

**SKRIPSI**

**PENGARUH BENTUK UJUNG TEPI GELADAK  
PENAMPANG *DOUBLE HULL OIL TANKER***

**Disusun dan diajukan oleh:**

**NUR ALIFYA IQRANI  
D081 19 1049**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK KELAUTAN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2023**

**LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**

**PENGARUH BENTUK UJUNG TEPI GELADAK PENAMPANG  
DOUBLE HULL OIL TANKER**

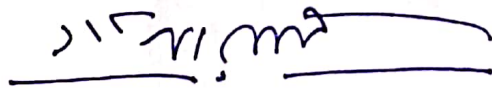
Disusun dan diajukan oleh

**NUR ALIFYA IQRANI  
D081 19 1049**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka  
Penyelesaian Studi Program Sarjana pada Program Studi Teknik Kelautan  
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin  
Pada tanggal .....  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

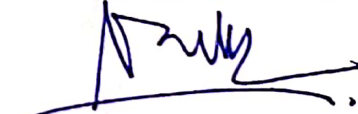
Menyetujui,

Pembimbing Utama,



**Muhammad Zubair Muis Alie, ST., MT., Ph. D.**  
NIP. 19760606 200501 1003

Pembimbing Pendamping,



**Ir. Juswan, MT.**  
NIP. 19621231 198903 1031



**Dr. Ir. Chairul Paotonan, ST., MT**  
NIP. 19750605 200212 1003

## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Nur Alifya Iqrani  
NIM : D081191049  
Program Studi : Teknik Kelautan  
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul "Pengaruh Bentuk Ujung Tepi Geladak Penampang *Double Hull Oil Tanker*" Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

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

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

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

Gowa, 15 Mei 2023

Yang Menyatakan  
Tanda tangan



Nur Alifya Iqrani

## ABSTRAK

**NUR ALIFYA IQRANI.** *Pengaruh Bentuk Ujung Tepi Geladak Penampang Double Hull Oil Tanker* (dibimbing oleh **Muhammad Zubair Muis Alie** dan **Juswan**)

Dalam desain dan pembuatan kapal, salah satu aspek terpenting adalah desain strukturnya. Konstruksi kapal harus mampu menahan beban yang bekerja pada kapal baik dalam kondisi normal maupun ekstrim. Permasalahan yang sering terjadi pada kapal adalah kerusakan akibat benturan, kandas, korosi, dan lain sebagainya. Dalam perkembangan teknologi konstruksi kapal, desain dan material sangat diperhatikan oleh perusahaan galangan kapal dalam merancang dan memproduksi kapal baru. Salah satunya adalah kekuatan di geladak kapal. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki tiga model kapal *double hull oil tanker*. Pada penelitian ini dilakukan analisis dengan menggunakan metode *Non-Linear Finite Element Analysis* (NLFEA) untuk mengetahui pengaruh bentuk sudut sisi geladak kapal *double hull oil tanker* terhadap kekuatan longitudinal. Analisis dilakukan pada bagian tengah kapal *double hull oil tanker* mengingat dengan satu ruang rangka dalam kondisi *hogging* dan *sagging*. *Multiple Point Constrained* (MPC) diadopsi untuk mendapatkan deformasi dan momen lentur vertikal versus hubungan kelengkungan. Ditemukan bahwa *ultimate strength* untuk model 1 lebih tinggi daripada model 2 dan model 3 karena konfigurasi bentuk sudut sisi geladak. Deformasi dan *ultimate strength* untuk 3 model kapal *double hull oil tanker* juga diplot dalam penelitian ini.

Kata Kunci: *double hull tanker*, penampang, ujung tepi geladak, *ultimate strength*, metode

## ABSTRACT

**NUR ALIFYA IQRANI.** *Effect of Deck Side Corner Shape of Double Hull Oil Tanker Cross Section* (supervised by **Muhammad Zubair Muis Alie** and **Juswan**)

In the design and manufacture of a ship, one of the most important aspects is design of the structure. Ship construction must be able to withstand the loads acting on the ship in both normal and extreme conditions. The problems that often occur in ships are damage caused by collisions, grounding, corrosion, and so on. In the development of ship construction technology, design and materials are highly considered by shipbuilding companies in the design and manufacture of new ships. One of them is the strength on the ship's deck. The objective of the present study is to investigate the three models of double hull oil tanker. In this study, an analysis was carried out using the Non-Linear Finite Element Analysis (NLFEA) method to determine the effect of the deck side corner shape of the double hull tanker toward the longitudinal strength. The analysis is carried out on a midship section of double hull oil tanker considering with one frame space under hogging and sagging conditions. The Multiple Point Constrained (MPC) is adopted to obtain deformation and vertical bending moment versus curvature relationship. It is found that the ultimate strength for model 1 is higher than model 2 and model 3 due to the deck side corner shape configuration. The deformation and the ultimate strength for 3 models of double hull oil tanker are also plotted in this study.

Keywords: double hull tanker, cross section, deck side corner shape, ultimate strength, FEM Method

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN .....	ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT .....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR .....	vii
DAFTAR TABEL .....	ix
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL .....	x
DAFTAR LAMPIRAN .....	xii
KATA PENGANTAR .....	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan masalah.....	2
1.3 Tujuan penelitian/perancangan .....	2
1.4 Manfaat penelitian/perancangan .....	3
1.5 Ruang lingkup/Asumsi perancangan .....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	4
2.1 Sejarah Kapal Tanker .....	4
2.2 Jenis Kapal Tanker .....	4
2.3 Konstruksi Kapal Tanker .....	7
2.4 Konstruksi <i>Single Hull</i> (SH) .....	7
2.5 Konstruksi <i>Double Hull</i> .....	9
2.6 Konstruksi Membujur ( <i>Longitudinal Framing System</i> ).....	11
2.7 Sistem Konstruksi Melintang .....	13
2.8 Sistem Konstruksi Kombinasi.....	13
2.9 Beban-Beban Pada Konstruksi Kapal.....	13
2.10 Beban Geladak Cuaca .....	14
2.11 Beban Luar Sisi Kapal .....	15
2.12 Beban Luar Alas Kapal .....	15
2.13 Tegangan yang Bekerja.....	16
2.14 Tegangan Normal .....	16
2.15 Tegangan Tarik ( <i>Tensile Stress</i> ) .....	17
2.16 Tegangan Tekan ( <i>Compressive Stress</i> ).....	18
2.17 Tegangan Geser ( <i>Shear</i> ) .....	18
2.18 Tegangan Lentur ( <i>Bending Stress</i> ) .....	19
2.19 Tegangan Luluh ( <i>Crushing/Bearing Stress</i> ) .....	19
2.20 Tegangan Izin Dasar.....	19
2.21 Regangan.....	20
2.22 Deformasi Material .....	22
2.23 <i>Single Point Constrained</i> (SPC) .....	23
2.24 <i>Multiple Point Constrained</i> (MPC) .....	23
2.25 Kekuatan Batas Kapal Tanker ( <i>Ultimate Strength</i> ) .....	24
2.26 Metode <i>Non Linear Finite Element Analysis</i> (NLFEA) .....	26
2.27 Pembebanan <i>Hogging</i> dan <i>Sagging</i> .....	30
BAB III METODE PENELITIAN .....	33
3.1 Jenis Penelitian.....	33
3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian .....	33
3.3 Penyajian Data .....	33
3.4 Analisa Data .....	33

BAB IV PEMBAHASAN .....	36
4.1 Objek Penelitian .....	36
4.2 Perhitungan Momen Lentur – Batas Vertikal .....	37
4.3 Tegangan Izin .....	39
4.4 Kekuatan Batas Momen Vertikal .....	40
4.5 Perbandingan kekuatan batas <i>Double Hull Tanker T2</i> dengan metode NLFEA .....	53
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	56
5.1 Kesimpulan .....	56
5.2 Saran .....	56
DAFTAR PUSTAKA .....	57
LAMPIRAN .....	60

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Kapal <i>Crude Oil Carriers</i> .....	5
<b>Gambar 2.2</b> Kapal <i>Chemical Tanker</i> .....	5
<b>Gambar 2.3</b> <i>Liquified Natural Gas (LNG) Tanker</i> .....	6
<b>Gambar 2.4</b> Konstruksi Kapal Tanker.....	7
<b>Gambar 2.5</b> <i>Single Hull Tanker</i> .....	8
<b>Gambar 2.6</b> Kapal <i>Double Hull Tanker</i> dengan Dua Sekat Memanjang .....	10
<b>Gambar 2.7</b> Kapal <i>Double Hull Tanker</i> dengan Satu Sekat Memanjang.....	10
<b>Gambar 2.8</b> <i>Double Hull Tanker</i> .....	11
<b>Gambar 2.9</b> Konstruksi Membujur pada Lambung dan Geladak Kapal.....	12
<b>Gambar 2.10</b> Tegangan-Regangan .....	17
<b>Gambar 2.11</b> Tegangan-Tarik.....	17
<b>Gambar 2.12</b> Tegangan-Tekan.....	18
<b>Gambar 2.13</b> Hubungan antara Tegangan dan Regangan.....	20
<b>Gambar 2.14</b> <i>Box Girder</i> Tanpa Elemen di Tengah Batang .....	24
<b>Gambar 2.15</b> Grafik Kekuatan Momen Lentur dan Kelengkungan .....	25
<b>Gambar 2.16</b> Kondisi syarat batas untuk kontrol kelengkungan.....	28
<b>Gambar 2.17</b> Model Material <i>Bilinear Isotropic Hardening</i> .....	29
<b>Gambar 2.18</b> Distribusi Beban, Gaya Geser, dan Momen Lentur pada Kapal...	30
<b>Gambar 2.19</b> Faktor Distribusi $K_M$ .....	31
<b>Gambar 2.20</b> Momen Lentur Vertikal Akibat Gelombang.....	31
<b>Gambar 3.1</b> Konfigurasi Penampang Kapal Tanker Tipe T2 .....	32
<b>Gambar 3.2</b> Diagram Alir.....	35
<b>Gambar 4.1</b> Model 1 .....	36
<b>Gambar 4.2</b> Model 2.....	36
<b>Gambar 4.3</b> Model 3.....	37
<b>Gambar 4.4</b> Grafik Momen Kelengkungan Hull Girder Tanker T2 Model 1 .....	41
<b>Gambar 4.5</b> Deformasi Kekuatan-Batas Kapal <i>Hull Girder</i> pada Kondisi <i>Elastik</i> .....	41
<b>Gambar 4.6</b> Deformasi Kekuatan-Batas Kapal <i>Hull Girder</i> pada Kondisi <i>Ultimate Strenght</i> .....	41
<b>Gambar 4.7</b> Deformasi Kekuatan-Batas Kapal <i>Hull Girder</i> pada Kondisi <i>Collapse</i> .....	42
<b>Gambar 4.8</b> Deformasi Kekuatan-Batas Kapal <i>Hull Girder</i> pada Kondisi <i>Elastik</i> .....	42
<b>Gambar 4.9</b> Deformasi Kekuatan-Batas Kapal <i>Hull Girder</i> pada Kondisi <i>Ultimate Strenght</i> .....	42
<b>Gambar 4.10</b> Deformasi Kekuatan-Batas Kapal <i>Hull Girder</i> pada Kondisi <i>Collapse</i> .....	42
<b>Gambar 4.11</b> Grafik Momen Kelengkungan <i>Hull Girder</i> Tanker T2 Model 2.....	44
<b>Gambar 4.12</b> Deformasi Kekuatan-Batas Kapal <i>Hull Girder</i> pada Kondisi <i>Elastic</i> .....	45
<b>Gambar 4.13</b> Deformasi Kekuatan-Batas Kapal <i>Hull Girder</i> pada Kondisi <i>Ultimate Strenght</i> .....	45
<b>Gambar 4.14</b> Deformasi Kekuatan-Batas Kapal <i>Hull Girder</i> pada Kondisi <i>Collapse</i> .....	46
<b>Gambar 4.15</b> Deformasi Kekuatan-Batas Kapal <i>Hull Girder</i> pada Kondisi <i>Elastic</i> .....	46
<b>Gambar 4.16</b> Deformasi Kekuatan-Batas Kapal <i>Hull Girder</i> pada Kondisi <i>Ultimate Strenght</i> .....	47



<b>Gambar 4.17</b>	Deformasi Kekuatan-Batas Kapal <i>Hull Girder</i> pada Kondisi <i>Collapse</i> .....	47
<b>Gambar 4.18</b>	Grafik Momen Kelengkungan <i>Hull Girder</i> Tanker T2 Model 3.....	49
<b>Gambar 4.19</b>	Deformasi Kekuatan-Batas Kapal <i>Hull Girder</i> pada Kondisi <i>Elastic</i> .....	50
<b>Gambar 4.20</b>	Deformasi Kekuatan-Batas Kapal <i>Hull Girder</i> pada Kondisi <i>Ultimate Strenght</i> .....	50
<b>Gambar 4.21</b>	Deformasi Kekuatan-Batas Kapal <i>Hull Girder</i> pada Kondisi <i>Collapse</i> .....	51
<b>Gambar 4.22</b>	Deformasi Kekuatan-Batas Kapal <i>Hull Girder</i> pada Kondisi <i>Elastik</i> .....	51
<b>Gambar 4.23</b>	Deformasi Kekuatan-Batas Kapal <i>Hull Girder</i> pada Kondisi <i>Ultimate Strenght</i> .....	52
<b>Gambar 4.24</b>	Deformasi Kekuatan-Batas Kapal <i>Hull Girder</i> pada Kondisi <i>Collapse</i> .....	52
<b>Gambar 4.25</b>	Grafik Momen Kelengkungan Kondisi Utuh Kapal <i>Double Hull Tanker T2</i> .....	55

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> <i>Modulus Young</i> pada Material .....	22
<b>Tabel 4.1</b> Formula Perhitungan Momen Lentur-Batas Vertikal .....	37
<b>Tabel 4.2</b> Momen Lentur-Batas Vertikal <i>Sagging</i> Dan <i>Hogging</i> Tanker T2.....	39
<b>Tabel 4.3</b> Tegangan Izin Kerja Material Tanker.....	40
<b>Tabel 4.4</b> Kekuatan Batas Kapal <i>Double Hull Tanker</i> T2 Model 1 .....	40
<b>Tabel 4.5</b> Rekapitulasi Tegangan Kerja Arah Z Kapal Tanker Model 1 Akibat Kekuatan Batas .....	43
<b>Tabel 4.6</b> Kekuatan Batas Kapal <i>Double Hull Tanker</i> T2 Model 2.....	43
<b>Tabel 4.7</b> Rekapitulasi Tegangan Kerja Arah Z Kapal Tanker Model 2 Akibat Kekuatan Batas .....	48
<b>Tabel 4.8</b> Kekuatan Batas Kapal <i>Double Hull Tanker</i> T2 Model 3.....	48
<b>Tabel 4.9</b> Rekapitulasi Tegangan Kerja Arah Z Kapal Tanker Model 3 Akibat Kekuatan Batas .....	53
<b>Tabel 4.10</b> Kekuatan-Batas Kapal Tanker Model 1, Model 2, Dan Model 3 .....	54

## DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan	Satuan
B	Lebar kapal	m
b	lebar kerusakan akibat kandas	m
$b_x$	gaya apung	N
C	koefisien momen lentur	
$C_b$	koefisien blok kapal	
D	tinggi kapal	m
E	modulus elastisitas	N/mm <sup>2</sup>
$F_x$	gaya geser arah sumbu x	N
h	tinggi kerusakan akibat tubrukan	m
I	Momen inersia	m <sup>4</sup>
$I_{min}$	momen inersia ijin	m <sup>4</sup>
$K_M$	faktor distribusi	
l	panjang kerusakan akibat tubrukan/ kandas	
L	panjang kapal	m
M	momen lentur	Nmm
$M_{US}$	kekuatan batas momen lentur <i>sagging</i>	Nmm
$M_{UH}$	kekuatan batas momen lentur <i>hogging</i>	Nmm
$M_{sw}$	momen lentur pada air tenang	Nmm
$M_w$	momen lentur akibat gelombang	Nmm
$M_t$	momen lentur- batas total	Nmm
S	modulus penampang	m <sup>3</sup>
$S_b$	modulus penampang bagian <i>bottom</i>	m <sup>3</sup>
$S_d$	modulus penampang bagian <i>deck</i>	m <sup>3</sup>
$S_p$	modulus penampang ijin	m <sup>3</sup>
z	jarak dari sumbu netral ke lokasi tegangan lentur	m
$z_b$	jarak dari sumbu netral ke lokasi tegangan lentur <i>bottom</i>	m
$\sigma$	tegangan lentur	N/mm <sup>2</sup>

$\sigma_p$	tegangan lentur ijin	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{max}$	tegangan lentur maksimum	N/mm <sup>2</sup>

## DAFTAR LAMPIRAN

<b>Lampiran 1</b> Konfigurasi Stifener Kapal Tanker T2 .....	60
--	----

## KATA PENGANTAR

*Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.*

Alhamdulillah, Puji Syukur kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan karuniaNya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini. Dan atas kehendakNya lah segala hambatan dalam penelitian serta penulisan skripsi ini dapat diatasi. Salawat serta salam penulis panjatkan kehadiran Nabi Muhammad SAW. Skripsi ini dibuat penulis sebagai syarat untuk menyelesaikan pendidikan di Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, dengan judul:

“PENGARUH BENTUK UJUNG TEPI GELADAK PENAMPANG *DOUBLE HULL OIL TANKER*”

Doa, dorongan moril dari kedua orang tua Bapak **Muh. Hamzah** dan Ibu **Nursiah. B** merupakan dukungan yang selalu menguatkan hati untuk setiap tahapan penelitian dan penulisan skripsi ini, serta keberhasilan penulis sampai tahap skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Keberhasilan skripsi ini, tak luput pula berkat bantuan dari berbagai pihak yang diterima penulis, sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik. Untuk itu dalam kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan secara tulus dan ikhlas kepada yang terhormat:

1. Bapak **Muhammad Zubair Muis Alie, S.T., M.T., Ph.D.** selaku dosen pembimbing I dan penasehat akademik (PA) yang ditengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan Skripsi ini.
2. Bapak **Ir. Juswan, ST. MT.** selaku dosen pembimbing II yang ditengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan Skripsi ini.
3. Bapak **Dr. Ir. Chairul Paotonan, ST., MT.** selaku Ketua Program Studi Teknik Kelautan yang telah mengesahkan skripsi ini.
4. **Dosen–Dosen Teknik Kelautan** yang telah memberikan ilmu serta pengalamannya selama dalam proses perkuliahan.
5. **Staf Tata Usaha Program Studi Teknik Kelautan**, yang telah membantu segala aktivitas administrasi baik selama perkuliahan serta dalam penyelesaian skripsi ini.
6. Teman-teman **Mahasiswa** khususnya **Teknik Kelautan 2019** yang selalu memberi motivasi dan dukungannya serta waktu yang telah kita lalui bersama dalam suka dan duka. Tak lupa pula penulis sampaikan banyak terimakasih kepada kanda-kanda **Senior** terkhusus kak **Indah Melati Suci** yang telah membimbing dan dinda-dinda **Junior** atas motivasi dan dukungannya.
7. Teman-teman **KKNT Perhutanan Sosial UNHAS GEL 109 Posko Rongkong 1, Desa Dandang, Kec. Sabbang Selatan, Kab. Luwu Utara** yang telah memberikan pengalaman yang berharga dalam masa pengabdian kami ber-KKN.
8. Kepada rekan-rekan Labo **OSAREL Riska, Rati, Puput, Geby, dan Bintang** yang sama-sama berjuang dalam menyelesaikan studi.

9. Kepada seluruh pihak yang tak sempat penulis ucapkan satu per satu, terima kasih yang sebesar besarnya untuk segala sumbangsih selama proses penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari dalam penulisan skripsi ini masih banyak kekurangan, oleh karena itu saran dan kritik sangat penulis harapkan sebagai bahan untuk menutupi kekurangan dari penulisan skripsi ini. Penulis berharap semoga tulisan ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu Teknik Kelautan, bagi pembaca umumnya dan penulis pada khususnya.

*Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.*

Gowa, Mei 2023

Nur Alifya Iqrani

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Kapal merupakan salah satu sarana transportasi yang banyak digunakan untuk mengangkut penumpang dan barang dari satu tempat ke tempat lain. Berabad-abad kapal telah digunakan oleh manusia sebagai sarana yang mempermudah kehidupan. Manusia pada masa lampau menggunakan kano, rakit, ataupun perahu dengan kapasitas angkut yang masih terbatas yang dibuat menggunakan kayu atau bambu, namun seiring berjalannya waktu perahu atau rakit dibuat menggunakan bahan logam seperti besi/baja dan dibuat lebih besar karena kebutuhan akan konstruksi yang kuat dan daya tampung yang banyak untuk perjalanan yang lebih jauh sehingga kapal dibuat lebih besar. Kapal pembawa muatan digolongkan menjadi tiga bagian yaitu: kapal kargo, kapal tangki dan kapal penumpang. Kapal tangki adalah kapal yang khusus digunakan untuk mengangkut minyak, diantaranya minyak mentah, minyak hasil penyulingan gas alam cair dan lain sebagainya.

Salah satu jenis kapal di era sekarang ini yaitu kapal tanker yang dibuat untuk mengangkut minyak, cairan kimia, dan jenis cairan lainnya. Akibat banyaknya kilang minyak yang dibuat serta banyak cairan yang perlu dikirim melalui jalur laut sehingga kapal tanker diperlukan sebagai alat transportasi. Kapal tanker telah dirancang dengan sistem keselamatan yang lengkap untuk meminimalisir terjadinya kecelakaan karena muatan yang dibawa sangat berbahaya untuk lingkungan dan manusia.

Dalam perancangan dan pembuatan suatu kapal salah satu aspek terpenting yaitu perancangan strukturnya. Konstruksi kapal harus mampu menahan beban-beban yang bekerja pada kapal baik pada kondisi normal maupun ekstrem. Permasalahan yang sering terjadi pada kapal adalah kerusakan yang disebabkan oleh tubrukan, kandas, korosi, dan lain sebagainya. Dalam perkembangan teknologi konstruksi kapal, desain dan material menjadi hal yang sangat dipertimbangkan oleh perusahaan galangan kapal dalam perancangan dan pembuatan kapal baru. Salah satunya yaitu kekuatan pada geladak kapal. Kapal tanker memiliki konstruksi tipe membujur pada bagian deck yang diperkuat oleh pembujur geladak (*deck longitudinal*).



Analisis double hull kapal tanker telah banyak dilakukan sebelumnya. Campanile et al., (2017), menganalisis keandalan dari metode kombinasi beban pada kapal tanker pada kondisi utuh. Bin Liu et al., (2016), metode analitik untuk menilai struktur lambung ganda pada kapal dengan benturan. Muis-Alie (2017), investigasi kekuatan penumpu lambung kapal dengan alasan kerusakan. Kim et al., (2013), mempresentasikan hasil dari investigasi efek tekanan lateral pada perilaku kehancuran progresif lambung kapal tanker Suezmax-Class dalam pengaruh momen lentur vertical. Liu dan Amdahl (2012), metode analisis numerik dan sederhana untuk analisis kekuatan sisa kapal pada daerah dasar ganda. Muis-Alie et al (2018), kekuatan kapal dengan mempertimbangkan modulus penampang dalam pengaruh lentur membujur. Bin Liu et al., (2016) penilaian kekuatan struktur samping kapal tanker lambung ganda dalam tabrakan kapal kecil.

Berdasarkan latar belakang di atas, maka fokus penelitian ini adalah berkaitan dengan pengaruh bentuk ujung tepi geladak penampang *double hull oil tanker*. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, kapal tanker yang menjadi objek penelitian adalah double hull oil tanker tipe T2 dengan perbandingan hasil analisis *Non Linear Finite Elemen* (NLFEA) menggunakan software ANSYS.

## 1.2 Rumusan masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah yang menjadi kajian dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh bentuk ujung tepi geladak penampang *double hull oil tanker* tipe T2 terhadap kekuatan kapal?
2. Bagaimana perbandingan kekuatan bentuk ujung tepi geladak penampang *double hull oil tanker* tipe T2?

## 1.3 Tujuan penelitian/perancangan

Tujuan dari penelitian yang ingin dicapai adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh bentuk ujung tepi geladak *penampang double hull oil tanker* tipe T2 terhadap kekuatan kapal.
2. Mengetahui perbandingan kekuatan bentuk ujung tepi geladak penampang *double hull oil tanker* tipe T2.

#### 1.4 Manfaat penelitian/perancangan

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagi bidang akademis, memperdalam wawasan mahasiswa dan masukan ilmu pengetahuan khususnya ilmu analisa struktur dengan metode finite elemen analysis terhadap pengaruh ujung tepi geladak penampang *double hull oil tanker*.
2. Bagi bidang industri, memberikan kontribusi dan perbandingan kekuatan kapal tanker akibat pengaruh ujung tepi geladak kepada perusahaan-perusahaan.
3. Bagi peneliti, memberikan pengetahuan cara menganalisis pengaruh bentuk ujung tepi geladak penampang *double hull oil tanker* tipe T2 pada kondisi hogging dan saggging dan sebagai tugas akhir sarjana Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

#### 1.5 Ruang lingkup/Asumsi perancangan

Agar penelitian lebih terarah dan sesuai dengan kerangka yang direncanakan, maka penelitian dibatasi dengan beberapa hal sebagai berikut;

1. Analisis dilakukan hanya pada kapal double hull oil tanker
2. Beban yang bekerja yaitu momen lentur vertical longitudinal (*hogging* dan *saggging*)
3. Pemodelan dilakukan dengan satu jarak gading
4. Analisa dilakukan pada ujung tepi geladak

## **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

### **2.1 Sejarah Kapal Tanker**

Pada akhir tahun 1861, Elizabeth Watts berlayar dengan kapal yang membawa 224 ton minyak bumi ke Inggris. Itu adalah bahan cair pembawa kargo pertama. Industri kapal tanker didirikan sekitar tahun 1886 dan telah mengembangkan kapal khusus untuk mengangkut minyak ke seluruh dunia. GLUCKAUF Inggris seberat 2700 ton adalah kapal tanker minyak sejati pertama di dunia yang memiliki tangki terpisah untuk minyak yang terpasang di lambungnya. Itu adalah kapal pertama yang memiliki kompartemen minyak di mana minyak dapat langsung dipompa, sedangkan minyak sebelumnya telah dikirim dalam drum atau barel. Glukauf adalah kapal tanker yang desainnya diikuti sampai saat ini.

Orang Amerika menemukan kapal uap tangki untuk membawa minyak dalam jumlah besar; seorang Yankee yang giat menunjukkan fakta ini. Dia menyatakan bahwa minyak dapat dipompa langsung melalui pipa ke kapal uap, dan dapat dengan aman diangkut melintasi lautan. Ini akan mengurangi biaya beberapa barel karena dalam satu kapal tanker lebih banyak jumlah minyak yang dapat diangkut. Tetapi sampai tahun 1950, setelah 90 tahun berdirinya industri tanker, masih membuat kapal-kapal itu hanya mengangkut minyak saja, bukan angkutan cair lainnya.

Pencapaian signifikan saat itu adalah armada mereka berukuran 16.000 DWT, yang masih digunakan. Setelah pertengahan abad ke-20, kapal tanker yang membawa semua jenis cairan dan dengan ukuran yang lebih besar (VLCC dan ULCC) muncul.

Pada tahun 1990, desain lambung ganda menjadi lebih populer. Inovasi lain dari abad ke-21, tidak bekerja untuk modifikasi di kapal tanker malah bekerja untuk keselamatan pelayaran mereka. Standar ditetapkan oleh IMO (Organisasi Maritim Internasional) untuk melaksanakan desain kapal tanker yang lebih aman.

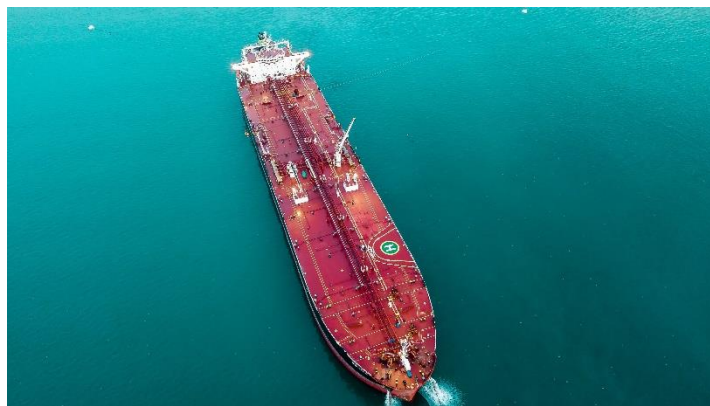
### **2.2 Jenis Kapal Tanker**

Kapal tanker adalah kapal yang dirancang untuk mengangkut minyak atau produk turunannya. Seperti dijelaskan oleh Annex II Marpol 73/78, apabila kapal mengangkut muatan atau bagian dari muatan minyak secara curah. Menurut G.S.

Marton Fifth Edition (Tanker Operation Fourth Edition, 2007:19) kapal tanker dibagi menjadi 3 yaitu :

a. *Oil Tanker*

*Oil Tanker* adalah jenis kapal tanker yang di bangun atau disesuaikan untuk mengangkut minyak curah. Ada 2 jenis *oil tanker*, yaitu *Crude Tanker* dan *Product Tanker*. *Crude Tanker* adalah yang membawa muatan minyak mentah, sedangkan *Product Tanker* adalah tanker yang membawa muatan yang sudah diolah dari kilang. Ukuran *Crude Tanker* biasanya lebih besar dari *Product Tanker* seperti yang terlihat pada Gambar 2.1 berikut ini.



**Gambar 2.1** Kapal *Crude Oil Carriers* (<https://www.broen.com>, 2022)

b. *Chemical Tanker*

*Chemical Tanker* adalah jenis kapal tanker yang di rancang untuk mengangkut jenis bahan sensitif dengan standar kebersihan tangki yang tinggi seperti minyak nabati, lemak, minyak sawit, soda kaustik, dan methanol seperti terlihat pada Gambar 2.2 berikut ini.



**Gambar 2.2** Kapal *Chemical Tanker* (<https://tradewindsnews.com>, 2022)

c. *Liquefied Natural Gas (LNG) Tanker*

*Liquefied Natural Gas (LNG) Tanker* adalah jenis kapal tanker yang dirancang untuk mengangkut muatan gas alam cair seperti terlihat pada Gambar 2.3 berikut ini.



**Gambar 2.3** *Liquefied Natural Gas (LNG) Tanker* (<https://shippingwatch.com>, 2022)

Berdasarkan ukurannya:

a. *Handy-size tankers*

Adalah kapal tanker yang mempunyai bobot 5.000-35.000 Ton. Umumnya digunakan untuk mengangkut minyak jadi (*Product oil*) *Black-oil product carriers*.

b. *Medium-size tankers*

Adalah kapal tanker yang mempunyai bobot mati antara 35.000-160.000 Ton. Dan umumnya digunakan untuk mengangkut minyak mentah, atau kadang berfungsi sebagai "*mother ship*" jika digunakan mengangkut minyak jadi.

c. *VLCCs (very-large crude carriers)*

Adalah kapal tanker yang mempunyai bobot mati antara 160.000-300.000 Ton. Umumnya digunakan untuk *crude oil* saja.

d. *ULCCs (ultra-large crude carriers)*

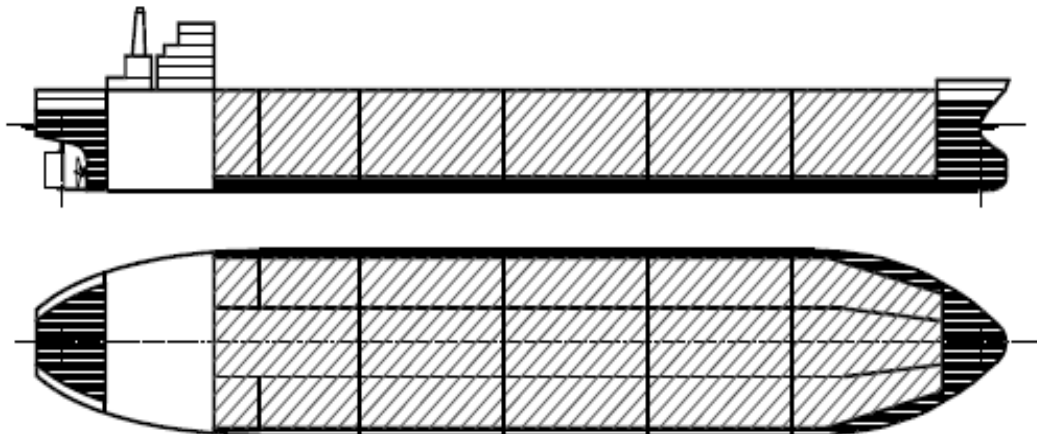
Adalah kapal tanker yang mempunyai bobot mati lebih dari atau dengan 300.000 ton. Umumnya digunakan untuk mengangkut *crude oil* saja.

### 2.3 Konstruksi Kapal Tanker

Karena fungsinya yang sangat vital, konstruksi kapal tanker seperti terlihat pada Gambar 2.4 harus dibuat dengan desain yang tepat dan sesuai standar keselamatan. Spesifikasi konstruksi kapal tanker telah diatur dalam IMO melalui peraturan MARPOL 73/78-Annex 1, Regulation 13G, Amandemen 2001 serta SOLAS (Keselamatan Jiwa di Laut).

Adapun faktor-faktor yang perlu diperhatikan saat proses merancang dan mendesain konstruksi kapal tanker adalah:

1. Faktor *safety*, yaitu harus diperhatikan keamanan konstruksinya karena kapal tanker dibuat sebagai pengangkut muatan berbahaya.
2. Faktor stabilitas, yaitu desain konstruksi kapal tanker harus mampu membawa muatan cair dalam tanki yang dapat bergerak bebas dan dalam kondisi stabil.
3. Faktor pencemaran, yaitu desain konstruksi kapal tanker harus mampu menahan agar tidak sampai terjadi tumpahan minyak di laut.

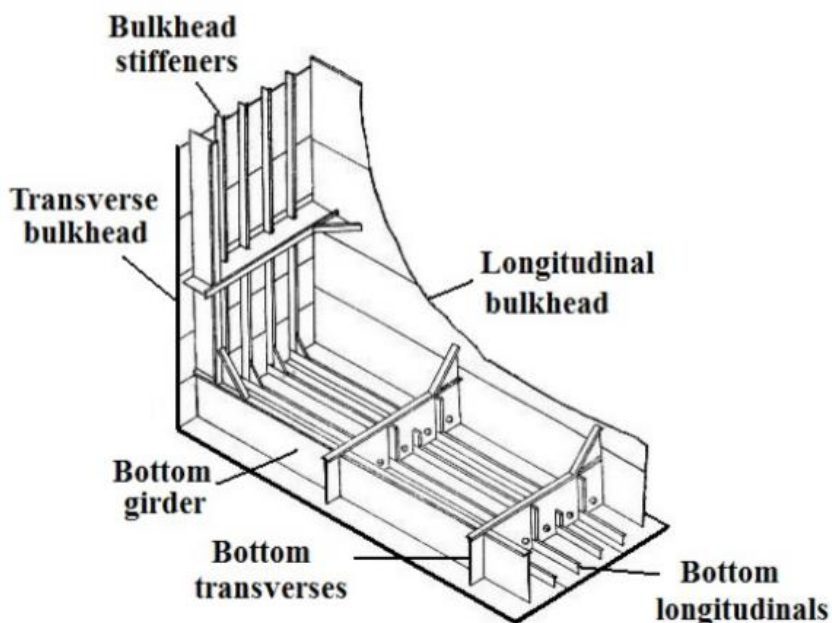


**Gambar 2.4** Konstruksi Kapal Tanker (Eyes, 1998)

### 2.4 Konstruksi *Single Hull* (SH)

*Single-hull tanker* memiliki satu lambung dan membawa minyak langsung di dalam struktur lambung. Beberapa kapal tanker SH membawa minyak dan air pemberat ke dalam tangki yang sama, sementara beberapa kapal tanker SH memiliki tangki pemberat terpisah di dalam lambung (yaitu minyak dibawa langsung ke dalam lambung kapal, tapi tangki pemberat terpisah dari muatan). Akibat hanya satu lapisan, kapal tanker *single hull* menimbulkan ancaman lebih

besar terhadap lingkungan laut selama kecelakaan apapun. Adapun contoh *single hull tanker* dapat dilihat pada Gambar 2.5 sebagai berikut.



**Gambar 2.5** *Single Hull Tanker* (Shama, 2013)

Sejak tenggelamnya tanker (*single hull*) ERIKA dilepas pantai Perancis (Desember 1999) yang menyebabkan polusi (*oil spill*) perairan sekitarnya, maka banyak terjadi perubahan dalam peraturan klasifikasi, statutori, dan perdagangan yang bertujuan untuk meningkatkan kualitas pengoperasian kapal tanker. IMO melalui peraturan MARPOL 73/78-Annex 1, Regulation 13G, Amandemen 2001 membagi kapal tanker minyak dalam 3 kategori, yaitu kategori 1, 2, dan 3. Dengan rincian sebagai berikut:

#### 1. Oil Tanker kategori 1

- a. Kapal tanker 20.000 dwt atau lebih yang memuat *crude oil*, *fuel oil*, *heavy diesel oil*, atau *lubricating oil*
- b. Kapal tanker 30.000 dwt atau lebih yang memuat jenis minyak selain yang disebutkan diatas. (Tanker pra-MARPOL, yaitu tanker *single hull* yang tidak mempunyai *ballast tanks* terpisah pada *protective locations*).

#### 2. Oil Tanker kategori 2

- a. Kapal tanker 20.000 dwt atau lebih, *single hull*, yang memuat *crude oil*, *fuel oil*, *heavy diesel oil*, or *lubricating oil*, dan
- b. Tanker MARPOL 30.000 dwt atau lebih, *single hull*, yang memuat jenis minyak selain yang disebut diatas, yang dilengkapi *ballast tanks* terpisah pada *protective locations*.

### 3. Oil Tanker kategori 3

- a. Tanker 5.000 dwt atau lebih, *single hull* yang ukurannya dibawah tanker kategori 1 dan 2 diatas.

Selanjutnya ditentukan bahwa tanker dengan kategori 1, 2, dan 3 diatas harus memenuhi regulation 13 F, yang menyebutkan tentang adanya *wing tanks* dan *double bottom tanks*, atau "*double hull*" dalam batas-batas yang ditentukan menurut kategori diatas dan tanggal penyerahan kapal. Apabila persyaratan tersebut tidak dipenuhi maka tanker akan mengalami "*phase-out*" (diberhentikan).

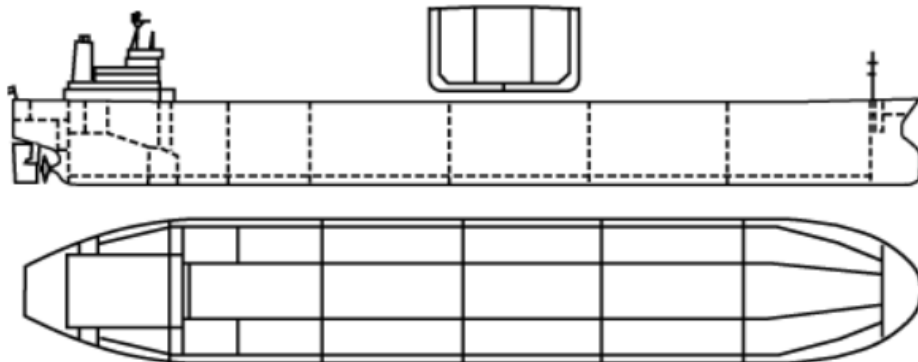
#### 2.5 Konstruksi *Double Hull*

Sejumlah produsen telah menggunakan kapal tanker minyak dengan lambung ganda karena memperkuat lambung kapal, mengurangi kemungkinan bencana minyak dalam tabrakan berdampak rendah dan grounding di atas kapal lambung tunggal. Selain itu, konstruksi *double hull* juga mengurangi kemungkinan kebocoran yang terjadi pada dampak kecepatan rendah di daerah pelabuhan saat kapal sedang dalam tahap uji coba. Penelitian kerusakan dampak kapal telah mengungkapkan bahwa kapal tanker berlambung ganda tidak mungkin melubangi kedua lambung kapal ketika tabrakan, mencegah minyak merembes keluar.

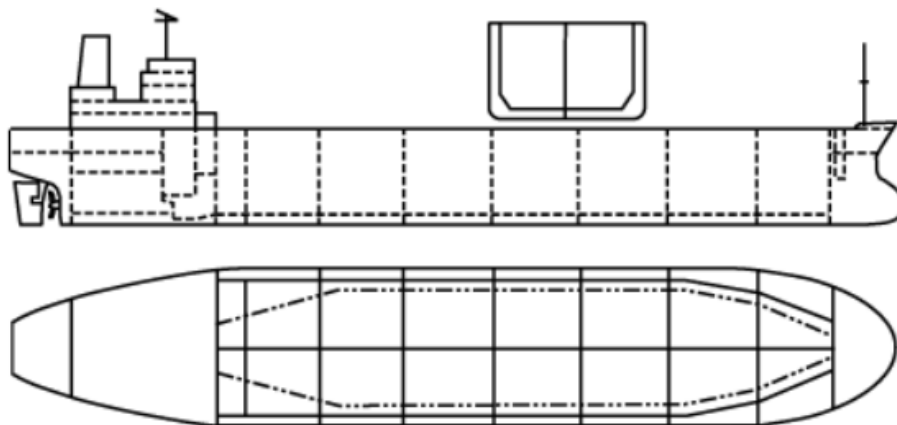
*International Association of Classification Societies (IACS)* memperkenalkan serangkaian panduan manual dengan tujuan memberikan arahan untuk membantu Surveyors IACS, dan pihak-pihak lain yang berkepentingan yang terlibat dalam survei, penilaian dan perbaikan struktur lambung untuk jenis kapal tertentu.

Panduan tersebut salah satunya untuk kapal tanker minyak lambung ganda yang dibangun terutama untuk pengangkutan minyak dalam jumlah besar dan yang memiliki tangki kargo yang dilindungi oleh lambung ganda yang meluas untuk seluruh wilayah kargo, yang terdiri dari sisi ganda dan dasar bawah ruang untuk pengangkutan air balast atau ruang hampa. Gambar 2.6 dan 2.7 menunjukkan gambaran umum tentang tanker minyak hull ganda dengan dua sekat longitudinal atau satu sekat memanjang.



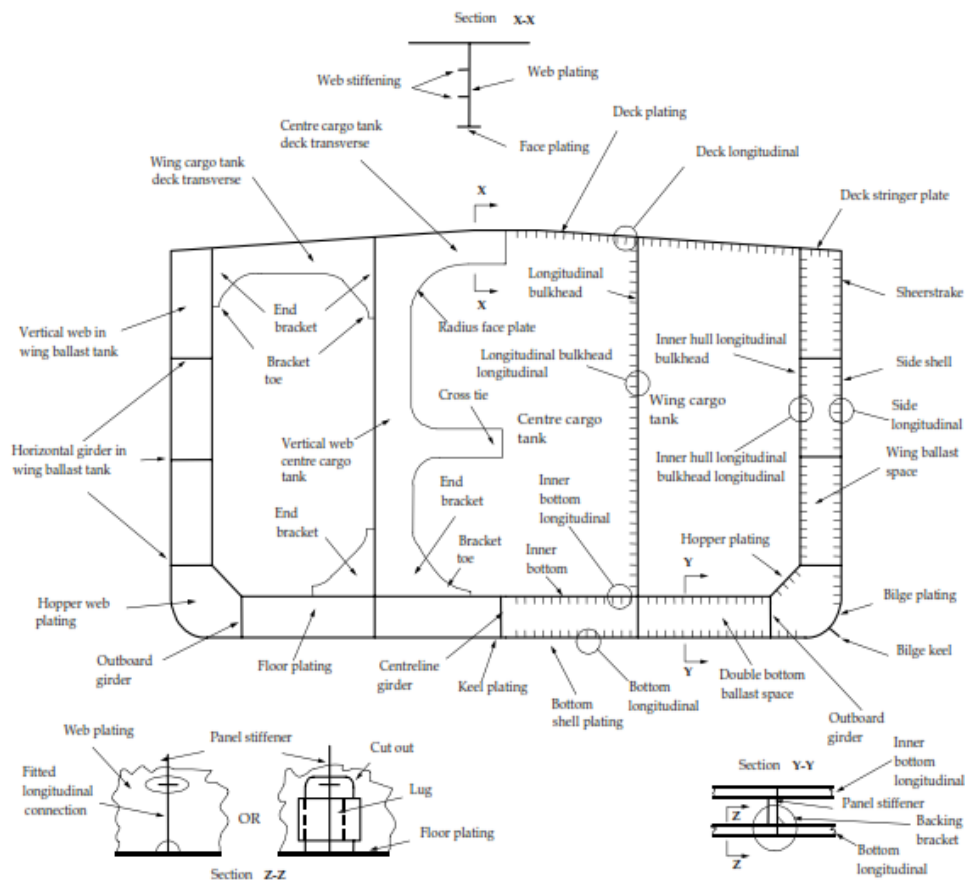


**Gambar 2.6** Kapal *Double Hull Tanker* dengan Dua Sekat Memanjang (IACS, 2007)



**Gambar 2.7** Kapal *Double Hull Tanker* dengan Satu Sekat Memanjang (IACS, 2007)

*Double Hull*, seperti namanya, adalah lambung kapal tanker dengan lapisan permukaan lambung kedap air. Lapisan dalam dan luar lambung ada di bagian bawah dan juga sisi kapal tanker. Konstruksi lapisan ganda membantu mengurangi risiko pencemaran laut selama benturan, landasan, dan bentuk kerusakan lambung kapal lainnya. Adapun konstruksi *midship* kapal *double hull tanker* dapat dilihat pada Gambar 2.8. ([www.marineinsight.com](http://www.marineinsight.com), 2017)



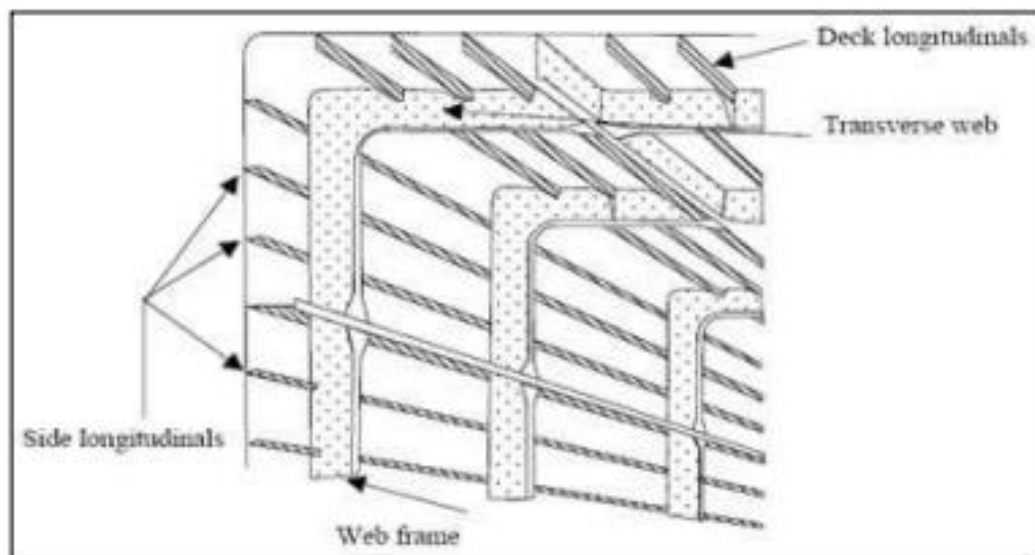
**Gambar 2.8** *Double Hull Tanker* (Bachman, 1991)

Beberapa Kapal tanker, kapal carrier kombinasi, dan beberapa kapal carrier minyak mentah sudah memiliki *double hull*, yang secara esensial merupakan kombinasi dari *double bottom* dan *double side*. Lebar tangki samping mungkin kurang dari pada desain *double side*. Namun, karena *ballast* yang dibutuhkan bisa dibagi antara sisi dan ruang bawah. Oleh karena itu, kapal *double-hull* mungkin lebih rendah kerusakan ambang sisi yang berkelanjutan pada saat bertabrakan (Bachman, 1991).

## 2.6 Konstruksi Membujur (*Longitudinal Framing System*)

Sistem konstruksi membujur adalah sistem konstruksi yang mempunyai penguatan longitudinal dari balok-balok atau penegar. Beban yang diterima konstruksi membujur diteruskan pada hubungan-hubungan kaku melintang (*transverse bulkheads*) melalui balok-balok membujur. Balok-balok melintang tetap diperlukan namun fungsi utama bukan sebagai penahan balok-balok

membujur. Fungsi dari komponen konstruksi membujur adalah untuk mengatasi tegangan lengkung membujur (*longitudinal bending stress*) akibat *sagging* dan *hogging*. Tipikal panjang gelombang di samudera adalah 300 ft. Kapal yang memiliki panjang lebih dari 300 ft (90 meter) cenderung memiliki komponen konstruksi membujur lebih banyak dibandingkan dengan komponen melintang. Jarak antar pembujur (*longitudinals*) lebih rapat, Jarak antar gading (*frames*) atau pelintang (*transverses*) lebih lebar. Dalam sistem ini *main frame* tidak dipasang vertikal, tetapi dipasang membujur pada sisi kapal dengan jarak antara, diukur ke arah vertikal, sekitar 700 mm-1000 mm. gading-gading ini (pada sisi) dinamakan pembujur sisi (*side longitudinal*). Pada setiap jarak tertentu (sekitar 3-5 meter) dipasang web frame, sebagaimana *web frame* pada sistem melintang, yang disebut pelintang sisi (*side transverse*). Pada alas dan alas dalam juga dipasang pembujur-pembujur seperti pembujur-pembujur sisi tersebut di atas dengan jarak antara yang sama pula seperti jarak antara pembujur-pembujur sisi.



**Gambar 2.9** Konstruksi Membujur pada Lambung dan Geladak Kapal (Wijaya, 2017)

Kebaikan sistem konstruksi membujur yaitu dengan adanya balok-balok pembujur yang menerus, akan memperbesar modulus penampang melintang. Balok-balok pembujur pada pelat dasar memberikan kekakuan pada konstruksi tersebut. Kekurangan sistem konstruksi membujur yaitu kesulitan dalam pembangunan. Konstruksi membujur pada lambung dan geladak kapal dapat dilihat pada Gambar 2.9.

## 2.7 Sistem Konstruksi Melintang

Dalam sistem ini gading-gading (*frame*) dipasang vertikal (mengikuti bentuk *body plan*) dengan jarak antara (*spacing*), ke arah memanjang kapal, satu sama lain yang rapat (sekitar antara 500 mm – 1000 mm, tergantung panjang kapal). Pada geladak, baik geladak kekuatan maupun geladak-geladak lainnya, dipasang balok-balok geladak (*deck beam*) dengan jarak antara yang sama seperti jarak antara gading-gading. Ujung masing-masing balok geladak ditumpu oleh gading-gading yang terletak pada vertikal yang sama. Pada alas dipasang wrang-wrang dengan jarak yang sama pula dengan jarak antara gading-gading sedemikian rupa sehingga masing-masing wrang, gading-gading dan balok geladak membentuk sebuah rangkaian yang saling berhubungan dan terletak pada satu bidang vertikal sesuai penampang melintang kapal pada tempat yang bersangkutan. Elemen-elemen yang dipasang membujur dalam sistem melintang yaitu :

- a. Pada alas : *Centre girder* dan *Side girder*
- b. Pada sisi : *Side Stringer*
- c. Pada geladak : *Deck girder* atau *carling*

## 2.8 Sistem Konstruksi Kombinasi

Sistem kombinasi ini diartikan bahwa sistem melintang dan sistem membujur dipakai bersama-sama dalam badan kapal. Dalam sistem ini geladak dan alas dibuat menurut sistem membujur sedangkan sisinya menurut sistem melintang. Jadi, sisi-sisinya diperkuat dengan gading-gading melintang dengan jarak antara yang rapat seperti halnya dalam sistem melintang, sedangkan alas dan geladaknya diperkuat dengan pembujur-pembujur. Dengan demikian maka dalam mengikuti peraturan klasifikasi (*rules*) sisi-sisi kapal tunduk pada ketentuan yang berlaku untuk sistem melintang, sedangkan alas dan geladaknya mengikuti ketentuan yang berlaku untuk sistem membujur, untuk hal-hal yang memang diperlukan secara terpisah.

## 2.9 Beban-Beban Pada Konstruksi Kapal

Untuk setiap kasus beban, beban yang diterapkan yang digunakan untuk analisis struktur kapal harus mencakup bagian statis dan dinamis dari setiap komponen beban. Pembuatan kapal harus menggunakan bahan material yang tepat agar kinerja kapal bagus dan aman dalam berlayar. Pemilihan bahan

material ini mempunyai banyak pengaruh teknis dalam suatu kapal. Salah satunya ialah segi kekuatan kapal jika diberi beban (Choirun et al., 2015). Beban-beban pada konstruksi kapal dapat dikelompokkan sesuai dengan karakteristik beban-beban yang bekerja pada konstruksi kapal tersebut. Pengelompokan beban konstruksi kapal sesuai karakteristik bebannya dapat dilihat sebagai berikut:

1. Beban statis yaitu beban yang bersifat tetap, misalnya beban dari berat kapal dan beban dari gaya tekan ke atas.
2. Beban dinamis dengan frekuensi rendah yaitu beban yang timbul dalam tenggang waktu beberapa saat dengan frekuensi getaran yang cukup rendah dibandingkan dengan frekuensi getaran lambung kapal.
3. Beban dinamis dengan frekuensi tinggi yaitu beban yang berubah-ubah dengan frekuensi yang cukup tinggi dan dapat menimbulkan tegangan pada konstruksi kapal, misalkan beban hidrodinamis yang disebabkan oleh putaran propeller di kapal dan adanya putaran motor penggerak kapal.

## 2.10 Beban Geladak Cuaca

Geladak cuaca merupakan semua geladak bebas terkecuali geladak tidak efektif yang terletak dibelakang 0,15 L dari garis tegak haluan (FP) (Biro Klasifikasi Indonesia, 2019). Dimana beban geladak cuaca dapat dihitung dengan Persamaan 2.1.

$$P_D = P_o \frac{20 \cdot T}{(10 + z - T) H} C_D \quad (2.1)$$

Dengan  $P_o$  terdiri dari  $P_{O1}$  untuk arah gelombang searah atau berlawanan arah kapal dan  $P_{O2}$  untuk arah gelombang melintang arah kapal yang dapat dihitung seperti pada Persamaan 2.2 dan Persamaan 2.3 berikut ini.

$$P_{O1} = 2,1 \cdot (C_B + 0,7) \cdot C_D \cdot C_L \cdot f \quad (2.2)$$

$$P_{O2} = 2,6 \cdot (C_B + 0,7) \cdot C_D \cdot C_L \quad (2.3)$$

Dimana :

$P_D$  = Beban geladak cuaca (kN/m<sup>2</sup>)

$P_o$  = Basic *external dynamic load* (kN/m<sup>2</sup>)

$C_D$  = Faktor Distribusi

$f$  = Faktor Probabilitas

$C_L$  = Koefisien Panjang

$$= \sqrt{\frac{L}{90}} \text{ untuk } L < 90 \text{ m}$$

$$= 1,0 \text{ untuk } L \geq 90 \text{ m}$$

$z$  = Jarak tengah antara pusat beban dengan garis bawah (m)

$T$  = Sarat kapal (m)

$H$  = Tinggi kapal (m)

### 2.11 Beban Luar Sisi Kapal

Beban luar sisi kapal merupakan beban yang timbul karena adanya gelombang air laut yang menghempas sisi luar kapal (Biro Klasifikasi Indonesia, 2019). Beban luar sisi kapal dibagi atas dua beban yaitu:

1. Beban luar sisi kapal dibawah garis air muat ( $P_{S1}$ )

2. Beban luar sisi kapal diatas garis air muat ( $P_{S2}$ )

Adapun beban luar sisi kapal tersebut dihitung dengan Persamaan 2.4 dan 2.5.

$$P_{S1} = 10(T - z) + P_O \cdot C_F \left(1 + \frac{z}{T}\right) a \quad (2.4)$$

$$P_{S2} = P_O \cdot C_F \quad (2.5)$$

Dimana :

$P_{S1}$  = Beban luar sisi kapal dibawah garis air muat ( $\text{kN/m}^2$ )

$P_{S2}$  = Beban luar sisi kapal diatas garis air muat ( $\text{kN/m}^2$ )

$P_O$  = Basic *eksternal dynamic load* ( $\text{kN/m}^2$ )

$C_F$  = Faktor distribusi

$a$  = Jarak antar stiffener (m)

$z$  = Jarak tengah antara pusat beban dengan garis bawah (m)

$T$  = Sarat kapal (m)

$H$  = Tinggi kapal (m)

### 2.12 Beban Luar Alas Kapal

Beban luar alas kapal merupakan beban yang terjadi atau timbul karena adanya tekanan dari pemindahan volume air oleh kapal (Biro Klasifikasi Indonesia, 2019). Beban luar alas kapal dapat dihitung dengan Persamaan 2.6.

$$P_B = 10 \cdot T + P_O \cdot C_F \quad (2.6)$$

Dimana:

$P_B$  = Beban luar alas kapal ( $\text{kN/m}^2$ )

$P_O$  = Basic eksternal dynamic load (kN/m<sup>2</sup>)

$C_F$  = Faktor distribusi

$T$  = Sarat kapal (m)

### 2.13 Tegangan yang Bekerja

Tegangan didefinisikan sebagai tahapan terhadap gaya-gaya luar. Ini diukur dalam bentuk gaya per satuan luas. Dalam praktek tegangan sering diberikan dua pengertian: (1) gaya per satuan luas, (2) tegangan total gaya adalah gaya total pada suatu bidang. Tegangan yang bekerja pada struktur kapal umumnya disebabkan oleh beban aksial dan beban lentur. Akibat dari beban-beban tersebut menghasilkan tegangan aksial dan tegangan lentur yang menyebabkan kelelahan pada struktur kapal.

### 2.14 Tegangan Normal

Pengetahuan dan pengertian tentang bahan dan perilakunya jika mendapat gaya atau beban sangat dibutuhkan di bidang teknik bangunan. Jika suatu batang prismatic, dengan luas penampang seragam di sepanjang batang menerima beban atau gaya searah dengan panjang batang, maka gaya tersebut akan menimbulkan tegangan atau tekanan pada penampang batang.

Tegangan atau tekanan merupakan besaran gaya per satuan luas penampang. Tegangan (*stress*) didefinisikan sebagai perbandingan antara perubahan bentuk dan ukuran benda bergantung pada arah dan letak gaya luar yang diberikan. Tegangan menunjukkan kekuatan gaya yang menyebabkan perubahan bentuk benda. Secara matematis dituliskan pada Persamaan 2.7:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.7)$$

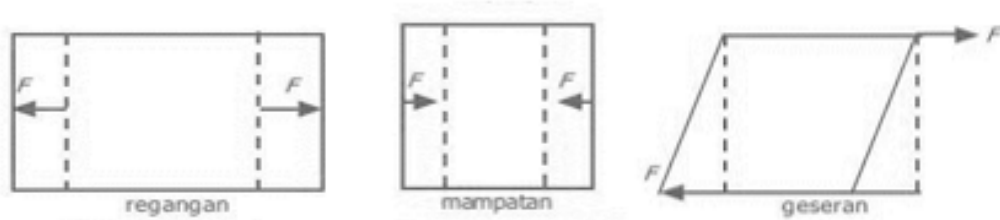
Dimana :

$\sigma$  = tegangan (N/mm<sup>2</sup>)

$F$  = gaya (N)

$A$  = luas penampang (mm<sup>2</sup>)

Satuan SI untuk tegangan adalah pascal (Pa), dengan konversi: 1 Pa = 1 N/mm<sup>2</sup>. Tegangan normal dibedakan menjadi tiga macam, yaitu tegangan tarik, tegangan tekan, dan tegangan geser, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.10 berikut.



**Gambar 2.10** Tegangan-Regangan

### 2.15 Tegangan Tarik (*Tensile Stress*)

Tegangan tarik yaitu tegangan yang timbul akibat gaya tarik. Apabila sepasang gaya tarik aksial menarik suatu batang, dan akibatnya batang ini cenderung menjadi meregang atau bertambah panjang. Maka gaya tarik aksial tersebut menghasilkan tegangan tarik pada batang di suatu bidang yang terletak tegak lurus atau normal terhadap sumbunya. Tegangan Tarik ( $\sigma_{tr}$ ) terjadi akibat bekerjanya gaya Tarik ( $F_{tr}$ ) pada satuan luas penampang ( $A$ ) struktur material, sehingga benda mengalami perpanjangan. Rasio/Perbandingan antara perpanjangan yang terjadi ( $\Delta L$ ) terhadap panjang benda semula ( $L$ ) disebut sebagai regangan tarik  $\epsilon_{ta}$  secara matematik dapat ditulis dengan Persamaan 2.8 dan dapat dilihat pada Gambar 2.11.

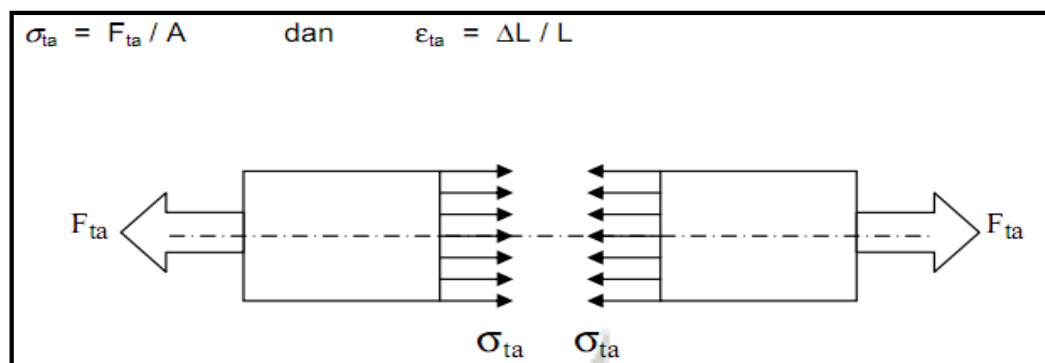
$$\sigma_{tr} = \frac{F_{tr}}{A} \quad (2.8)$$

Dimana :

$\sigma_{tr}$  = Tegangan tarik (N/mm<sup>2</sup>)

$F$  = Gaya tarik (N)

$A$  = Luas penampang (mm<sup>2</sup>)



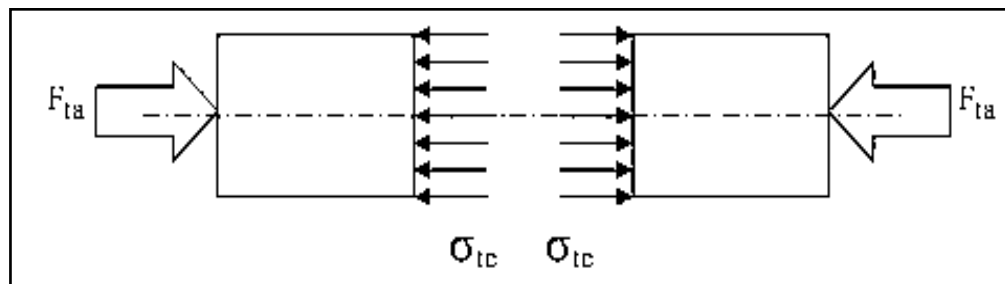
**Gambar 2.11** Tegangan-Tarik



## 2.16 Tegangan Tekan (*Compressive Stress*)

Jika batang gaya dikenakan pada ujung-ujung batang dalam arah menuju ke batang, sehingga batang dalam kondisi tertekan, maka terjadi tegangan tekan, batang. Tegangan tekan ( $\sigma_{te}$ ) terjadi akibat kerja suatu gaya tekan ( $F_{ta}$ ) pada satuan luas penampang ( $A$ ) struktur material, sehingga bendanya mengalami perpendekan.

Rasio/Perbandingan antara perpendekan yang terjadi ( $\Delta L$ ) terhadap panjang benda semula ( $L$ ) disebut sebagai regangan tekan  $\epsilon_{ta}$  secara matematik dapat dilihat pada Gambar 2.12 :



**Gambar 2.12** Tegangan-Tekan

selanjutnya dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.9:

$$\sigma_{te} = \frac{F_{ta}}{A} \quad (2.9)$$

Dimana :

$\sigma_{te}$  = Tegangan tekan ( $N/mm^2$ )

$F_{ta}$  = Gaya tekan (N)

$A$  = Luas penampang ( $mm^2$ )

## 2.17 Tegangan Geser (*Shear*)

Jika gaya normal/tangensial merupakan gaya sejajar arah memanjang batang, gaya geser merupakan gaya yang berarah tegak lurus dengan panjang batang. Besaran tegangan geser dinyatakan dengan simbol ( $\tau$ ) dalam satuan ( $N/mm^2$ ). Tegangan geser terjadi ketika aksi dari sebuah gaya geser didistribusikan pada sebuah luas penampang melintang yang paralel (tangensial) dengan gaya geser tersebut.

Tegangan geser ( $\tau$ ) timbul akibat kerja dari dua gaya geser ( $F_v$ ) yang saling berlawanan arah (aksi–reaksi) terhadap suatu bidang geser, pada satuan luas bidang penampang tahanan elemen struktur ( $A$ ). Sehingga bidang penampang

tersebut mengalami regangan geser searah bekerjanya gaya. Jika besaran gaya geser ( $S$ ) dikerjakan pada batang akan menimbulkan tegangan geser ( $\tau$ ). Tegangan geser ( $\tau$ ), yaitu tegangan yang timbul akibat gaya geser atau gaya lintang. Ciri dari gaya geser atau gaya lintang adalah melintang batang atau tegak lurus batang. Secara matematik dapat ditulis dengan Persamaan 2.10:

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (2.10)$$

Dimana :

$\tau$  = Tegangan geser (N/mm<sup>2</sup>)

$P$  = Gaya geser atau gaya lintang (N)

$A$  = Luas penampang (mm<sup>2</sup>)

### 2.18 Tegangan Lentur (*Bending Stress*)

Tegangan lentur memiliki nilai terbesar di atas dan di bawah balok. Tegangan lentur tersebut bekerja secara tegak lurus terhadap penampang melintang dan berada dalam arah longitudinal dari balok. Merupakan gaya yang bekerja pada jarak tertentu ( $L$ ) dari tumpuan benda dengan arah kerja tegak lurus sumbu benda. Sehingga mengakibatkan benda melentur/melengkung di sepanjang sumbunya.

### 2.19 Tegangan Luluh (*Crushing/Bearing Stress*)

Tegangan luluh merupakan tegangan yang timbul akibat terkonsentrasi/terpusatnya gaya tekan pada suatu daerah kontak yang sangat kecil, diantara suatu elemen struktur yang sedang bekerja sama dalam meneruskan tegangan. Tegangan jenis ini umumnya terjadi pada elemen/komponen struktur yang berfungsi sebagai penyambung.

### 2.20 Tegangan Izin Dasar

Tegangan izin dasar (selanjutnya disebut tegangan izin) tergantung material jenis yang digunakan. Spesifikasi tersebut diatur dalam AISC (*American Petroleum Institute Recommended Practice 2A*, 1989) dan API (*Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tanker*, 2014). Untuk jenis struktur dan jenis pembebanan yang tidak dibahas dalam spesifikasi ini, maka harus dilakukan analisa rasional dengan faktor keamanan yang digunakan pada spesifikasi ini.

Apabila tegangan yang terjadi diakibatkan oleh gaya lateral dan gaya vertikal akibat kondisi lingkungan, maka tegangan izin dasar di atas dapat dinaikkan dengan sepertiganya.

Ukuran struktur yang dihitung dengan kriteria tegangan izin tambah ini harus tidak boleh lebih kecil dari yang dihitung dengan tegangan izin dasar (tanpa kenaikan sepertiganya) apabila beban yang bekerja adalah gabungan bobot mati dan hidup.

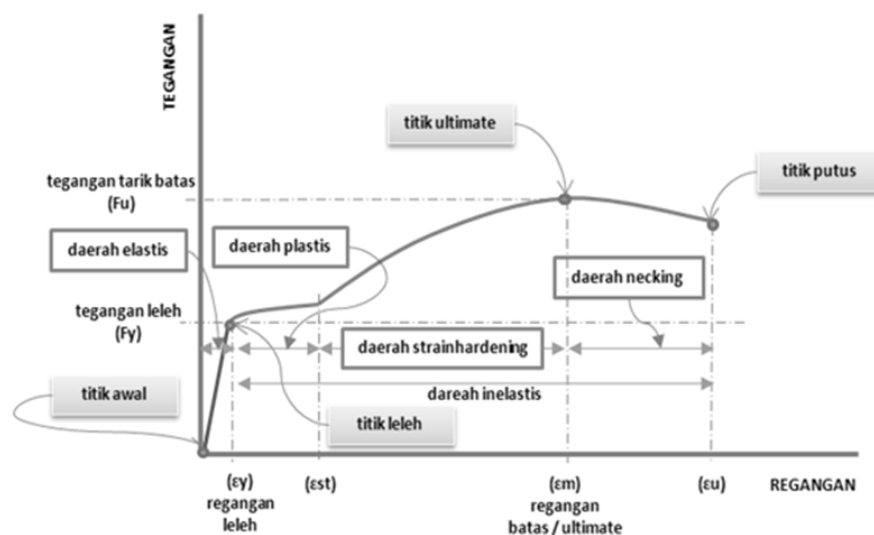
## 2.21 Regangan

Sesuai dengan bunyi hukum *Hooke* bahwa tegangan berbanding lurus dengan regangannya. Adapun regangan (*strain*) didefinisikan sebagai perbandingan antara pertambahan panjang atau pendek batang dengan ukuran mula-mula dinyatakan pada Persamaan 2.11

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.11)$$

Dimana :

- $\varepsilon$  = Regangan
- $\Delta L$  = Pertambahan panjang (m)
- $L$  = Panjang mula-mula (m)



**Gambar 2.13** Hubungan antara Tegangan dan Regangan (Utami, 2016)

Seperti yang terlihat pada Gambar 2.13, batas elastis (*elastic limit*) bahan tercapai. Setelah batas elastisitas dicapai, tiba-tiba terjadi pemanjangan,

sementara beban pada batang sesungguhnya turun. Yaitu bahan secara tiba-tiba mulur yang disebut titik mulur (*yield point*), tetapi bahan segera memperlihatkan lagi kemampuan menahan kenaikan tegangan, tetapi pemanjangan sekarang naik dengan laju yang lebih cepat dari tegangan sampai mencapai titik  $F_u$  yaitu tegangan maksimum batas kekuatan bahan. Tegangan ini disebut tegangan batas (*ultimate stress*) yaitu tegangan suatu bahan yang dapat ditahan tanpa menimbulkan kerusakan. Diluar titik  $F_u$ , pemanjangan akan berlanjut, tetapi secara perlahan tegangan berkurang, sampai akhirnya batang patah.

#### 1. Daerah Linear (*elastic limit*)

Bila sebuah bahan diberi beban sampai pada titik A, kemudian bebannya dihilangkan, maka bahan tersebut akan kembali ke kondisi semula (tepatnya hampir kembali ke kondisi semula) yaitu regangan "nol" pada titik O. Tetapi bila beban ditarik sampai melewati titik A, hukum *Hooke* tidak lagi berlaku dan terdapat perubahan permanen dari bahan tersebut.

#### 2. Titik Luluh (batas proporsional)

Titik dimana suatu bahan apabila diberi suatu bahan memasuki fase peralihan deformasi elastis ke plastis. Yaitu titik sampai di mana penerapan hukum *Hooke* masih bisa ditolerir. Dalam praktek, biasanya batas proporsional sama dengan batas elastis.

#### 3. Deformasi plastis (*plastic deformation*)

Yaitu perubahan bentuk yang tidak kembali ke keadaan semula, bila bahan di tarik sampai melewati batas proporsional. *Ultimate Tensile Strength* (UTS) merupakan besar tegangan maksimum yang didapatkan dalam uji tarik.

#### 4. Titik Putus

Merupakan besar tegangan di mana bahan yang diuji putus atau patah. Regangan merupakan ukuran mengenai seberapa jauh batang tersebut berubah bentuk. Tegangan diberikan pada material dari arah luar, sedangkan regangan adalah tanggapan material terhadap tegangan. Pada daerah elastis, besarnya tegangan berbanding lurus dengan regangan. Perbandingan antara tegangan dan regangan benda tersebut disebut modulus elastisitas atau *Modulus Young*. Pengukuran *Modulus Young* dapat dilakukan dengan menggunakan gelombang akustik, karena kecepatan jalannya bergantung pada *Modulus Young*. Secara matematis dirumuskan pada Persamaan 2.12 dan 2.13:

$$E = \frac{F \cdot L}{A \cdot \Delta L} \quad (2.12)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.13)$$

Dimana :

E = *Modulus Young* (N/mm<sup>2</sup>)

F = Gaya (N)

A = Luas Penampang (mm<sup>2</sup>)

L = Panjang mula-mula (mm)

$\Delta L$  = Pertambahan panjang/pendek (mm)

Nilai *Modulus Young* hanya bergantung pada jenis benda (komposisi benda), tidak bergantung pada ukuran atau bentuk benda. Nilai *Modulus Young* beberapa jenis bahan dapat kalian lihat pada Tabel 2.1 Satuan SI untuk E adalah pascal (Pa) atau N/mm<sup>2</sup>.

**Tabel 2.1** *Modulus Young* pada Material

<b>Material</b>	<b><i>Modulus Young</i> (N/mm<sup>2</sup>)</b>
Aluminium	70 x 10 <sup>9</sup>
Baja	200 x 10 <sup>9</sup>
Beton	20 x 10 <sup>9</sup>

## 2.22 Deformasi Material

Deformasi material merupakan perubahan bentuk atau ukuran dari sebuah material karena sebuah gaya kerja yang diterapkan padanya. Dalam hal ini deformasi material yang dimaksud timbul akibat gaya kerja berupa kekuatan tarik, kekuatan geser, kekuatan lipatan atau memutar (*torsi*).

Ketika deformasi terjadi gaya internal antar-molekul muncul melawan beban atau gaya kerja yang diberikan, jika gaya yang diberikan tidak melebihi kekuatan internal antar-molekul material maka memungkinkan material tersebut dapat mencapai keadaan setimbang baru dan kembali ke kondisi semula ketika beban atau gaya kerja yang diberikan dihapuskan. Sebaliknya jika beban atau gaya kerja yang diberikan melebihi kemampuan gaya internal antar-molekul material maka dapat menyebabkan deformasi permanen dari material (kegagalan struktur). Adapun deformasi yang timbul pada material dapat dihitung dengan Persamaan 2.14 berikut:

$$\delta l = \varepsilon l = \frac{\sigma l}{E} = \frac{Pl}{AE} \quad (2.14)$$

Dimana:

- $\sigma$  = Tegangan yang timbul pada material (N/mm<sup>2</sup>)
- $\varepsilon$  = Regangan yang timbul pada material
- P = Beban atau gaya yang bekerja pada material (N/mm<sup>2</sup>)
- A = Luas penampang material (mm<sup>2</sup>)
- E = Modulus elastisitas material (N/mm<sup>2</sup>)
- l = Panjang material (mm)
- $\delta l$  = Deformasi material (mm)

### 2.23 Single Point Constrained (SPC)

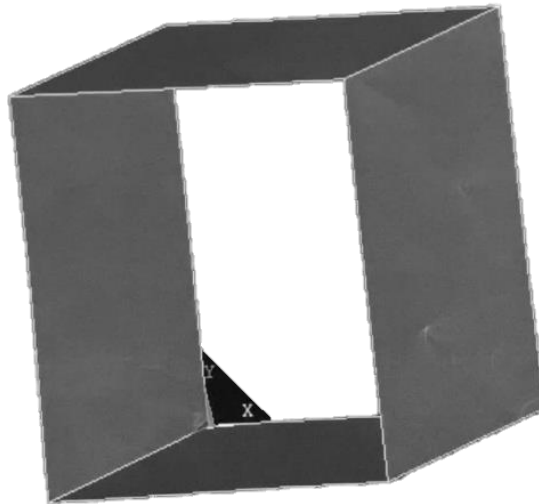
Ada dua jenis *nodal constraints*: *single-point* dan *multipoint*. *Single point constraint* membatasi satu atau beberapa DOF dari gerakan tertentu (misalnya nol perpindahan ke segala arah, nol gerakan vertikal tetapi bebas bergerak secara horizontal, dll) pada sebuah titik. Untuk batasan *single point*, nilai yang ditentukan bisa nol atau bukan nol. Nol kendala perpindahan juga dikenal sebagai kendala homogen, sementara bukan nol kendala dikenal sebagai gerakan yang ditentukan atau kendala nonhomogen (Yang, 2017).

### 2.24 Multiple Point Constrained (MPC)

Sebagai contoh sebuah box girder berukuran 5000 x 5000 x 5000 mm dengan material pelat t = 10 mm diketahui material propertis dengan Modulus Elastis = 200000 N/mm<sup>2</sup>, *Poison Ratio* = 0,3 dan densitas = 7,8 x 10<sup>-5</sup> N/mm<sup>2</sup> adapun bentuk box girder dapat dilihat seperti gambar yang telah didesain di ANSYS.

Gambar 2.14 menunjukkan bahwa *box girder* tidak memiliki penampang tengah yang dapat dijadikan sebagai contoh sederhana apabila penampang kapal tidak memiliki elemen di tengah penampang. Dalam kondisi batas (*boundary condition*) penentuan letak netral axis sangat berpengaruh terhadap proses running di ANSYS sementara diketahui bahwa netral axis merupakan titik pusat massa bekerja pada sebuah struktur. Apabila letak *netral axis* struktur tersebut berada pada posisi di tengah, hal tersebut membuat tumpuan yang akan diberikan pada sumbu *netral axis* tidak diketahui, oleh karena itu software ANSYS dapat

membuat titik/node bayangan yang dapat digunakan sebagai letak tumpuan/*multiple point constrained* (MPC) (Alie et al., 2021).



**Gambar 2.14** *Box Girder* Tanpa Elemen di Tengah Batang

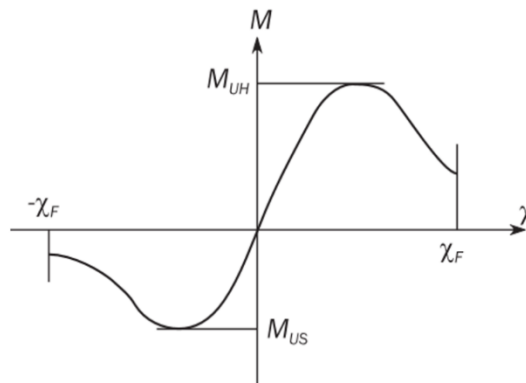
### 2.25 Kekuatan Batas Kapal Tanker (*Ultimate Strength*)

Kekuatan-batas adalah batas kekuatan struktur untuk mengalami pembebanan maksimum sebelum mengalami *collapse* total (Huges & Paik, 2010). Perhitungan kekuatan-batas kapal tanker berdasarkan keakuratan dan kompleksitas hingga saat ini terdiri dari 5 metode yaitu: teori balok, metode *Presumed Stress Distribution*, metode Smith dan *Idealized Structural Unit Method* (ISUM), *Intelligent Supersize Finite Element Method* (ISFEM), dan NLFEA.

Kekuatan-batas kapal tanker ( $M_U$ ) harus dihitung dengan metode NLFEA atau metode buckling dan harus memenuhi kriteria seperti Persamaan 1 dibawah ini (DNV GL, 2017b).

$$M_t \leq \frac{M_U}{\gamma_R} \quad (2.15)$$

dimana  $M_t$  adalah momen lentur-batas total vertikal dan  $\gamma_R$  adalah faktor keamanan untuk kekuatan-batas lentur vertikal (1,1 untuk kondisi *sagging* dan 1,21 untuk kondisi *hogging*).



**Gambar 2.15** Grafik Kekuatan Momen Lentur dan Kelengkungan (DNV GL, 2017b)

Hubungan antara kekuatan-batas momen lentur dan kelengkungan ditunjukkan pada Gambar 2.10 Nilai kelengkungan yang positif menunjukkan kondisi *hogging* dan nilai kelengkungan yang negatif menunjukkan kondisi *sagging*.

Berdasarkan teori balok, tegangan lentur ( $\sigma$ ) pada penampang balok yang mengalami momen lentur dapat dihitung dengan:

$$\sigma = \frac{M \times z}{I} \quad (2.16)$$

dimana M adalah momen lentur, I adalah momen inersia dan z adalah jarak dari sumbu netral dari penampang balok ke lokasi tegangan lentur pada arah tinggi dari balok.

Tegangan lentur maksimum ( $\sigma_{\max}$ ) dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan sebagai berikut

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{S} \quad (2.17)$$

dimana S adalah modulus penampang.

Modulus penampang (S) seperti pada Persamaan 2.17, untuk penampang kapal dibagi menjadi dua, yaitu sebagai berikut:

$$S_d = \frac{I}{z_d}, \quad \text{untuk bagian } \textit{deck} \quad (2.18)$$

$$S_b = \frac{I}{z_b}, \quad \text{untuk bagian } \textit{bottom} \quad (2.19)$$



dimana  $S_d$  dan  $S_b$  adalah potongan penampang vertikal pada bagian *deck* dan *bottom* kapal,  $z_d$  dan  $z_b$  adalah jarak dari sumbu netral dari potongan penampang kapal ke *deck* atau *bottom*.

Pada teori balok, lambung kapal akan mengalami kekuatan-batas ketika tegangan lentur maksimum pada bagian yang tertekan mencapai kekuatan tekan batas, yaitu untuk *deck* pada saat *sagging* dan untuk *bottom* pada saat *hogging*. Kekuatan-batas akibat momen lentur untuk kapal dapat dihitung dengan Persamaan 6 dan 7 sebagai berikut:

$$M_{US} = S_d \sigma_{ud}, \text{ untuk } deck \quad (2.20)$$

$$M_{UH} = S_b \sigma_{ub}, \text{ untuk } bottom \quad (2.21)$$

dimana  $M_{US}$  dan  $M_{UH}$  adalah kekuatan-batas momen lentur untuk *sagging* dan *hogging* dan  $\sigma_{ud}$  dan  $\sigma_{ub}$  adalah tegangan tekan batas untuk *deck* dan *bottom* kapal.

## 2.26 Metode Non Linear Finite Element Analisis (NLFEA)

Metode NLFEA adalah salah satu metode elemen hingga yang digunakan dan direkomendasikan oleh biro klasifikasi untuk menghitung kekuatan struktur kapal, disamping metode lainnya seperti teori balok, metode presumed stress distribution, ISUM dan ISFEM. Hughes dan Paik (2010), menghitung dan membandingkan kekuatan-batas struktur kapal dengan menggunakan metode teori balok, metode *presumed stress distribution*, NLFEA, ISUM dan ISFEM. Penelitian ini akan menggunakan metode NLFEA untuk menghitung kekuatan-batas longitudinal struktur kapal tanker baik pada kondisi utuh dan setelah mengalami kerusakan akibat kandas dan tubrukan.

Perhitungan kekuatan-batas struktur dengan metode NLFEA perlu memperhatikan hal-hal sebagai berikut:

### 1) Tipe metode NLFEA

Kekuatan-batas momen lentur kapal pada kondisi utuh dan rusak dapat dianalisa dengan menggunakan 3 tipe metode NLFEA yaitu:

- a. Analisa statis
- b. Analisa quasi-statis
- c. Analisa dinamis

Analisa statis dan analisa quasi statis banyak digunakan oleh para peneliti untuk menghitung kekuatan-batas struktur kapal.

## 2) Algoritma *iterative solution*

Tiga jenis algoritma *iterative solution* yang dapat digunakan pada metode NLFEA adalah algoritma *Newton-Raphson*, algoritma quasi *Newton-Raphson* dan algoritma resiko. Algoritma N-R dan quasi N-R dapat digunakan pada analisa statis dan analisa dinamis implisit. Algoritma resiko hanya dapat digunakan pada analisa statis. Analisa dinamis eksplisit tidak menggunakan algoritma *iterative solution*.

## 3) Proses peningkatan beban

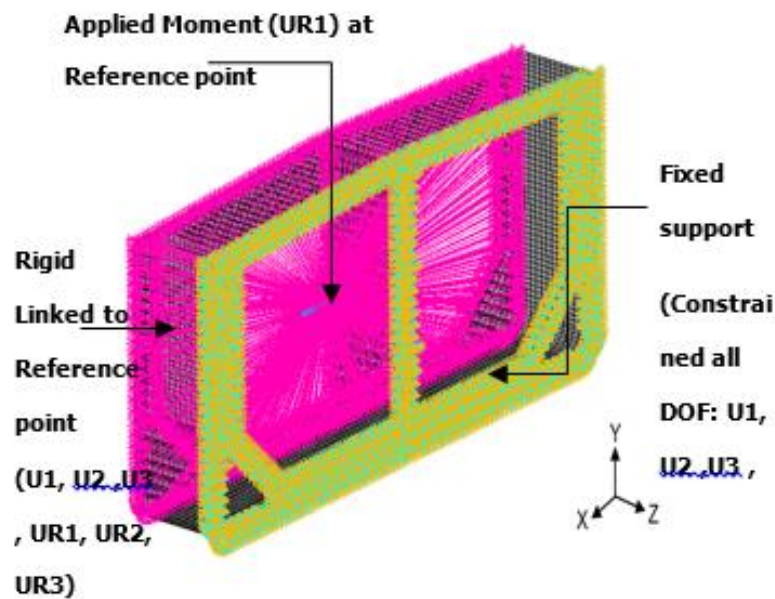
Pembebanan yang diaplikasikan pada metode NLFEA menggunakan proses peningkatan pembebanan. Dua jenis kontrol beban yang digunakan untuk mendapatkan nilai kekuatan-batas momen lentur kapal tanker yaitu kontrol kelengkungan dan kontrol momen.

Kontrol kelengkungan dilakukan dengan menggunakan *rigid link* pada kedua ujung model elemen hingga. *Rigid link* dihubungkan ke titik acuan pada sumbu netral. Peningkatan nilai kelengkungan diperoleh dengan menggunakan kecepatan akselerasi dan damping faktor. Kedua ujung pada titik acuan diberikan beban momen.

Kontrol momen dilakukan dengan menggunakan *rigid link* pada salah satu ujung model elemen hingga dan ujung yang lainnya di-*full constrain*. Ujung model yang menggunakan *rigid link*, diberikan momen lentur. Reaksi pada ujung model yang di-*constrain* akan mencapai titik batas kekuatan dari struktur.

## 4) Pembebanan dan Kondisi Syarat Batas

Pembebanan dan kondisi syarat batas yang diaplikasikan pada model elemen hingga sangat tergantung pada jenis proses peningkatan beban yang digunakan. Kontrol kelengkungan menggunakan kondisi syarat batas dimana kedua ujung model diberikan *rigid link* dengan pembebanan seperti pada Gambar 2.15.



**Gambar 2.16** Kondisi syarat batas untuk kontrol kelengkungan (hasil olahan, 2017)

5) Ketidaktepatan Geometrik

Selama fabrikasi struktur kapal (pemotongan, *rolling*, pembentukan, pengelasan dan perlakuan panas) terjadi ketidaktepatan geometri dan tegangan sisa yang dapat mempengaruhi kekuatan batas struktur. Metode NLFEA dapat mengkondisikan ketidaktepatan geometrik tersebut.

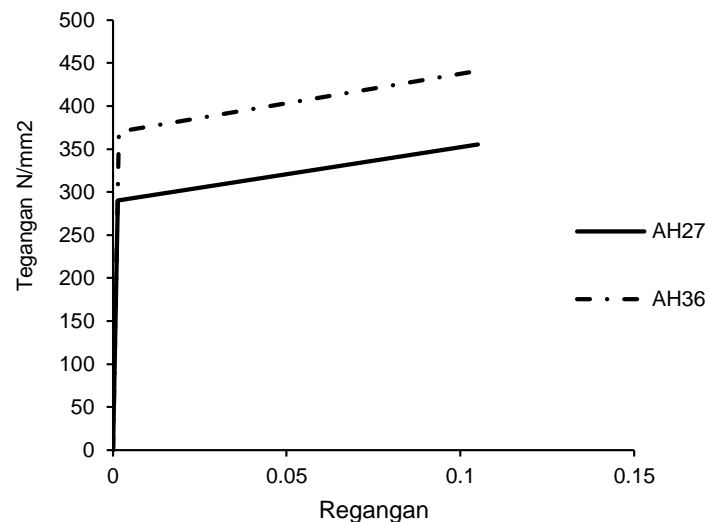
6) Spesifikasi Material

Kurva tegangan regangan dari material yang digunakan pada model elemen hingga harus tersedia. Kurva tegangan regangan sangat menentukan nilai kekuatan-batas dari struktur kapal. Penelitian ini menggunakan spesifikasi material pada Tabel 2.1, serta kurva tegangan regangan seperti pada Gambar 2.13.

**Tabel 2.2** Spesifikasi material (*Ship Structure Committee, 2015*)

Spesifikasi Material	Jenis Material	
	AH27	AH37
<i>Density</i> (kg/m <sup>3</sup> )	7850	7850
<i>Modulus Young</i> (N/mm <sup>2</sup> )	210000	210000
<i>Poisson's Ratio</i>	0,3	0,3
<i>Yield Strength</i>	290	370
<i>Tangent Modulus</i>	625	675

Berdasarkan tabel di atas Material AH27 dan AH37 merupakan material khusus untuk marine. Modulus elastisitas sebesar  $210000 \text{ N/mm}^2$ , rasio poisson 0,3 dan tegangan luluh AH27 sebesar  $290 \text{ N/mm}^2$ , AH36 sebesar  $370 \text{ N/mm}^2$  serta tangent modulus AH27 sebesar  $625 \text{ N/mm}^2$  dan AH36 sebesar  $675 \text{ N/mm}^2$ . Model material *bilinear isotropic hardening* dapat dilihat pada gambar 2.16 berikut.



**Gambar 2.17** Model Material *Bilinear Isotropic Hardening* (Ship Structure Committee, 2015)

#### 7) Meshing

Ukuran dan kualitas meshing sangat penting untuk membandingkan hasil perhitungan antara metode NLFEA dan metode linear FEA. Sebelum melakukan analisa dengan metode NLFEA dalam skala besar perlu untuk melakukan studi *mesh convergence*.

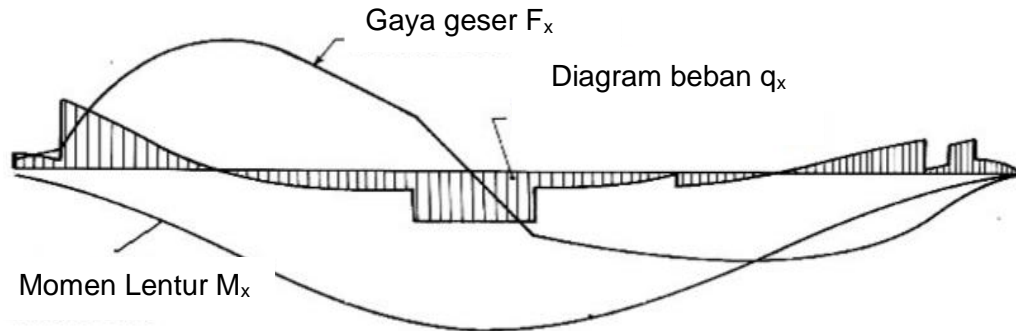
Bagian model yang diperkirakan akan mengalami tegangan yang besar sebaiknya di-meshing dengan ukuran yang lebih kecil untuk dapat memperlihatkan bentuk kegagalan dengan lebih jelas dan akurat. Semakin kecil nilai meshing maka perangkat komputer yang digunakan harus memiliki spesifikasi yang tinggi. Dalam penelitian ini, ukuran meshing yang digunakan sebesar 300 mm dengan bentuk *quadmapped*.

#### 8) Tipe Elemen

Semua pelat yang digunakan pada penelitian ini menggunakan tipe *Shell 181 (quadrilateral elements)*.

## 2.27 Pembebanan *Hogging* dan *Sagging*

Momen lentur dan gaya geser pada kondisi air tenang berasal dari gaya apung dan distribusi berat sepanjang panjang kapal seperti pada Gambar 2.10 (Shama, 2013).



**Gambar 2.18** Distribusi Beban, Gaya Geser, dan Momen Lentur pada Kapal (Shama, 2013)

Berat dan gaya apung diasumsikan sebagai  $w_x$  dan  $b_x$ , maka distribusi beban adalah

$$q_x = b_x - w_x \quad (2.22)$$

Distribusi gaya geser dan momen lentur pada kapal adalah

$$F_x = \int_0^x (b_x - w_x) dx \quad (2.23)$$

$$M_x = \int_0^x F_x dx \quad (2.24)$$

DNV GL (2017a), memberikan formula besaran momen lentur-batas vertikal pada kondisi air tenang ( $M_{SW}$ ) untuk panjang kapal lebih dari 90 m, sebagai berikut:

$$M_{SW} = -0,05168 K_M C L^2 B (C_b + 0,7) \text{ kN-m, kondisi sagging} \quad (2.25)$$

$$M_{SW} = +0,01 K_M C L^2 B (11,97 - 1,9 C_b) \text{ kN-m, kondisi hogging} \quad (2.26)$$

dimana,

$K_M$  = Faktor distribusi seperti pada Gambar 2.18

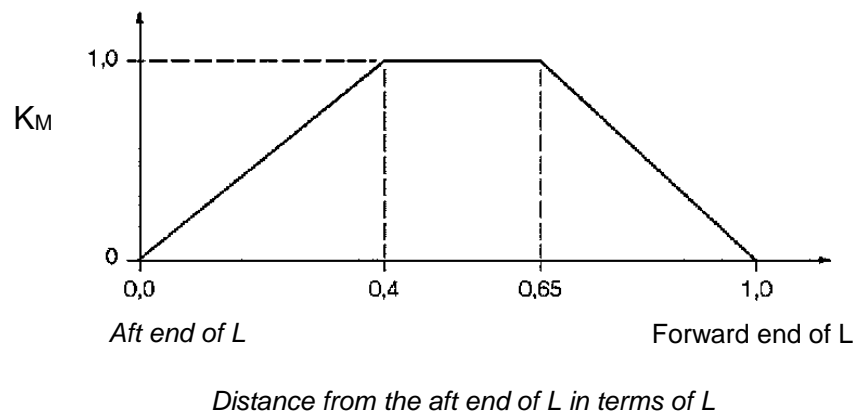
$L, B$  = lebar dan panjang kapal dalam satuan meter

$C_b$  = koefisien blok, tidak boleh kurang dari 0,6

$C$  =  $10,75 - [(300 - L)/100]^{1,5}$  untuk  $90 \leq L \leq 300$  m

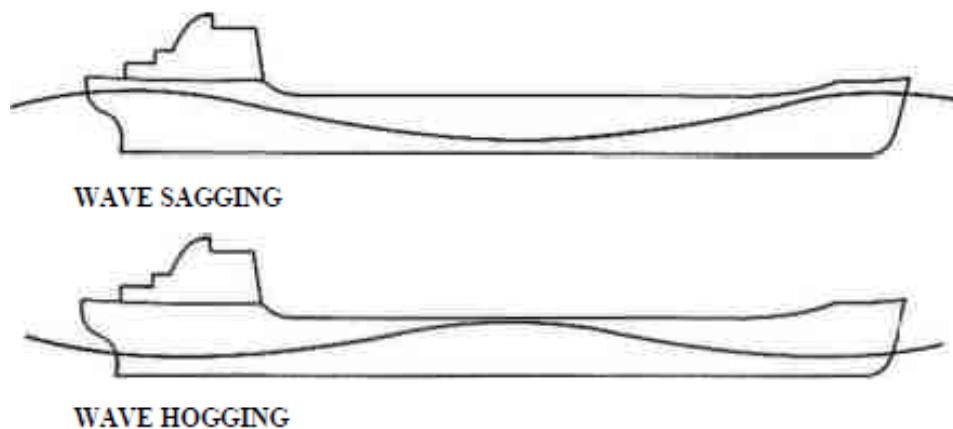
= 10,75 untuk  $300 \leq L \leq 350$  m

=  $10,75 - [(L - 350)/150]^{1,5}$  untuk  $350 \leq L \leq 500$  m



**Gambar 2.19** Faktor Distribusi  $K_M$  (DNV GL, 2017a)

Beban dinamis *longitudinal* diakibatkan oleh gelombang. Ketika kapal berada pada puncak gelombang, kapal mengalami momen lentur dan gaya geser yang disebut *hogging*. Ketika kapal berada di lembah gelombang, kapal mengalami momen lentur dan gaya geser yang disebut *sagging*. Adapun kondisi kapal akan mengalami *hogging* ataupun *sagging* dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



**Gambar 2.20** Momen Lentur Vertikal Akibat Gelombang (Bachman, 1991)

DNV GL (2017a), mengeluarkan rumus untuk memperkirakan besaran momen lentur-batas vertikal akibat gelombang ( $M_w$ ) untuk panjang kapal lebih dari 90 m, sebagai berikut:

$$M_w = -0,11K_M CL^2 B(C_b + 0,7) \text{ kN-m, kondisi sagging} \quad (2.27)$$

$$M_w = +0,19K_M CL^2 BC_b \text{ kN-m, kondisi hogging} \quad (2.28)$$

dimana, C dan  $K_M$  seperti pada Persamaan 2.25 dan 2.26.

Kombinasi beban statis dan dinamis ( $M_t$ ) untuk menganalisa kekuatan kapal terhadap momen lentur-batas vertikal dihitung dengan penjumlahan momen lentur-batas vertikal pada air tenang dan momen lentur-batas vertikal akibat gelombang (DNV GL, 2017b).

$$M_t = M_{sw} + 1,2M_w \quad (2.29)$$