mm)	8,100	8,300	8,500	8,800	9,200	10,000	10,000	10,500	11,000	11,500	11,500	12,500	13,500
B	Overall length (mm)	950	1,150	1,350	1,550	1,750	1,950	2,150	2,350	2,550	2,750	2,950	3,150	3,350
B1	Overall width (mm)	1,000	1,200	1,400	1,600	1,800	2,000	2,200	2,400	2,600	2,800	3,000	3,200	3,400
C	Outlet height (mm)	6,100	6,300	6,500	6,800	7,200	7,450	7,450	7,950	8,450	8,950	8,950	9,450	9,450
G	Footprint (mm)	1,240	1,440	1,640	1,840	2,040	2,240	2,440	2,660	2,900	3,120	3,380	3,600	3,850
E	Drain below base (mm)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,550	2,550	2,550	2,550	2,550	2,550	2,550	2,250
N1	Inlet nominal bore	DN400	DN500	DN600	DN700	DN800	DN900	DN1000	DN1100	DN1200	DN1300	DN1400	DN1500	DN1500
N2	outlet nominal bore	DN400	DN500	DN600	DN700	DN800	DN900	DN900	DN1000	DN1100	DN1200	DN1300	DN1400	DN1400
W1	Approx. dry weight (kg)	1,600	1,900	2,200	2,600	3,000	4,200	4,600	5,000	5,900	7,500	8,100	9,000	10,800
W2	Approx. operational weight (kg)	1,800	2,100	2,500	2,900	3,600	5,100	5,600	6,200	7,900	9,700	10,600	11,700	13,800

Above 20 MW requires customized solution.

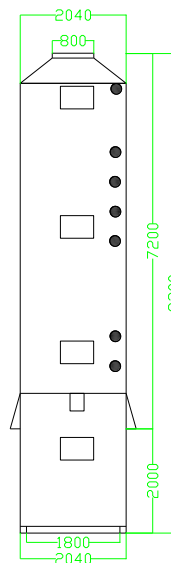
Gambar 4.4 *Scrubber* yang Dipilih

Pada tabel bagian atas terdapat MW yang didefinisikan sebagai kapasitas mesin induk kapal di mana untuk bagian tabel dibawahnya adalah ukuran dari *scrubber unit* di mana simbol-simbol dimensinya dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 4.5 Desain *Scrubber Unit* Wartsila  
(Sumber: Wartsila, 2018)

Berdasarkan [Tabel 4.1](#), didapatkan ukuran untuk *scrubber*, berikut adalah gambar desain *scrubber* yang sesuai untuk *open top container ship* 800 TEUs.



Gambar 4.6 Dimensi *Scrubber Unit*

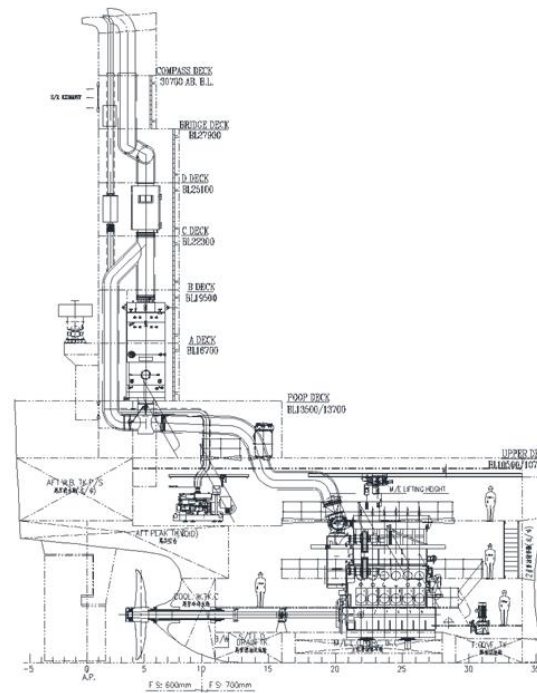
### 4.1.3. Menentukan Tata Letak *Scrubber*

*Scrubber* unit dan perlengkapannya memiliki dimensi tertentu yang harus dicocokkan ukurannya dengan ruang yang tersedia pada kapal. Berdasarkan katalog SOx *Scrubber* dari Wartsila, terdapat beberapa komponen yang harus dipasang dalam pemasangan *scrubber* yang dijelaskan dalam tabel berikut.

Tabel 4.2 Komponen *Scrubber System*  
(Sumber: Wartsila, 2018)

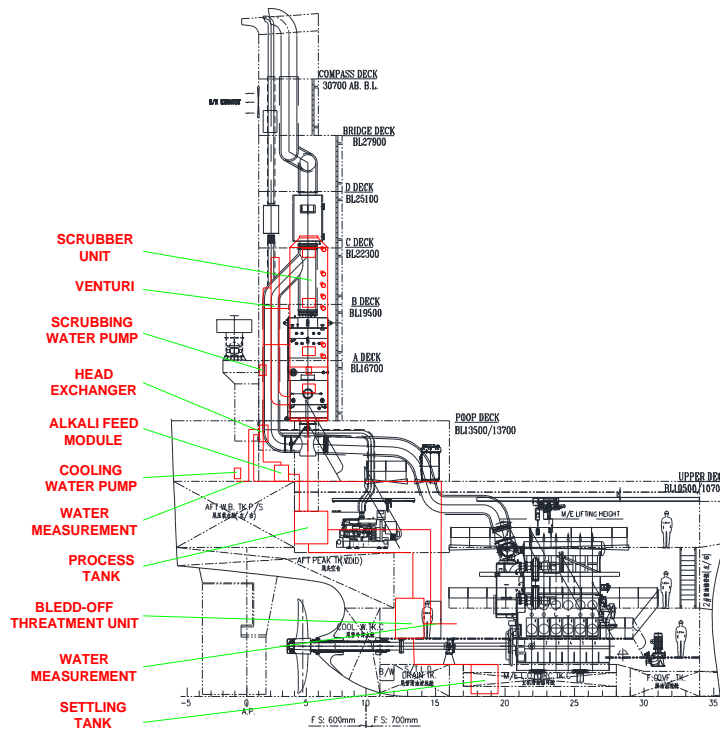
Komponen	<i>Open loop</i>	<i>Closed loop</i>	<i>Hybrid</i>
<i>Scrubber unit</i>	√	√	√
<i>Seawater pump</i>	√	√	√
<i>Heat exchanger</i>	√	√	√
<i>Alkali feed module pump</i>		√	√
<i>Buffer tank</i>		√	√
<i>Water treatment unit</i>	√	√	√
<i>Water pump module</i>		√	√
<i>Sludge tank</i>		√	√
<i>Hydroclone</i>	√		√
<i>Water monitoring unit</i>	√		√

Berikut adalah gambar *layout* kamar mesin kapal sebelum dilengkapi *scrubber unit*.



Gambar 4.7 Kamar Mesin Kapal Sebelum Dilengkapi *Scrubber Unit*

Pelengkapan *scrubber unit* kapal harus sesuai, baik pada ukuran *scrubber* maupun peralatan *scrubber* agar kinerja *scrubber* dapat berjalan semestinya. Dengan menggunakan gambar kapal yang telah tersedia serta gambar *scrubber unit* yang terdapat dalam katalog Wartsila, dapat diperkirakan peletakan sistem *scrubber* dalam kapal. Berikut sketsa yang telah dibuat untuk *scrubber closed-loop system*.



Gambar 4.8 Kamar Mesin Kapal Setelah Dilengkapi *Scrubber Unit*

## 4.2. Perhitungan Teknis

### 4.2.1. Perhitungan Total LWT dan DWT

*Scrubber* dan peralatannya memiliki berat tertentu yang juga harus dipertimbangkan dalam pemasangannya pada kapal. Berdasarkan MSC/Circular. 1158 IMO, deviasi maksimum *lightweight* kapal yaitu sebesar 2% sehingga penambahan *scrubber* dan peralatannya perlu dipertimbangkan pengaruhnya terhadap *lightweight* kapal. Selain itu, penambahan berat ini juga berdampak pada pengurangan muatan kapal. Hal ini bertujuan untuk menjaga sarat kapal tetap seiring dengan pertambahan berat dari *scrubber*. *Open top container ship* 800 TEUs memiliki LWT sebesar 5096 ton dan DWT sebesar 13200 ton, berat dari *scrubber* unit yang digunakan memiliki total 25 ton.

Impact of Scrubber Installation on Weight	
<b>Scrubber Weight</b>	
• Scrubber Set Weight	
$W_M =$	25.000 ton , Wartsila
VCG =	41.000 m
LCG dr AP=	7.200 m
Deviation =	0.491% Accepted, below 2%

Gambar 4.9 Berat Total Instalasi *Scrubber Unit*

Deviasi akibat penambahan beban LWT oleh *Scrubber* sebesar 0.491%, maka tidak diperlukan *inclining test* ulang untuk melihat kesesuaian kapal dengan *Intact Stability Code*, perubahan maksimum dari *lightweight* kapal yaitu 2%. Apabila kapal mengalami perubahan berat lebih dari 2%, maka diperlukan *inclining test* ulang untuk melihat kesesuaian kapal dengan *Intact Stability Code*.

Tabel 4.3 Estimasi Total Berat

<b>Total Weight and Total Centers Estimation</b>		
<b><u>Light Weight Tonnes (LWT)</u></b>		
• <b>Steel Weight</b>		
$W_{ST} =$	5017.000	ton
$VCG =$	4.878	m
$LCG\ dr\ AP =$	73.792	m
• <b>Machinery Weight</b>		
$W_M =$	79.000	ton
$VCG =$	3.738	m
$LCG\ dr\ AP =$	20.000	m
• <b>Scrubber Weight</b>		
$W_M =$	25.000	ton
$VCG =$	41.000	m
$LCG\ dr\ AP =$	7.200	m
Total LWT =	5096.000	ton
Total LWT with Scrubber =	5121.000	ton
<b><u>Dead Weight Tonnes (DWT)</u></b>		
• <b>Deadweight</b>		
DWT =	13200	ton
DWT-Scrubber unit	13175	ton
$VCG =$	6.000	m
$LCG\ dr\ AP =$	78.210	m
Total DWT with scrubber =	13175.000	ton
<b><u>Total Weight</u></b>		
LWT + DWT =	18296.000	ton
VCG Total =	5.68	m
LCG Total (dr AP) =	76.7472	m
<b><u>Total Weight with Scrubber</u></b>		
LWT + DWT =	18296.000	ton
VCG Total =	5.74	m
LCG Total (dr AP) =	76.7571	m

#### 4.2.2. Perhitungan *Trim*

Pada perhitungan *Trim* terjadi penambahan *trim* pada stern sebanyak 0,66512 cm

Tabel 4.4 Perhitungan *Trim*

Trim Calculation with Scrubber	
Chapter 11 Parametric Design , Michael G. Parsons	
<b>Input Data</b>	
L = 142.200 m	Disp = 18235.27 m <sup>3</sup>
B = 23.250 m	KG = 5.74 m <sup>3</sup>
T = 6.500 m	LCG dr AP = 76.7571 m
Cm = 0.995	LCB dr AP = 74.014 m
Cb = 0.816	
Cwp = 0.886	
<b>Hydrostatic Properties</b>	
<b>KB</b>	
KB/T = 0.90 – 0.30*Cm – 0.1Cb	
= 0.5198	
KB = 3.38 m	
<b>BM<sub>T</sub></b>	
C <sub>IT</sub> = 0.1216*Cwp – 0.0410	
= 0.0678	
I <sub>T</sub> = C <sub>IT</sub> . L . B <sup>3</sup>	
= 121118.8	
B <sub>MT</sub> = jarak antara titik tekan <i>bauyancy</i> terhadap titik <i>metacenter</i> secara <i>melintang</i>	
B <sub>MT</sub> = I <sub>T</sub> /vol	
= 6.64 m	
<b>BM<sub>L</sub></b>	
C <sub>IL</sub> = <i>longitudinal inertia coefficient</i>	
C <sub>IL</sub> = 0.350 Cwp <sup>2</sup> – 0.405 Cwp + 0.146	
= 0.0620	
I <sub>L</sub> = <i>moment of inertia of waterplane relative to ship's longitudinal axis</i>	
I <sub>L</sub> = C <sub>IL</sub> . B . L <sup>3</sup>	
= 4143969 m <sup>4</sup>	
BM <sub>L</sub> = <i>jarak antara titik tekan bouyancy terhadap titik metacenter secara memanjang</i>	
BM <sub>L</sub> = I <sub>L</sub> /vol	
= 227.25 m	
<b>GM<sub>L</sub></b> = B <sub>ML</sub> + KB - KG	
= 224.89 m	
<b>Ta - Tf</b> = (LCG – LCB).L / G <sub>ML</sub>	
= 1.734 m	
Kondisi trim = <b>Trim by Stern</b>	
Perbedaan trim =	0.01 m = 0.66512 cm

Dari perhitungan trim didapatkan perbedaan trim kapal dengan dan tanpa *scrubber* sebesar 0.66512 cm atau 0.00665 m.

### 4.2.3. Perhitungan *Freeboard*

Perhitungan perbandingan *freeboard* menggunakan perbandingan *trim* di mana didapatkan hasilnya sebagai berikut.

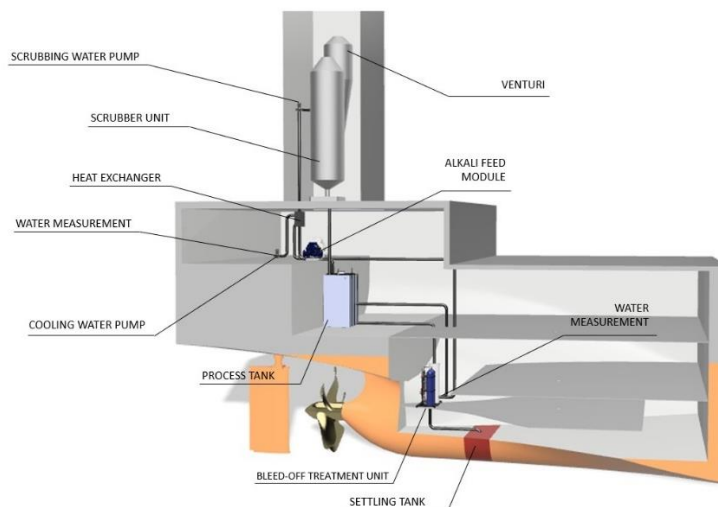
Tabel 4.5 Perbandingan *Freeboard*

Freeboard Calculation		
International Convention on Load Lines, 1966 and Protocol of 1988		
• Freeboard Boundary Condition		
Actual Freeboard (Summer)	Freeboard with Scrubber	
$FB_a = H - T$	$FB_a = H - T$	
$FB_a = 4.00$ m	$FB_a = 3.99$ m	
$FB' = 2.35$ m	$FB' = 2.35$ m	
ACCEPTED	ACCEPTED	( $FB_a - FB'$ ) Summer Condition
Actual Freeboard (Winter)		
$FB_a = H - T$	$FB_a = H - T$	
$FB_a = 4.00$ m	$FB_a = 3.99$ m	
$FB' = 2.39$ m	$FB' = 2.39$ m	
ACCEPTED	ACCEPTED	( $FB_a - FB'$ ) Winter Condition
• Minimum Bow Height		
$FB_a + Sf + h_{FC} = 9.17$ m	$FB_a + Sf + h_{FC} = 9.16$ m	
ACCEPTED	ACCEPTED	Bow Height Minimum Condition

Dari perhitungan teknis diatas, dapat ditarik kesimpulan bahwa kapal *open top container ship* 800 TEUs yang telah dilengkapi *scrubber* masih memenuhi *margin* perhitungan yang telah ditetapkan, sehingga pada kapal *open top container ship* 800 TEUs tidak diperlukannya pengurangan muatan.

### 4.3. Gambar 3D Kamar Mesin

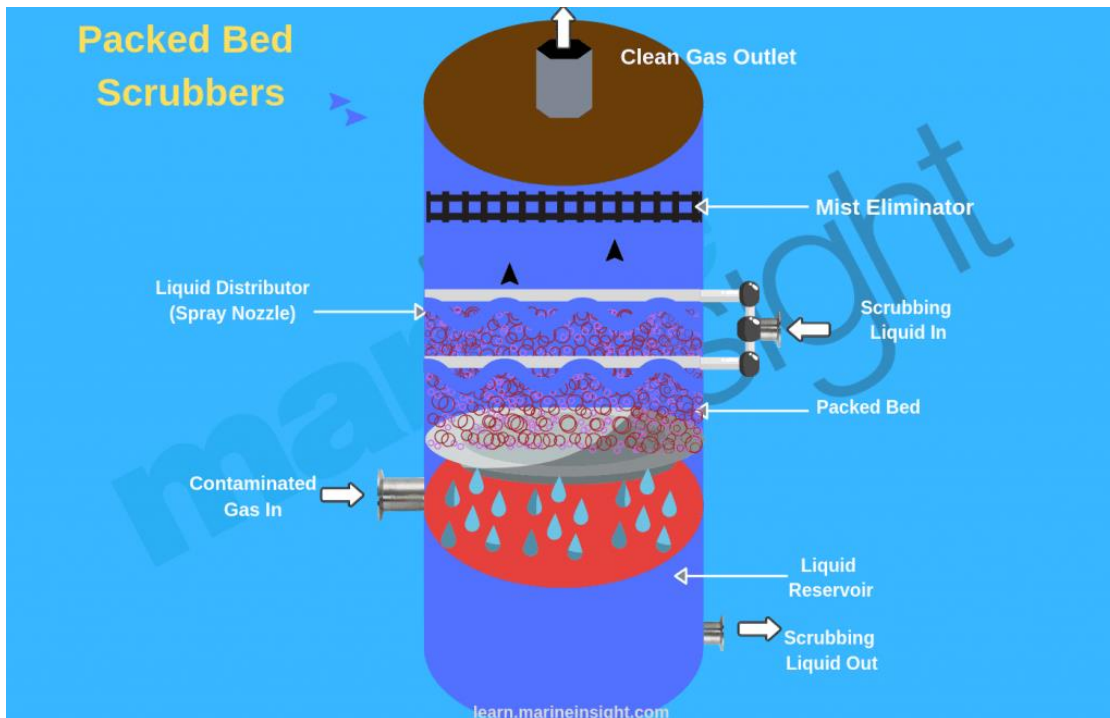
Setelah dilakukan perhitungan Teknis dan susah memenuhi regulasi maka dibuatlah gambar 3D pada kamar mesin kapal.



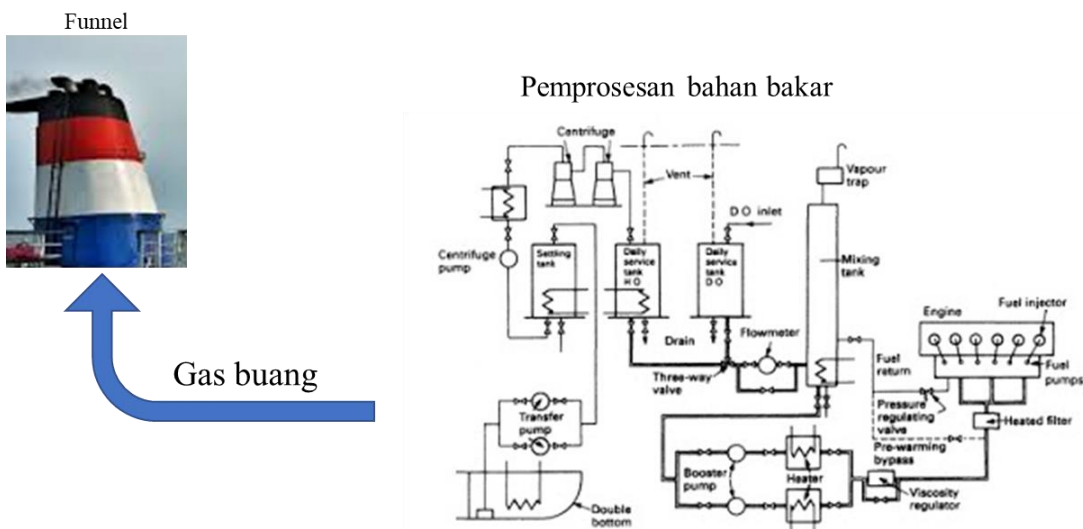
Gambar 4.10 3D Penampang Samping Kamar Mesin Kapal



Berikut adalah skema penyaringan gas tercemar yang diolah pada *scrubber tower*.

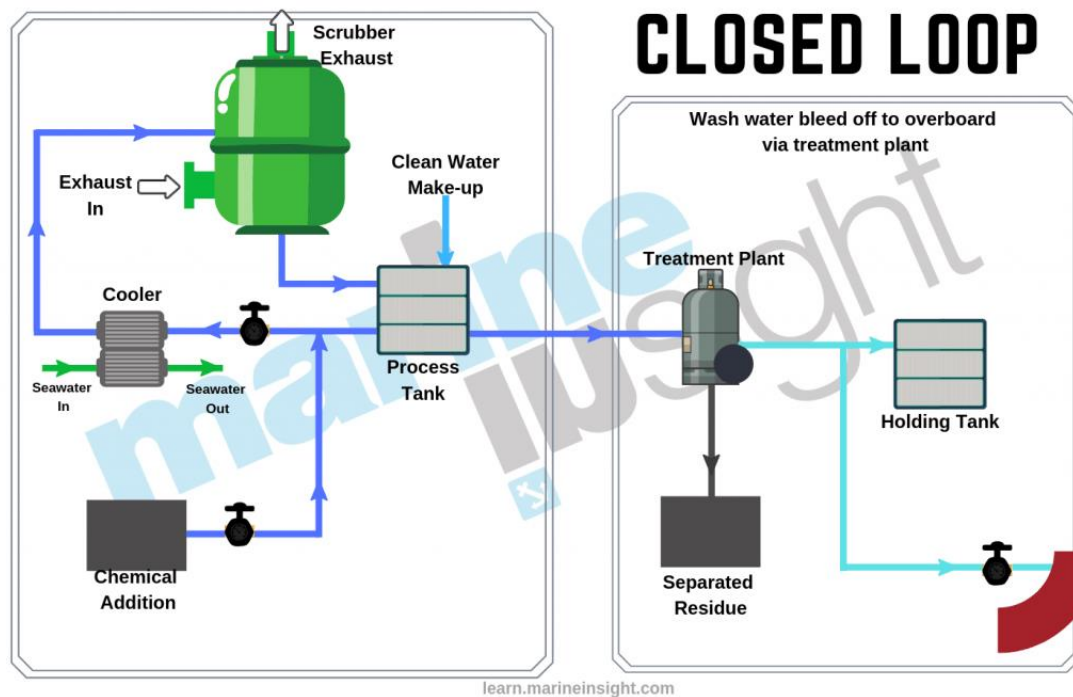


Gambar 4.11 Proses Penyaringan Gas Buang  
(sumber: marine insight, 2019)



Gambar 4.12 Kapal Tanpa Menggunakan *Scrubber*

Setelah proses penggunaan bahan bakar HFO, hasil gas buang pada kapal yang tanpa menggunakan *scrubber* langsung dibuang melalui *funnel* kapal dimana gas buang tersebut masih banyak mengandung emisi SOx yang melebihi ketentuan dari IMO. Namun pada kapal yang telah dilengkapi *scrubber*, gas buang yang akan dikeluarkan melalui *funnel* akan diolah dulu dengan *scrubber* yang akan menghasilkan gas buang dengan emisi SOx lebih sedikit, untuk alur kerjanya dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4.13 Alur Kerja *Scrubber* Dalam Pengolahan Gas Buang  
(sumber: marine insight, 2019)

Pada *close-loop scrubber* memiliki prinsip kerja sebagai berikut:

1. Gas buang masuk melalui sisi bawah *scrubber tower*
2. Air laut dimasukkan ke *scrubber* bagian atas melalui *nozle* penyemprot di mana proses ini menghasilkan pola semprot yang terbagi rata ke seluruh bagian *scrubber tower*
3. Partikel sulfur dalam gas buang menempel pada tetesan air di bawah suhu yang tepat dan kondisi proses
4. Air proses diarahkan ke tangki sirkulasi
5. NaOH ditambahkan ke air proses untuk menetralkan keasaman
6. Air proses yang telah dibersihkan dipompa naik lagi ke atas
7. Air yang tercemar dikuras dan dialirkan melalui separator
8. Benda padat dan minyak dihilangkan dari air tercemar yang menjadi lumpur
9. Lumpur dipompa ke *sludge storage*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

## BAB 5 ANALISIS EKONOMIS

### 5.1. Perhitungan Biaya Penggunaan *Scrubber*

#### 5.1.1. Biaya Investasi

Biaya investasi yang diperlukan dalam pemasangan *scrubber unit* terdiri dari biaya komponen *scrubber* dan pelengkapannya, material *outfitting*, pekerjaan *outfitting*, biaya *docking*, *commissioning*, desain sistem, klasifikasi dan administrasi, manajemen proyek, pelatihan kru, dokumentasi, dan suku cadang. Akan tetapi, dalam *project* ini dilakukan pendekatan *top-down* dalam mengestimasi biaya investasi pemasangan *scrubber*. Hal ini disebabkan oleh kurangnya data mengenai jumlah biaya investasi detail *scrubber*. Oleh karena itu, digunakan estimasi yang bersumber dari publikasi Fathom terkait data biaya investasi *scrubber*. Berdasarkan sumber tersebut, estimasi biaya *scrubber* unit berkisar antara Rp 16,776,100,000 sampai Rp 33,552,200,000 tergantung dari ukurannya. Estimasi biaya pemasangan *scrubber* berkisar antara Rp 13,420,880,000 sampai Rp 25,164,150,000. Estimasi biaya perawatan berkisar antara 0,5% - 1% dari biaya *scrubber* unit per tahun. Dengan menggunakan data-data tersebut, diestimasi biaya *scrubber* unit yaitu Rp 25,164,150,000 dan biaya instalasi sebesar Rp 13,420,880,000.00. Biaya modifikasi pada galangan kapal juga perlu diperhitungkan dikarena pada pemasangan *scrubber unit* perlu pembongkaran pada *funnel* kapal, dengan estimasi biaya yaitu Rp 35,000/kg maka didapatkan biaya modifikasi pada galangan sebesar Rp 182,587,860. Sehingga biaya investasi yang dibutuhkan untuk pemasangan *scrubber system* yaitu Rp 38,767,617,860 untuk *closed-loop scrubber system*. Untuk biaya investasi pertahun maka diambil sisa lifetime maksimal kapal yaitu 28 tahun. Sisa *lifetime* tersebut diambil dari perkiraan usia maksimal kapal yaitu 30 tahun dikurangi usia kapal sekarang yaitu 2 tahun. Di mana didapat biaya investasi pemasangan *scrubber* yaitu Rp 1,384,557,781 pertahun.

Tabel 5.1 Biaya Investasi *Scrubber*

Investment Cost		
Scrubber Cost	= Rp	25,164,150,000
Instalation Cost	= Rp	13,420,880,000
Shipyards Cost	= Rp	182,587,860
<b>Total</b>	= Rp	<b>38,767,617,860</b>
Yearly Cost	= Rp	1,384,557,781 / Year

### 5.1.2. Penghitungan Biaya Bahan Bakar

Biaya bahan bakar yang dihitung adalah bahan bakar *heavy fuel oil* (HFO) dan *low Sulphur heavy fuel oil* (LSHFO). Berdasarkan data yang dikutip dari website Ship and Bunker ([www.shipandbunker.com](http://www.shipandbunker.com)), per 22 Januari 2020 harga HFO di *bunker* Rotterdam yaitu €403.52/ton atau Rp6,769,491/ton dengan kurs € ke Rupiah sebesar 16776.1 dan harga LSHFO di *bunker* Rotterdam yaitu €654.83/ton atau Rp10,985,493/ton. Selain itu, *fuel saving* juga ditentukan oleh konsumsi bahan bakar dari kapal tersebut. Konsumsi bahan bakar *Open top container ship* 800 TEUs sebesar 1150 ton selama satu tahun.. Dengan menggunakan data-data tersebut dapat diestimasi *fuel saving* yang didapat. Dalam Tugas Akhir ini menggunakan referensi tesis yang ditulis oleh Lathinen pada tahun 2016. Dalam tesis tersebut, penulis mengestimasi biaya bahan bakar menggunakan sistem *closed-loop*. Parameter-parameter yang digunakan oleh Lathinen dalam mengestimasi biaya bahan bakar dapat dilihat dalam Lampiran. Dengan menggunakan parameter-parameter tersebut, praktikan melakukan estimasi biaya bahan bakar pada kapal *Open top container ship* 800 TEUs. Berikut perhitungan biaya bahan bakar tersebut.

Tabel 5.2 Perhitungan Estimasi Biaya Bahan Bakar HFO dan LSHFO

<b>Cost Estimation</b>		
Scrubber Closed-loop System		
*Based on Closed-loop Exhaust Gas Scrubber Onboard a Merchant Ship (Jari M. Lathinen)		
<b>Initial Data</b>		
Total Annual FO Consumptions	=	1150.0 ton
Total Annual FO Consumptions at Sea	=	462.0 ton
Total Annual FO Consumptions at Port	=	693.0 ton
Total ME Running Hours	=	7920.0 hrs
Total ME Running Hours at Sea	=	3564.0 hrs
Total Hours at Port	=	4356.0 hrs
HFO Price	= Rp	6,769,491.87 / ton
LSHFO Price	= Rp	10,985,493.56 / ton
Caustic Soda Price	= Rp	4,465,797.82 / ton
M/E Power (Mitsubishi 6uec33lse-c2)	=	3.99 MW
Operational time		330 days/year
<b>Fuel Cost</b>		
<b>Heavy Fuel Oil Cost</b>		
HFO Ave. Specific Consumptions	=	66.351 kg / MWh
HFO Price	= Rp	6,769.49 / kg
Add. Energy Cons. due to Scrubber	=	0.717 %
HFO Cost	= Rp	452,383.15 / MWh
	= Rp	14,295,669,520.05 / Year
<b>Ultra Low Sulfur Heavy Fuel Oil Cost</b>		
LSHFO Ave. Specific Consumptions	=	62.920 kg / MWh
LSHFO Price	= Rp	10,985.49 / kg
Add. Energy Cons. due to Scrubber	=	0.180 %
<b>Ultra Low Sulfur Heavy Fuel Oil Cost</b>		
Investment cost	= Rp	-
LSHFO Cost	= Rp	704,227.13 / MWh
	= Rp	22,254,140,556.98 / Year

Berdasarkan estimasi perhitungan biaya bahan bakar yang didapat yaitu HFO Rp 14,295,669,520 / tahun, dan LSHFO Rp 22,254,140,556 / tahun.

### 5.1.3. Biaya Operasional

Biaya operasional ini dipengaruhi oleh tiga beban biaya yaitu beban langsung (*direct cost*), beban tidak langsung (*indirect cost*), dan *lost income*. Lathinen (2016) juga memberikan persamaan-persamaan yang dapat digunakan untuk mengestimasi biaya operasional yang terdapat pada Lampiran. Dengan menggunakan persamaan tersebut, estimasi biaya operasional dari penggunaan *scrubber closed-loop system* yaitu sebagai berikut.

Tabel 5.3 Perhitungan *Operational Cost Scrubber*

<b>Scrubber Operational Cost</b>		
<b>Direct Cost</b>		
<b>Sludge Cost</b>		
Sludge Production	=	0.240 kg / MWh
Sludge Treatment Cost	= Rp	3,355.22 / kg
Sludge Cost	= Rp	805.25 / MWh
<b>Alkali Cost</b>		
Alkali Price (Caustic Soda)	= Rp	4,465.80 / kg
Alkali Consumptions	=	12 kg / MWh
Alkali Cost	= Rp	58,948.53 / MWh
<b>Service Cost</b>		
Maintenance Cost	= Rp	335,522,000.00 / year
Labour Cost	= Rp	419,402,500.00 / year
M/E Energy Production / year	=	31600.8 MWh
M/E Extra Maintenance due to HFO Use	= Rp	3,187.46 / MWh
Service Cost	= Rp	27,076.87 / MWh
<b>Direct Cost</b>	= Rp	84,625.29 / MWh
<b>Indirect Cost</b>		
<b>Resistance Cost</b>		
Increased Relative Power	=	1.002
Ship Loaded Weight	=	11822.32 ton
Capacity Utilization Factor	=	0.8
Ship Maximum Payload	=	8104.000 ton
Ship Lightweight	=	5096 ton
Weight of Consumables	=	243.12 ton
Scrubber Operational Weight	=	82.86432 ton
Scrubber Lightweight	=	41.496 ton
M/E Nominal Power	=	3.99 MW
Fresh Water Weight	=	25.08912 ton
Fresh Water Consumption	=	131 kg / MWh
Alkali Weight	=	16.2792 ton
Resistance Cost	= Rp	1,054.48 / MWh
<b>Heavy Fuel Heating Cost</b>		
Time at Sea per year	=	148.500 days
HFO Process and Heating Power	=	0.5%
Heavy Fuel Heating Cost	= Rp	2,088.56 / MWh
<b>Heavy Fuel Separation Loss</b>		
Heavy Fuel Separation Loss	= Rp	4,523.83 / MWh
<b>Indirect Cost</b>	= Rp	7,666.87 / MWh
<b>Lost Income</b>		
Fuel Cost Factor	=	43.034 %
Cargo Capacity Reduction Factor	=	1.023 %
<b>Lost Income</b>	= Rp	8,599.16 / MWh
<b>Total operational cost</b>	Rp	3,188,246,561.79 / Year

Berdasarkan estimasi perhitungan, biaya operasional yang dikeluarkan dari penggunaan *scrubber closed-loop system* yaitu Rp 3,188,246,561 /tahun.

#### 5.1.4. Total Cost HFO dengan Scrubber

Total dari perhitungan biaya bahan bakar HFO, operasional *scrubber* dan biaya investasi *scrubber* dalam 1 tahun.

Tabel 5.4 Total Cost HFO dan Scrubber

Total Cost HFO+Scrubber		
Investment cost (scrubber unit + instalation + modification cost in shipyard)	= Rp	38,767,617,860.00
Investment cost / year	Rp	1,384,557,780.71 / Year
Biaya Operasional Scrubber (maintenance + consumable)	= Rp	3,188,246,561.79 / Year
HFO Cost	= Rp	452,383.15 / MWh
	= Rp	14,295,669,520.05 / Year
<b>Total cost</b>	<b>= Rp</b>	<b>18,868,473,862.56 / Year</b>

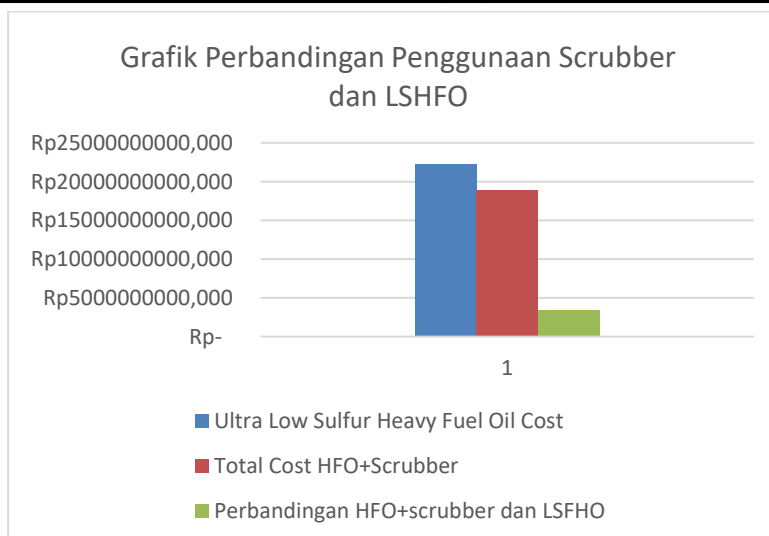
Berdasarkan perhitungan biaya total dari bahan bakar HFO, operasional *scrubber* dan biaya investasi *scrubber* dalam 1 tahun didapatkan hasil Rp 18,868,473,862 /tahun.

#### 5.1.5. Scrubber Saving

Keuntungan bersih yang didapat dari penggunaan *scrubber closed-loop system*, yaitu perbandingan antara LSHFO dengan HFO + *scrubber* dalam 1 tahun.

Tabel 5.5 Perbandingan antara Penggunaan Scrubber dan LSHFO

Conclusion		
Ultra Low Sulfur Heavy Fuel Oil Cost	= Rp	22,254,140,556.98 / year
Total Cost HFO+Scrubber	= Rp	18,868,473,862.56 / year
Perbandingan HFO+scrubber dan LSFHO	= Rp	3,385,666,694.42 / year



Gambar 5.1 Diagram Perbandingan Biaya antara HFO+scrubber dengan LSHFO

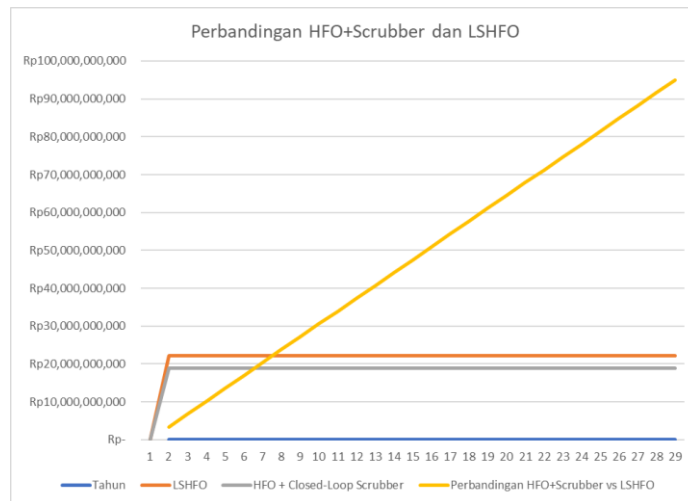
Penggunaan scrubber dan LSHFO memiliki perbandingan sebanyak Rp 3,385,666,694 selama setahun.

## 5.2. Total Perbandingan Pengeluaran LSHFO dan HFO + Scrubber

Perbandingan pengeluaran LSHFO dan HFO + scrubber dihitung hingga batas sisa lifetime kapal yaitu 28 tahun. Perbandingannya adalah sebagai berikut.

Tabel 5.6 Perbandingan Pengeluaran LSHFO dengan HFO + Scrubber

Tahun	LSHFO		HFO + Closed-Loop Scrubber		Perbandingan HFO+Scrubber vs LSHFO
	Cost	Cost	Cost	Cost	
1	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 3,385,666,694.42
2	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 6,771,333,388.84
3	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 10,157,000,083.26
4	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 13,542,666,777.68
5	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 16,928,333,472.10
6	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 20,314,000,166.52
7	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 23,699,666,860.94
8	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 27,085,333,555.36
9	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 30,471,000,249.78
10	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 33,856,666,944.20
11	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 37,242,333,638.62
12	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 40,628,000,333.04
13	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 44,013,667,027.46
14	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 47,399,333,721.88
15	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 50,785,000,416.30
16	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 54,170,667,110.72
17	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 57,556,333,805.14
18	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 60,942,000,499.56
19	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 64,327,667,193.98
20	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 67,713,333,888.40
21	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 71,099,000,582.82
22	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 74,484,667,277.24
23	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 77,870,333,971.66
24	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 81,256,000,666.08
25	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 84,641,667,360.50
26	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 88,027,334,054.92
27	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 91,413,000,749.34
28	Rp	22,254,140,556.98	Rp	18,868,473,862.56	Rp 94,798,667,443.76
<b>Total Margin</b>				<b>Rp</b>	<b>94,798,667,443.76</b>



Gambar 5.2 Grafik Perbandingan HFO+Scrubber dengan LSHFO



Berdasarkan perhitungan perbandingan antara LSHFO dengan kapal yang telah dilengkapi *scrubber* selama sisa lifetime kapal yaitu 28 tahun didapatkan perbedaan sebanyak Rp 94,798,667,443.

## **BAB 6**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **6.1. Kesimpulan**

Setelah dilakukan percobaan dan penelitian maka kesimpulan dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. *Scrubber* dengan sistem *close-loop scrubber* dan dimensi *scrubber* untuk mesin induk 4,7 MW cocok untuk *Open Top Container ship* 800 TEUs.
2. *Scrubber* sesuai untuk digunakan pada *Open top container ship* 800 TEUs dikarenakan tidak banyak mempengaruhi berat, *trim*, serta *freeboard* kapal.
3. Pada gambar 3D kamar mesin ukuran dan *workflow scrubber* sudah sesuai,
4. Pada perhitungan ekonomis, penggunaan bahan bakar HFO yang dilengkapi *scrubber* lebih murah dari LSHFO dengan perbandingan biaya pertahunnya yaitu Rp 3,385,666,694,

#### **6.2. Saran**

Setelah dilakukan percobaan dan penelitian maka saran dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Perlunya dilakukan perhitungan secara mendetail lagi agar penggunaan *scrubber* lebih optimal.
2. Analisis teknis yang lebih detail pada *Marine Scrubber* perlu dilakukan seperti estimasi kebutuhan tangki, total perpipaan yang dibutuhkan, sistem kelistrikan, dll agar sistem *scrubber* yang dipilih lebih tepat dan ekonomis.

Halaman ini sengaja dikosongkan

## DAFTAR PUSTAKA

- Lathinen, J. M. (2016). *Closed-loop Exhaust Gas Scrubber Onboard a Merchant Ship - Technical, Economical, Environmental and Operational Viewpoints*. Vaasa: University of Vaasa.
- Babicz, Jan. 2015 *Encyclopedia of Ship Technology*, Helsinki: Wartsila.
- MAN. (2015). *Marine Engine IMO Tier II and Tier III Programme 2015*.
- Parsons, M. G. (n.d.). *Parametric Design*.
- Ship and Bunker*. (2019). Retrieved January 22, 2020, from <http://www.shipandbunker.com>
- Shu, S.-T. (2013). *A Life Cycle Cost Analysis of Marine Scrubber Technologies*. Szczecin: University of Rostock.
- Wartsila. (2013). *Exhaust Gas Cleaning Presentation*.
- Wartsila Corporation. *Wärtsilä I-SOx scrubber system*. Retrieved January 5, 2020, from <https://www.wartsila.com>
- Sunarjo, F.J. (2015). Thesis. Use of *Scrubber* Abroad Ships to Reduce the Sulfonic Acid Emissions”, Jurusan Sistem Perkapalan, Surabaya: ITS.
- Marine Insight. *Exhaust gas system of main engine on ship*. Retrieved July 10, 2020, from <https://www.marineinsight.com/>



## LAMPIRAN

Lampiran A *Layout* kamar mesin yang telah dilengkapi *scrubber*

Lampiran B Perhitungan Teknis

Lampiran C Parameter *cost estimation scrubber system* (Lathinen, 2016)

Lampiran D *Cost estimation closed-loop scrubber system*

Lampiran E SE Ditjen Perhubungan Laut SE. 35 tahun 2019

**LAMPIRAN A**  
***LAYOUT KAMAR MESIN YANG TELAH***  
***DILENGKAPI SCRUBBER***





**LAMPIRAN B**  
**PERHITUNGAN TEKNIS**

### Main Dimensions

Ukuran Kapal Hasil Regresi (m)			
Length Between Perpendiculars (Lpp)	=	$0,0025x + 91,49$	
	=	113.776	m
Breadth (B)	=	$0,0004x + 15,554$	
	=	23.034	m
Height (H)	=	$0,0003x + 7,404$	
	=	13.014	m
Draught (T)	=	$0,0002x + 5,3435$	
	=	7.12638	m
Freeboard	=	5.88762	m

Batasan Ukuran			
Perbandingan	Nilai	Persyaratan	Keterangan
L/B	4.939	$3,5 < L/B < 10$	Accepted
B/T	3.232	$1,8 < B/T < 5$	Accepted
L/T	15.965	$10 < L/H < 30$	Accepted
L/H	8.743	$8,12 < L/H < 15,48$	Accepted
B/H	1.770	$1,47 < B/H < 2,38$	Accepted

#### References

*Principle of Naval Architecture Vol.I page 19*

*Principle of Naval Architecture Vol.I page 20*

*Principle of Naval Architecture Vol.I page 21*

*Longitudinal Strenght*

*Stability*

Final Ship Main Dimensions			
Lpp	=	142.20	m
B	=	23.25	m
H	=	10.50	m
T	=	6.50	m
Freeboard	=	4.00	m

#### Menyesuaikan

Batasan Ukuran			
Perbandingan	Nilai	Persyaratan	Keterangan
L/B	6.116	$3,5 < L/B < 10$	Accepted
B/T	3.577	$1,8 < B/T < 5$	Accepted
L/T	21.877	$10 < L/H < 30$	Accepted
L/H	13.543	$8,12 < L/H < 15,48$	Accepted
B/H	2.214	$1,47 < B/H < 2,38$	Accepted

#### References

*Principle of Naval Architecture Vol.I page 19*

*Principle of Naval Architecture Vol.I page 20*

*Principle of Naval Architecture Vol.I page 21*

*Longitudinal Strength*

*Stability*

## Coefficients

Input Data :

Lpp = 142.20 m	T/H = 0.61904762
B = 23.25 m	Vs = 13 knots
H = 10.50 m	= 6.6872 m/s
T = 6.50 m	$\gamma$ = 1025 kg/m <sup>3</sup>
Lpp/B = 6.116	g = 9.81 m/s <sup>2</sup>
B/T = 3.577	

**Length On Waterline**

$$Lwl = 1,04 \times Lpp \quad m$$

$$= 147.888 \quad m$$

*(Principle of Naval Architecture Vol. II p. 154)*

***Lpp = 96% Lwl***

**Froude Number**

$$Fn = \frac{Vs}{\sqrt{g \cdot Lwl}}$$

$$= 0.176 \quad [0,15 \leq Fn \leq 0,24]$$

*(Principle of Naval Architecture Vol. II p. 154)*

**Block Coefficient (Cb)**

$$Cb = -4,22 + 27,8 \sqrt{Fn} - 39,1 Fn + 46,6 Fn^3$$

$$= 0.816$$

*(Parametric Design p. 11-11) (Schneekluth)*

**Midship Coefficient (Cm)**

$$Cm = 0,977 + 0,085 (Cb - 0,6)$$

$$= 0.995$$

*(Parametric Design p. 11-12) (Series 60 Hull)*

**Waterplan Coefficient**

$$Cwp = Cb / (0,471 + 0,551 \cdot Cb)$$

$$= 0.886$$

*(Parametric Design p. 11-16) (Table 11.V)*

**Longitudinal Center of Bouyancy (LCB)**

$$LCB = 8.80 - 38.9 Fn$$

%Lwl, LCB dari	
= 1.970 Midship	= 3.95156736 Midship

$$= \frac{Lpp}{2} + LCB\% \cdot Lwl$$

$$= 74.014 \quad m, \text{ LCB dari AP}$$

$$50.047\%$$

*(Parametric Design p. 11-19) (Formula 33)*

**Prismatic Coefficient**

$$Cp = \frac{\nabla}{A_M \cdot L}$$

$$= Cb/Cm$$

$$= 0.820$$

**Displacement****(Parametric Design p. 11-4) (Formula 1)**

$$\begin{aligned} & \nabla \\ (m^3) \nabla & \text{ saat sarat} \\ & = L * B * T * C_b \\ & = 18235.271 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta (\text{ton}) & \text{ saat sarat} \\ \Delta & = L * B * T * C_b * \gamma \\ & = 18691.1526 \text{ ton} \end{aligned}$$

**Longitudinal Center of Gravity (LCG)****(Parametric Design p. 11-4) (Formula 51)**

$$\begin{aligned} \text{LCG} & = -0.15 + \text{LCB} \\ & = 1.820 \text{ \%Lwl, LCG dari Midship} \\ & = 73.792 \text{ m, LCG dari AP} \end{aligned}$$

## Total Weight and Total Centers Estimation

### Light Weight Tonnes (LWT)

#### • Steel Weight

$W_{ST} =$	5017.000	ton
$VCG =$	4.878	m
$LCG \text{ dr AP} =$	73.792	m

#### • Machinery Weight

$W_M =$	79.000	ton
$VCG =$	3.738	m
$LCG \text{ dr AP} =$	20.000	m

#### • Scrubber Weight

$W_M =$	25.000	ton
$VCG =$	41.000	m
$LCG \text{ dr AP} =$	7.200	m
Total LWT =	5096.000	ton
Total LWT with <i>Scrubber</i> =	5121.000	ton

### Dead Weight Tonnes (DWT)

#### • Deadweight

$DWT =$	13200	ton
$DWT\text{-}Scrubber \text{ unit} =$	13175	ton
$VCG =$	6.000	m
$LCG \text{ dr AP} =$	78.210	m
Total DWT with <i>scrubber</i> =	13175.000	ton

### Total Weight

$LWT + DWT =$	18296.000	ton
$VCG \text{ Total} =$	5.68	m
$LCG \text{ Total (dr AP)} =$	76.7472	m

### Total Weight with Scrubber

$LWT + DWT =$	18296.000	ton
$VCG \text{ Total} =$	5.74	m
$LCG \text{ Total (dr AP)} =$	76.7571	m

## Trim Calculation

Chapter 11 Parametric Design , Michael G. Parsons

### Input Data

L =	142.200	m	Disp =	18235.27	m <sup>3</sup>
B =	23.250	m	KG =	5.68	m <sup>3</sup>
T =	6.500	m	LCG dr AP =	76.7472	m
Cm =	0.995		LCB dr AP =	74.014	m
Cb =	0.816				
Cwp =	0.886				

### Hydrostatic Properties

#### KB

$$\begin{aligned}KB/T &= 0.90 - 0.30 \cdot C_m - 0.1 \cdot C_b \\ &= 0.5198 \\ KB &= 3.38 \quad m\end{aligned}$$

#### BM<sub>T</sub>

$$\begin{aligned}C_{IT} &= 0.1216 \cdot C_{wp} - 0.0410 \\ &= 0.0678 \\ I_T &= C_{IT} \cdot L \cdot B^3 \\ &= 121118.8 \\ B_{MT} &= \text{jarak antara titik tekan buoyancy terhadap titik metacenter secara melintang} \\ B_{MT} &= I_T / \text{vol} \\ &= 6.64 \quad m\end{aligned}$$

#### BM<sub>L</sub>

$$\begin{aligned}C_{IL} &= \text{longitudinal inertia coefficient} \\ C_{IL} &= 0.350 \cdot C_{wp}^2 - 0.405 \cdot C_{wp} + 0.146 \\ &= 0.0620 \\ I_L &= \text{moment of inertia of waterplane relative to ship's longitudinal axis} \\ I_L &= C_{IL} \cdot B \cdot L^3 \\ &= 4143969 \quad m^4 \\ B_{ML} &= \text{jarak antara titik tekan buoyancy terhadap titik metacenter secara memanjang} \\ B_{ML} &= I_L / \text{vol} \\ &= 227.25 \quad m \\ \mathbf{GM}_L &= B_{ML} + KB - KG \\ &= 224.95 \quad m\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mathbf{Ta - Tf} &= (LCG - LCB) \cdot L / \mathbf{GM}_L \\ &= 1.728 \quad m\end{aligned}$$

Kondisi trim = **Trim by Stern**

## Trim Calculation with Scrubber

Chapter 11 Parametric Design , Michael G. Parsons

### Input Data

L =	142.200	m	Disp =	18235.27	m <sup>3</sup>
B =	23.250	m	KG =	5.74	m <sup>3</sup>
T =	6.500	m	LCG dr AP =	76.7571	m
Cm =	0.995		LCB dr AP =	74.014	m
Cb =	0.816				
Cwp =	0.886				

### Hydrostatic Properties

#### KB

$$\begin{aligned}KB/T &= 0.90 - 0.30 \cdot C_m - 0.1 \cdot C_b \\ &= 0.5198 \\ KB &= 3.38 \quad m\end{aligned}$$

#### BM<sub>T</sub>

$$\begin{aligned}C_{IT} &= 0.1216 \cdot C_{wp} - 0.0410 \\ &= 0.0678 \\ I_T &= C_{IT} \cdot L \cdot B^3 \\ &= 121118.8\end{aligned}$$

$B_{MT}$  = jarak antara titik tekan buoyancy terhadap titik metacenter secara melintang

$$\begin{aligned}B_{MT} &= I_T / \text{vol} \\ &= 6.64 \quad m\end{aligned}$$

#### BM<sub>L</sub>

$C_{IL}$  = longitudinal inertia coefficient

$$\begin{aligned}C_{IL} &= 0.350 \cdot C_{wp}^2 - 0.405 \cdot C_{wp} + 0.146 \\ &= 0.0620\end{aligned}$$

$I_L$  = moment of inertia of waterplane relative to ship's longitudinal axis

$$\begin{aligned}I_L &= C_{IL} \cdot B \cdot L^3 \\ &= 4143969 \quad m^4\end{aligned}$$

jarak antara titik tekan buoyancy terhadap titik metacenter secara

$B_{ML}$  = memanjang

$$\begin{aligned}B_{ML} &= I_L / \text{vol} \\ &= 227.25 \quad m\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}GM_L &= B_{ML} + KB - KG \\ &= 224.89 \quad m\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Ta - Tf &= (LCG - LCB) \cdot L / GM_L \\ &= 1.734 \quad m\end{aligned}$$



Kondisi *trim* = **Trim by Stern**

Perbedaan *trim* = 0.01 m = 0.66512 cm

## Freeboard Calculation

*International Convention on Load Lines, 1966 and Protocol of 1988*

Input Data :

L =	142.20	m		l <sub>poop</sub> =	24.60	m
B =	23.25	m		l <sub>FC</sub> =	9.00	m
D =	10.50	m		S =	l <sub>poop</sub> + l <sub>FC</sub>	
d <sub>1</sub> =	85% Moulded Depth			=	33.60	m
=	8.93	m		T =	6.50	m
C <sub>B</sub> =	0.82			T =	6.51	m
Ship type = Type B						

Calculation :

Length (m)	Freeboard (mm)
142	2151

- Tabular Freeboard

$$FB = 2151.00 \text{ mm}$$

- Correction

1. Length

Because L<sub>pp</sub> > 100, no correction of length needed

$$FB_1 = 2151.00 \text{ mm}$$

2. C<sub>B</sub> correction

$$\text{factor} = (C_B + 0.68)/1.36$$

$$\text{factor} = 1.099934806$$

$$FB_2 = 2365.959768 \text{ mm}$$

3. Depth correction

For ship with D < L/15 no correction needed ; If D > L/15 correction is needed as :

$$D = 10.50 \text{ m}$$

$$L = 142.20 \text{ m}$$

$$L/15 = 9.48$$

$$FB_3 = R(D-L/15) \text{ [mm]}$$

$$R = 250 \text{ (R=250 ft ; L>120m) (R=L/0.48 ; L<120m)}$$

$$(D-L/15)R = 255.00 \text{ mm}$$

$$FB_3 = 2620.96 \text{ mm}$$

#### 4. Deduction of Superstructure

Length (m)	$h_{\text{Superstructure}}$ (m)
75	1.8
125	2.3

##### Forecastle

$$\begin{aligned}
 l_{FC} &= 9.00 \text{ m} \\
 h_{sFC} &= 2.47 \text{ m} \\
 h_{FC} &= 2.30 \text{ m} \\
 l_{sFC} &= 8.37 \text{ m}
 \end{aligned}$$

##### Poop

$$\begin{aligned}
 l_{\text{poop}} &= 24.60 \text{ m} \\
 h_{s\text{poop}} &= 2.47 \text{ m} \\
 h_{\text{poop}} &= 2.3 \text{ m} \\
 l_{s\text{poop}} &= 22.89 \text{ m}
 \end{aligned}$$

##### Effective Length Super Structure

$$\begin{aligned}
 E &= l_{sFC} + l_{s\text{poop}} \\
 &= 31.26 \text{ m} \\
 E[x.L] &= 0.220 \text{ Lpp} \\
 \%FB &= 21\% \text{ Lpp}
 \end{aligned}$$

##### Superstructure

Total Effective Length of Superstructures						
L	0	0.1L	0.2L	0.3L	0.4L	0.5L
%	0	5	10	15	23.5	32

$$FB_4 = 2346 \text{ mm}$$

#### 5. Sheer correction

Karena sheer standard, tidak perlu mengoreksi sheer

$$FB_5 = 2345.76 \text{ mm}$$

##### Total Freeboard

$$\begin{aligned}
 FB' &= FB_5 \\
 FB' &= 2345.76 \text{ mm} \\
 FB' &= 2.35 \text{ m}
 \end{aligned}$$

##### • Minimum Bow height

$$\begin{aligned}
 C_B \text{ to upper deck} &= \\
 C_B/L * B * d_1 &= 0.816 \\
 B_{WM} &= 56L \left( 1 - \frac{L}{500} \right) \left( \frac{1.36}{C_b + 0.68} \right)
 \end{aligned}$$

$$B_{WM} = 5180.73 \text{ mm}$$

$$B_{WM} = 5.18 \text{ m}$$

- *Freeboard* Boundary Condition

Actual *Freeboard* (Summer)

$$FB_a = H - T$$

$$FB_a = 4.00 \text{ m}$$

$$FB' = 2.35 \text{ m}$$

ACCEPTED

( $FB_a - FB'$ ) Summer Condition

*Freeboard* with Scrubber

$$3.99 \text{ m}$$

$$2.35 \text{ m}$$

ACCEPTED

Actual *Freeboard* (Winter)

$$FB_a = H - T$$

$$FB_a = 4.00 \text{ m}$$

$$FB' = 2.39 \text{ m}$$

ACCEPTED

( $FB_a - FB'$ ) Winter Condition

$$3.99 \text{ m}$$

$$2.39462897$$

ACCEPTED

- Minimum Bow Height

$$FB_a + Sf + h_{FC} = 9.17 \text{ m}$$

ACCEPTED

Bow Height Minimum Condition

$$9.16 \text{ m}$$

ACCEPTED

**Displacement  
and Total  
Weight**

LWT				
	Sebelum Dilengkapi <i>Scrubber</i>		Setelah Dilengkapi <i>Scrubber</i>	
Total LWT	5096.000	ton	5121.000	ton

DWT				
Total DWT	13200.000	ton	13175.000	ton

Boundary Condition				
Total weight	18296.000	ton	18296.000	ton
Displacement	18691.153	ton	18691.153	ton
Margin	2.11412%	<b>OK</b>	2.11412%	<b>OK</b>

**Trim**

Trim				
	Sebelum dilengkapi <i>Scrubber</i>		Setelah dilengkapi <i>Scrubber</i>	
<i>Trim</i>	1.727794175	m	1.734445374	m
Kondisi <i>Trim</i>	<i>Trim</i> by Stern		<i>Trim</i> by Stern	
Perbedaan <i>Trim</i>	0.006651199	m		

**Freeboard**

Freeboard						
	Sebelum dilengkapi <i>Scrubber</i>			Setelah dilengkapi <i>Scrubber</i>		
<i>Freeboard</i> Requirement	2.35	meter	<b>OK</b>	2.35	meter	<b>OK</b>
<i>Freeboard</i> Actual	4.00	meter		3.99	meter	
Minimum Bow Height	5.18	meter	<b>OK</b>	5.18	meter	<b>OK</b>
Actual Bow Height	9.17	meter		9.16	meter	



**LAMPIRAN C**  
**PARAMETER *COST ESTIMATION SCRUBBER SYSTEM***  
**(LATHINEN, 2016)**

Term	Symbol	Unit	Formula	Note
<b>Scrubber savings</b>	A	€/MWh	$A = F - B$	Savings minus expenses
<b>Fuel cost savings</b>	F	€/MWh	$F = G - H$	MGO-HFO
<b>Marine gas oil cost</b>	G	€/MWh	$G = re(1 + \frac{M}{100})$	-
Marine gas oil average specific consumption	r	kg/MWh	$r = \frac{40.71}{42.93} r_1$	Heat value correction
Low sulphur fuel oil price	e	€/kg	-	0.4-0.8 €/kg
Gas oil cooling energy cost (electricity)	M	%	-	0.18% of the MGO cost
<b>Heavy fuel oil cost</b>	H	€/MWh	$H = r_1 e_1 (1 + S/100)$	-
Heavy fuel oil average specific consumption	r <sub>1</sub>	kg/MWh	-	Table 6.3
Heavy fuel oil price	e <sub>1</sub>	€/kg	-	0.2-0.52 €/kg
Scrubber ship additional energy consumption (electricity)	S	%	-	1.08% of the HFO consumption
<b>Additional expenses</b>	B	€/MWh	$B = d + i + l$	-
<b>Direct costs</b>	d	€/MWh	$d = d_3 + d_4 + d_5$	-
Sludge cost	d <sub>3</sub>	€/MWh	$d_3 = r_3 e_3$	-
Sludge production	r <sub>3</sub>	kg/MWh	-	0.24 kg/MWh
Sludge treatment cost	e <sub>3</sub>	€/kg	-	0.2 €/kg including truck transport
Alkali cost	d <sub>4</sub>	€/MWh	$d_4 = r_4 e_4$	-
Alkali price	r <sub>4</sub>	€/kg	-	0.36 €/kg
Alkali consumption	e <sub>4</sub>	kg/MWh	-	12 kg/MWh
Service cost	d <sub>5</sub>	€/MWh	$d_5 = (r_5 + r_6)/e_5 + r_7$	-
Maintenance costs	r <sub>5</sub>	€	-	20 000 € per year
Labour costs	r <sub>6</sub>	€	-	25 000 € per year
Main engine energy production per year	e <sub>5</sub>	MWh	-	4 270-163 000 MWh
Main engine extra maintenance due to HFO use	r <sub>7</sub>	€/MWh	-	0.19 €/MWh



<b>Indirect costs</b>	<i>i</i>	€/MWh	$i = i_1 + i_2 + i_3$	-
Resistance cost	$i_1$	€/MWh	$i_1 = H(a-1)$	-
Increased relative power	<i>a</i>	-	$a = \sqrt[3]{1 + \left(\frac{w}{W}\right)}$	-
Ship loaded weight	<i>W</i>	ton	$W = nw_4 + w_5 + w_6$	No scrubber
Capacity utilization factor	<i>n</i>	-	-	0.9-1.0
Ship max. payload	$w_4$	ton	-	Table 6.4
Ship light weight	$w_5$	ton	-	Table 6.4
Weight of consumables	$w_6$	ton	$w_6 = 0.03w_4$	-
Scrubber operational weight	<i>w</i>	ton	$w = w_1 + w_2 + w_3$	-
Scrubber light weight	$w_1$	ton	$w_1 = 10.4P$	-
Main engine nominal power	<i>P</i>	MW	-	IMO GHG study
Fresh water weight	$w_2$	ton	$w_2 = 0.048r_2P$	Two days consumption
Fresh water consumption	$r_2$	kg/MWh	-	131 kg/MWh
Alkali weight	$w_3$	ton	$w_3 = 0.34e_4P$	One week consumption
Heavy fuel heating cost	$i_2$	€/MWh	$i_2 = e_8G\left(\frac{365 - e_7}{365}\right)$	-
Time at sea per year	$e_7$	days	-	Table 6.3
HFO process and heating power	$e_8$	MW/MW	-	0.5%
Heavy fuel separation loss	$i_3$	€/MWh	$i_3 = 0.01H$	1%
<b>Lost income</b>	<i>l</i>	€/MWh	$l = Hn\frac{g}{m}$	Scrubber weight limits the max. cargo
Fuel cost factor	<i>m</i>	%	$m = 40 + 24\frac{e_5}{250\,000}$	-
Cargo capacity reduction factor	<i>g</i>	%	$g = 100\frac{w}{w_4}$	-



**LAMPIRAN D**  
***COST ESTIMATION CLOSED-LOOP SCRUBBER SYSTEM***

# Cost Estimation

## Scrubber Closed-loop System

\*Based on Closed-loop Exhaust Gas Scrubber Onboard a Merchant Ship (Jari M. Lathinen)

### Initial Data

Total Annual FO Consumptions	=	1155.0	ton
Total Annual FO Consumptions at Sea	=	462.0	ton
Total Annual FO Consumptions at Port	=	693.0	ton
Total ME Running Hours	=	7920.0	hrs
Total ME Running Hours at Sea	=	3564.0	hrs
Total Hours at Port	=	4356.0	hrs
HFO Price	= Rp	6,769,492	/ ton
LSHFO Price	= Rp	10,985,494	/ ton
Caustic Soda Price	= Rp	4,465,798	/ ton
M/E Power (Mitsubishi 6uec33lse-c2)	=	3.99	MW
Operational time		330	days/year

### Fuel Cost

#### Heavy Fuel Oil Cost

HFO Ave. Specific Consumptions	=	66.351	kg / MWh
HFO Price	= Rp	6,769	/ kg
Add. Energy Cons. due to Scrubber	=	0.717	%
HFO Cost	= Rp	452,383	/ MWh
	= Rp	14,295,669,520	/ Year

#### Ultra Low Sulfur Heavy Fuel Oil Cost

LSHFO Ave. Specific Consumptions	=	62.920	kg / MWh
LSHFO Price	= Rp	10,985	/ kg
Add. Energy Cons. due to Scrubber	=	0.180	%

#### Ultra Low Sulfur Heavy Fuel Oil Cost

Investment cost	= Rp	-	
LSHFO Cost	= Rp	704,227	/ MWh
	= Rp	22,254,140,557	/ Year

### Scrubber Operational Cost

#### Direct Cost

##### Sludge Cost

Sludge Production	=	0.240	kg / MWh
Sludge Treatment Cost	= Rp	3,355	/ kg
Sludge Cost	= Rp	805	/ MWh

##### Alkali Cost

Alkali Price (Caustic Soda)	= Rp	4,466	/ kg
Alkali Consumptions	=	12	kg / MWh
Alkali Cost	= Rp	58,949	/ MWh

##### Service Cost

Maintenance Cost	= Rp	335,522,000	/ year
------------------	------	-------------	--------

Labour Cost	=	Rp	419,402,500	/ year
M/E Energy Production / year	=		31600.8	MWh
M/E Extra Maintenance due to HFO Use	=	Rp	3,187	/ MWh
Service Cost	=	Rp	27,077	/ MWh
<b>Direct Cost</b>	=	Rp	84,625	/ MWh
<b>Indirect Cost</b>				
<b>Resistance Cost</b>				
Increased Relative Power	=		1.002	
Ship Loaded Weight	=		11822.32	ton
Capacity Utilization Factor	=		0.8	
Ship Maximum Payload	=		8104.000	ton
Ship Lightweight	=		5096	ton
Weight of Consumables	=		243.12	ton
Scrubber Operational Weight	=		82.86432	ton
Scrubber Lightweight	=		41.496	ton
M/E Nominal Power	=		3.99	MW
Fresh Water Weight	=		25.08912	ton
Fresh Water Consumption	=		131	kg / MWh
Alkali Weight	=		16.2792	ton
Resistance Cost	=	Rp	1,054	/ MWh
<b>Heavy Fuel Heating Cost</b>				
Time at Sea per year	=		148.500	days
HFO Process and Heating Power	=		0.5%	
Heavy Fuel Heating Cost	=	Rp	2,089	/ MWh
<b>Heavy Fuel Separation Loss</b>				
Heavy Fuel Separation Loss	=	Rp	4,524	/ MWh
<b>Indirect Cost</b>	=	Rp	7,667	/ MWh
<b>Lost Income</b>				
Fuel Cost Factor	=		43.034	%
Cargo Capacity Reduction Factor	=		1.023	%
<b>Lost Income</b>	=	Rp	8,599	/ MWh
<b>Total operational cost</b>	=	Rp	3,188,246,562	/ Year

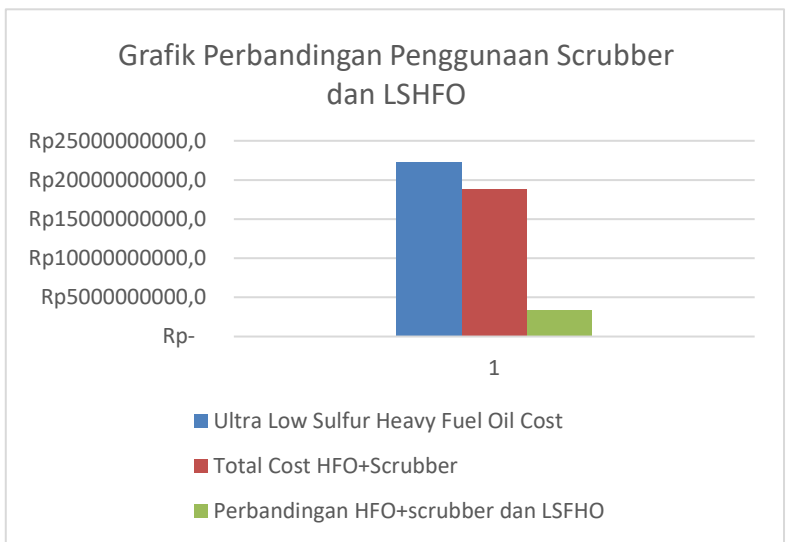
<b>Investment Cost</b>				
Scrubber Cost	=	Rp	25,164,150,000	
Instalation Cost	=	Rp	13,420,880,000	
Shipyards Cost	=	Rp	182,587,860	
<b>Total</b>	=	Rp	38,767,617,860	
Yearly Cost	=	Rp	1,384,557,781	/ Year

<b>Total Cost HFO+Scrubber</b>				
Investment cost (scrubber unit + instalation + modification cost in shipyard)	=	Rp	38,767,617,860	
Investment cost / year	=	Rp	1,384,557,781	/ Year
Biaya Operasional Scrubber (maintenance + consumable)	=	Rp	3,188,246,562	/ Year
HFO Cost	=	Rp	452,383	/ MWh
	=	Rp	14,295,669,520	/ Year

Total cost	=	Rp	18,868,473,863	/ Year
------------	---	----	----------------	--------

<b>Scrubber Saving</b>				
Perbandingan HFO+scrubber dan LSHFO	=	Rp	3,385,666,694	/ year

<b>Conclusion</b>				
Ultra Low Sulfur Heavy Fuel Oil Cost	=	Rp	22,254,140,557	/ year
Total Cost HFO+Scrubber	=	Rp	18,868,473,863	/ year
Perbandingan HFO+scrubber dan LSFHO	=	Rp	3,385,666,694	/ year



**LAMPIRAN E**  
**SURAT EDARAN DITJEN PERHUBUNGAN LAUT SE. 35**  
**TAHUN 2019**



**KEMENTERIAN PERHUBUNGAN  
DIREKTORAT JENDERAL PERHUBUNGAN LAUT**

JL. MEDAN MERDEKA BARAT No. 8  
JAKARTA - 10110

TELP : (021) 3813269, 3842440  
FAX : (021) 3811786, 3845430  
EMAIL : djpl@dephub.go.id

IG : @djplkemenhub151  
FB : Ditjen Perhubungan Laut  
Twitter : @djplkemenhub151

**SURAT-EDARAN**

Nomor : **SE. 35 TAHUN 2019**

**TENTANG**

**KEWAJIBAN PENGGUNAAN BAHAN BAKAR LOW SULFUR DAN  
LARANGAN MENGANGKUT ATAU MEMBAWA BAHAN BAKAR  
YANG TIDAK MEMENUHI PERSYARATAN  
SERTA PENGELOLAAN LIMBAH HASIL RESIRKULASI GAS BUANG DARI KAPAL**

1. Menunjuk:
  - a. *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL Convention) Annex VI Regulation 14;*
  - b. *IMO Resolution Marine Environment Protection Committee (MEPC) 307(73) : 2018 Guidelines for the Discharge of Exhaust Gas Recirculation (EGR) Bleed-Off Water;*
  - c. Pasal 36 Peraturan Menteri Perhubungan Nomor PM 29 Tahun 2014 tentang Pencegahan Pencemaran Lingkungan Maritim; dan
  - d. Surat Edaran Direktur Jenderal Perhubungan Laut Nomor UM.003/93/14/DJPL-18 tanggal 30 Oktober 2018 tentang Batasan Kandungan Sulfur Pada Bahan Bakar dan Kewajiban Penyampaian Konsumsi Bahan Bakar di Kapal.
2. Sehubungan dengan hal tersebut butir 1 (satu) di atas, bersama ini disampaikan sebagai berikut:
  - a. Kapal berbendera Indonesia dan kapal berbendera asing yang beroperasi di wilayah perairan Indonesia wajib menggunakan bahan bakar dengan kandungan sulfur dengan nilai maksimal 0,5 % m/m;
  - b. Kapal berbendera Indonesia dan kapal berbendera asing yang akan menggunakan bahan bakar sebagaimana dimaksud pada huruf a, agar melakukan pembersihan tangki bahan bakar, sistem perpipaan dan perlengkapan lainnya yang terkait untuk memastikan kebersihan dari sisa atau endapan bahan bakar sebelumnya (bahan bakar dengan kandungan sulfur lebih besar dari 0,5 % m/m) dan mengembangkan rencana penerapan di kapal (*ship implementation plan*) sesuai pedoman *IMO MEPC. 1/Circ 878*;
  - c. Kapal berbendera Indonesia yang masih menggunakan bahan bakar dengan kandungan sulfur lebih besar dari 0,5 % m/m, agar dilengkapi dengan Sistem Pembersihan Gas Buang (*Exhaust Gas Cleaning System/ Scrubber*) dengan jenis yang disetujui oleh Direktur Jenderal Perhubungan Laut;
  - d. Ketentuan sebagaimana dimaksud pada huruf a, huruf b, dan huruf c mulai berlaku pada tanggal 1 Januari 2020 dan kapal berbendera Indonesia dapat dibebaskan dari kewajiban dimaksud apabila untuk alasan keselamatan kapal, atau bagi kapal yang melakukan uji coba berlayar untuk pengembangan teknologi pengurangan emisi gas buang berdasarkan ijin dari Direktur Jenderal;
  - e. Kapal berbendera Indonesia yang berlayar Internasional dilarang mengangkut atau membawa bahan bakar dengan kandungan sulfur lebih besar dari 0,5 % m/m untuk sistem propulsi/ penggerak atau bahan bakar untuk operasi peralatan lainnya di atas kapal mulai tanggal 1 Maret 2020, larangan ini tidak berlaku untuk kapal yang menggunakan metode alternatif (misalnya menggunakan sistem pembersihan gas buang) yang disetujui berdasarkan peraturan 4.1 Annex VI Konvensi MARPOL.

*"Mentaati Peraturan Pelayaran Berarti Mendukung Terciptanya Keselamatan Berlayar"*



- f. Kapal berbendera Indonesia yang berlayar Internasional yang menggunakan Sistem Pembersihan Gas Buang (*Exhaust Gas Cleaning System/ Scrubber*) tipe *open loop* untuk Resirkulasi Gas Buang (*Exhaust Gas Recirculation/ EGR*) agar memperhatikan ketentuan di negara tujuan dikarenakan beberapa negara telah melarang penggunaan Sistem Pembersihan Gas Buang (*Exhaust Gas Cleaning System/ Scrubber*) tipe *open loop* dimana pembuangan limbah hasil resirkulasi sistem gas buang dari mesin di kapal dibuang secara langsung diperairan melainkan harus disimpan dalam tangki penampung di atas kapal untuk selanjutnya dibuang melalui fasilitas penerima (*reception facility*) yang tersedia di pelabuhan.
- g. Untuk kapal berbendera Indonesia dan kapal berbendera asing yang akan menggunakan bahan bakar dengan kandungan sulfur maksimal 0,5% m/m, bahan bakar dimaksud tersedia di pelabuhan Tanjung Priok Jakarta atau di *Floating Storage* Teluk Balikpapan atau pelabuhan lainnya yang sudah menyediakan mulai tanggal 1 Januari 2020.
3. Demikian surat edaran ini dibuat, agar Para Kepala Kantor Kesyahbandaran Utama, Para Kepala Kantor Kesyahbandaran dan Otoritas Pelabuhan, Kepala Kantor Kesyahbandaran dan Otoritas Pelabuhan Khusus Batam dan Para Kepala Unit Penyelenggara Pelabuhan dapat menyampaikan kepada seluruh *stakeholder* terkait di wilayah kerja masing-masing serta melakukan pengawasan terhadap pemberlakuannya.

Ditetapkan di : JAKARTA  
pada tanggal : 18 OKTOBER 2019

DIREKTOR JENDERAL PERHUBUNGAN LAUT



R. AGUS H. PURNOMO



## BIODATA PENULIS



Deni Nabil Sulthon, itulah nama lengkap penulis. Dilahirkan di Jombang pada 2 Februari 1997 silam, Penulis merupakan anak pertama dalam keluarga. Penulis menempuh pendidikan formal tingkat dasar pada TK Tunas Rimba, kemudian melanjutkan ke SDN Kadipaten II, SMPN 1 Bojonegoro dan SMAN 1 Bojonegoro. Setelah lulus SMA, Penulis diterima di Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS pada tahun 2015 melalui jalur SBMPTN.

Di Departemen Teknik Perkapalan Penulis mengambil Bidang Studi Rekayasa Perkapalan – Hidrodinamika Kapal. Selama masa studi di ITS, selain kuliah Penulis juga pernah menjadi Kepala Divisi Alumni Departemen Hubungan Luar HIMATEKPAL ITS 2018/2019 serta Bendahara As-Shafiinah 2018/2019. Selan itu, Penulis juga pernah menjadi OC ITS Mengajar 2017/2018.

Email: [deni.nabil15@mhs.na.its.ac.id](mailto:deni.nabil15@mhs.na.its.ac.id)/[deninabils@gmail.com](mailto:deninabils@gmail.com)